
Tesis doctoral

Procesos naturales aplicados a la arquitectura mediante computación: ciencia Evo-Devo y modelado algorítmico a través de Grasshopper.

Diego Navarro Mateu



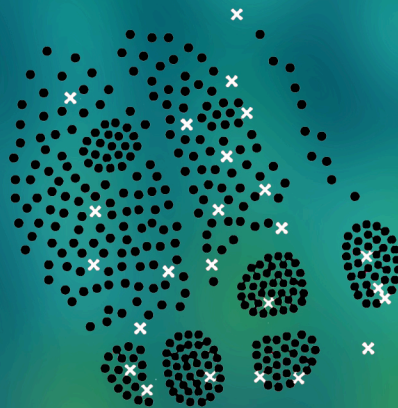
Aquesta tesi doctoral està subjecta a la licència [Reconeixement-NoComercial-SenseObraDerivada 4.0 Internacional \(CC BY-NC-ND 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)

Esta tesis doctoral está sujeta a la licencia [Reconocimiento-NoComercial-SinObraDerivada 4.0 Internacional \(CC BY-NC-ND 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)

This doctoral thesis is licensed under the [Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International \(CC BY-NC-ND 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)

Procesos Naturales aplicados a la Arquitectura mediante Computación:

Ciencia Evo-Devo y modelado
algorítmico a través de Grasshopper



Tesis doctoral de Diego Navarro Mateu

Tesis dirigida por el Dr. Alberto T. Estévez
Línea de investigación "Arquitecturas Genéticas"
Programa de Doctorado en Arquitectura
School of Architecture (UIC)

Imagen de portada:

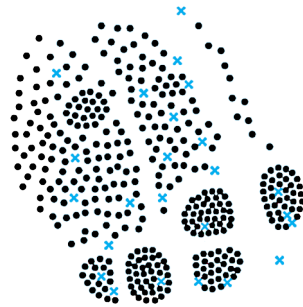
Diagrama de la distribución de individuos en el "fitness landscape".

Captura y modificación de la interfaz de Galapagos (algoritmo evolutivo para Grasshopper).

Procesos naturales aplicados a la arquitectura mediante computación

Ciencia Evo-Devo y modelado algorítmico a través de Grasshopper

~ Tesis doctoral de Diego Navarro Mateu ~



Tesis dirigida por el Dr. Alberto T. Estévez

Línea de investigación "Arquitecturas Genéticas"

Programa de Doctorado en Arquitectura

ESARQ School of Architecture - Universitat Internacional de Catalunya

Octubre de 2016

Agradecimientos

A mi director de tesis, por mostrarme el camino hacia nuevas maneras de entender la arquitectura. Por su paciencia y dedicación a lo largo de estos años, así como la confianza ciega que ha depositado en mí a pesar de los pasajes más misteriosos de esta tesis.

Al equipo de la AA (Architectural Association) en Londres: a Mike Weinstock por su generosa invitación al seminario de 'Emergence Seminar'; a los doctorandos Mohammed Maki y Ali Farzaneh por acogerme, y por su posterior colaboración en la investigación.

A los miembros que han rodeado esta tesis y contribuido en su proceso de defensa: revisores externos, miembros de comisiones y tribunales, compañeros de la ESARQ-UIC... pero especialmente, a quien ha prestado ayuda y experiencia, lejos de sus deberes y responsabilidades (103.99.98).

A las personalidades referenciadas en esta tesis, en cuyo caso es inevitable crear una relación unilateral de complicidad y respeto (ya sean contemporáneos, o de siglos atrás).

A todas las personas cercanas que han procurado que no desfallezca en el empeño de ver esta tesis concluida: desde mi hermana, pasando por todos y cada uno los miembros de la familia, y acabando en muchísimos amigos (tanto de hogar como de oficio). A todo ellos, por hacer la "pregunta mágica", por sus palabras incansables de motivación y comentarios burlones, que lograban despertar ánimo y rebeldía a partes iguales.

A mis padres, que entre novela y novela hicieron el esfuerzo de leer algo mucho menos entretenido. Obviando por supuesto, que su apoyo y educación son uno de los grandes motivos de una tesis doctoral relativamente joven.

A mis cuatro abuelos, causa evolutiva y emergente de esta situación... y por muchas más cosas de las que aquí pueden escribirse. Disfrutar de los recuerdos de la vida es vivir dos veces.

A María, por su paciencia, por ser la que más tiempo ha insistido, por ser la que más tiempo lo ha sufrido.

Y finalmente, a todas las personas que de manera más directa o tangencial hayan podido participar del proceso de esta tesis, o que han mostrado interés en el tema de la misma durante una cantidad de tiempo superior al razonable.

Mis más Sinceras Gracias a todos...

Notas al margen

Siendo fiel al carácter innovador de la temática y la responsabilidad medioambiental, la fuente escogida para “imprimir” la tesis es Ryman Eco¹. La tipografía, diseñada por Dan Rhatigan en colaboración con Grey Londres, reduce el consumo de tinta en un 30% gracias a surcos en el cuerpo de la tipografía que quedan ocultos debido a la absorción de la tinta. En el mismo sentido, se ha optado por usar negro 80% (gris oscuro).

Se ha utilizado el método de citación Chicago² a través de la herramienta on-line EasyBib y a posteriori, Mendeley.

Lista de Acrónimos:

- GH: Grasshopper.
- Evo-Devo: ‘Evolutionary Development’.
- EO: ‘Evolutionary Optimization’.
- ES: ‘Evolutionary Solver’.
- AAD: ‘Algorithmic Aided Design’.
- CAD: ‘Computer Aided Design’.
- NPCD: ‘Natural Processes Design Computation’.
- MOEA: ‘Multi-objective evolutionary algorithm’.
- NURBS: ‘non-uniform rational B-spline’.

La tesis cuenta con un índice detallado al final de la misma para facilitar la búsqueda de subcapítulos concretos.

Se han añadido dobles asteriscos (**) para destacar los puntos más relevantes de la tesis y facilitar su búsqueda en medios digitales.

En lo que se refiere a los archivos requeridos para llevar a cabo los experimentos (principalmente archivos 3D de Rhino y definiciones de GH) no serán descritos de forma exhaustiva. Tal y como se describirá en la metodología, no es uno de los objetivos de esta tesis hacer un compendio de ejercicios-tutoriales para el aprendizaje de Rhino y GH. Aun así, si que se dispondrá el libre acceso a los archivos vía web en el siguiente link una vez la tesis haya sido defendida con éxito:

<https://drive.google.com/drive/folders/0B2B3x9cjrTYkUVBvUS1YamtTNmM?usp=sharing>.

Respecto al lenguaje, por conveniencia del doctorando, la tesis se ha elaborado en castellano por ser este el idioma nativo del mismo. La mayor parte de las referencias sin embargo provienen de documentos de habla inglesa. Se considera que la difusión de esta tesis está dirigida a un público de lengua española -castellana- y que ello aumenta su valor por la escasez

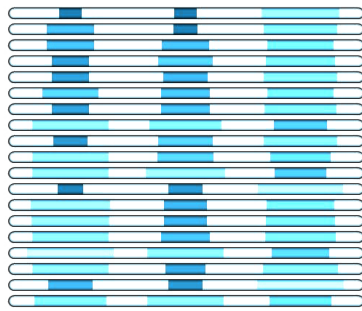
¹ Ryman Eco. Consultada 14 de junio, 2015. www.rymaneco.co.uk

² Chicago Manual of Style. “Quick guide”. Consultada 20 de marzo, 2014. http://www.chicagomanualofstyle.org/tools_citationguide.html

de investigaciones semejantes en dicha lengua. Lejos de establecer una barrera lingüística, se incluyen con frecuencia citas en el lenguaje original y terminología en inglés. La función de ello no es dificultar la comprensión sino facilitar su aprendizaje para permitir su posterior desarrollo dentro del campo. No solamente la mayoría de los artículos de investigación, sino internet en general -tutoriales, web...-, las universidades consideradas, y la comunidad de Grasshopper en particular hacen uso de la lengua inglesa. Proporcionar traducción para toda esa terminología puede parecer útil en primera instancia, pero su existencia sería cuasi nula fuera de la tesis, y por tanto de poca utilidad.

Esta tesis es 100% 'CODE FREE'. Por motivos expuestos a lo largo de la tesis se ha buscado deliberadamente técnicas que no requieran el uso de programación para solucionar los problemas/ejecutar los experimentos.

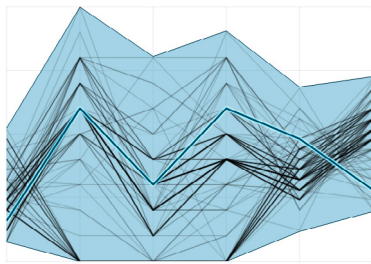
Tesis depositada el 1 de Noviembre de 2016. Aprobada para defensa el 8 Marzo de 2017. A defender el 20 de Abril de 2017.

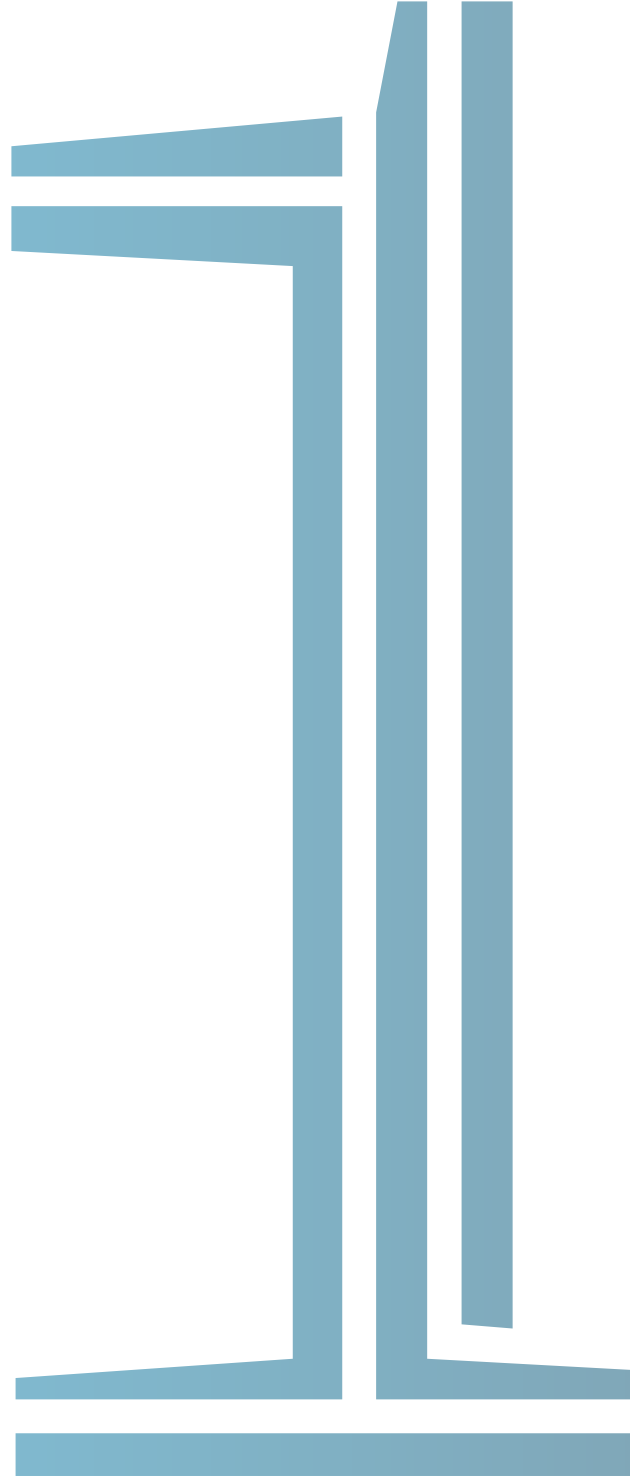
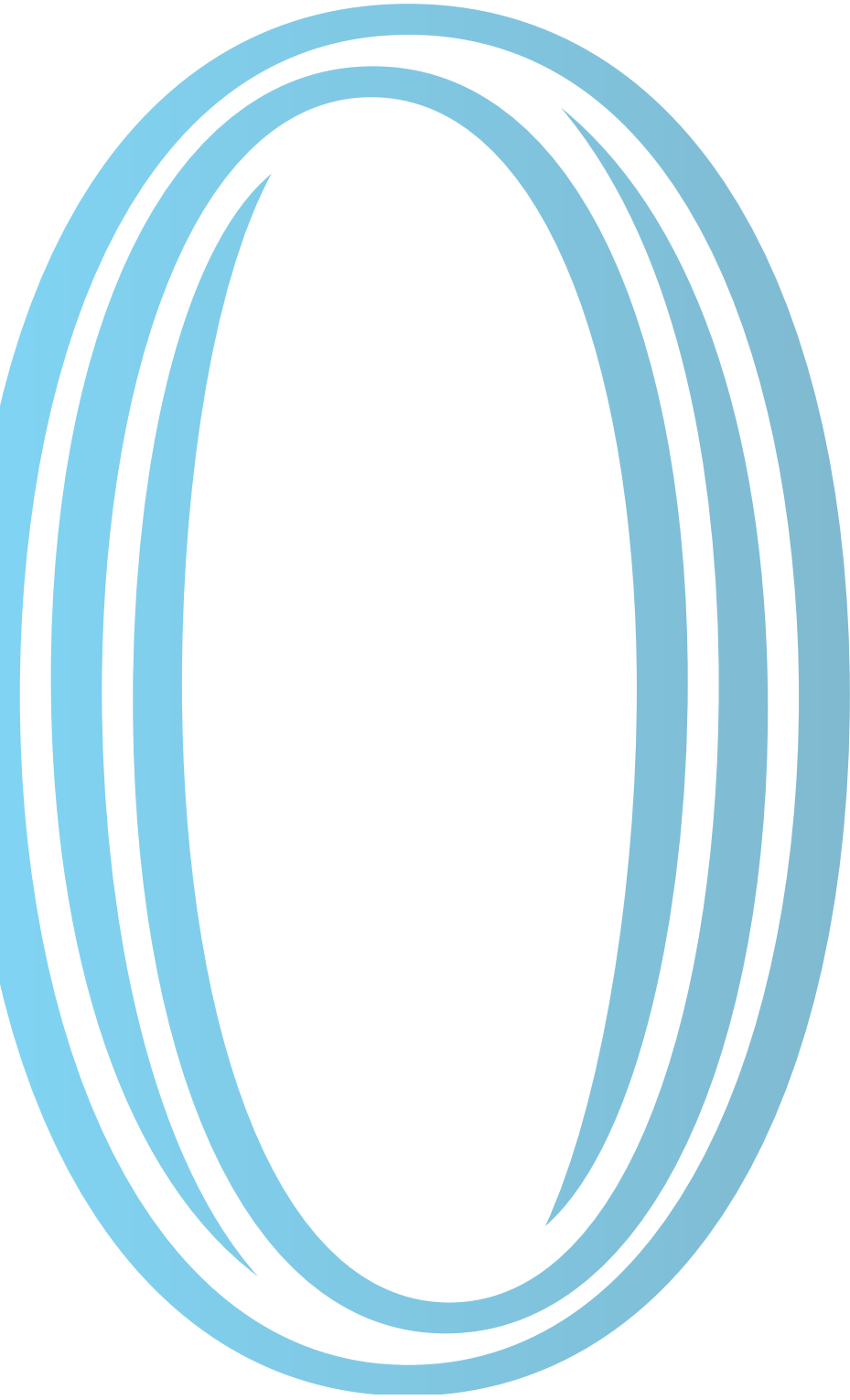


Índice

1. Introducción	15
1.1. Objetivos	17
1.2. Justificación	19
1.3. Metodología	25
2. Contexto bio-digital:	35
2.1. Naturaleza y su papel en la arquitectura	37
2.1.1. Naturaleza como arquitectura durante lo pre-digital	37
2.1.2. Abstracción del concepto natural en la arquitectura	48
2.1.3. Naturaleza contemporánea	57
2.2. Herramientas como naturaleza humana	69
2.2.1. La esfera digital	71
2.2.2. Máquinas computadoras	81
2.2.3. Diseño por computación	84
2.2.4. El lenguaje de la lógica	91
2.2.5. Grasshopper, software para una tesis	107
2.3. Lo paramétrico	123
2.3.1. Software y su componente paramétrica	124
2.3.2. Diseño paramétrico, el Meta-Diseño	126
2.3.3. Repercusión estilística de lo paramétrico en la arquitectura	132
2.4. 'Biolearning': cuando lo digital se torna natural	155
2.4.1. Diseño de materiales (máxel)	162
2.4.2. Lo biológico como software (biología sintética)	165
3. Procesos de emergencia	177
3.1. Emergencia y sistemas complejos	179
3.1.1. La Morfogénesis de Alan Turing	180
3.1.2. La "Nueva ciencia" de Stephen Wolfram	183

3.1.3. La arquitectura genética de Karl S. Chu	192
3.2. Evo-Devo: biología evolutiva del desarrollo	197
3.2.1. Evolución (biológica)	197
3.2.2. Desarrollo (biológico)	207
3.3. Algoritmos Evolutivos (ES: evolutive solver)	223
3.3.1. Descripción y funcionamiento de un ES	223
3.3.2. Diseño evolutivo (y cibernética) en arte e ingeniería	241
3.3.3. Arquitectura evolutiva	247
3.4. Modelo de desarrollo computacional	269
3.4.1. Estrategias de Estructuras Formales	270
3.4.2. Mallas poligonales como topología	278
3.5. Repercusiones embriológicas en el modelo evolutivo	290
4. Desarrollo de experimentos prácticos	293
4.1. Exp. 1: Superposición de patrones	299
4.2. Exp. 2: Abstracción Evo-Devo en geometría	313
4.3. Exp. 3: Evolución de tejidos urbanos	321
4.4. Exp. 4: Fórmula de Ildefons Cerdà	345
4.5. Exp. 5: 'Evolutionary Development' a través de Grasshopper	351
5. Conclusiones: implicaciones y futuribles	371
5.1. Emergencia digital: patrones aleatorios y sistemas procedurales	373
5.2. Incertidumbre en el diseño e "hiperlocalidad"	376
5.3. Arquitectura Evo-Devo: simulaciones computacionales	379
5.4. Mas allá de Evo-Devo	383
6. Bibliografía y contenidos	387
6.1. Referencias publicadas	387
6.2. Referencias en Internet	403
6.3. Índice extendido	419





1. INTRODUCCIÓN

Abordar esta tesis requiere una postura abierta con la arquitectura, tolerante con otras formas de proyectar y formalizar las ideas. Si algo ha caracterizado la sociedad (y la arquitectura) en los últimos años ha sido el beneplácito hacia lo innovador, lo nuevo y lo diferente, un cierto pluralismo consensuado. Ese frenesí creativo que ahora sí, gracias a internet y la globalización, parece ser una voluntad de masas. Por supuesto, esa novedad fruto de la creatividad desbordada, no siempre ha de ser mejor que lo preexistente, ni tampoco pretende sustituir necesariamente, sino descubrir, aportar, y ofrecer nuevas alternativas en el conocimiento arquitectónico.

No obstante, la situación actual de crisis medioambiental añade un factor relevante al ya de por sí atractivo hecho de plantear e investigar nuevas arquitecturas. La divertida curiosidad de descubrir nuevas formas de proyectar queda sustituida por una necesidad de corregir el ecosistema del planeta y la manera en que lo poblamos (colonizado por la arquitectura). Probablemente, nunca se debió cortar la primigenia relación entre hombre y naturaleza, siendo macetas y jardines un pobre sucedáneo que seguramente crea más añoranza que consuelo. Puede que la incapacidad cultural para juzgar a la naturaleza como producto, esté tocando a su fin en paralelo con la progresiva naturalización de lo artificial. Animar lo artificial y construir lo natural son ahora dos sentidos en la misma dirección. **

La arquitectura, que ha de sustentarse a sí misma, ser contenedora de luz, la arquitectura que ha de dejarse poblar por instalaciones y mecanismos, de permitir y difundir el acto social, ha de cumplir ahora un acto más: dejarse absorber por la naturaleza y convertirse ella misma en naturaleza. Así, una vez más, el arquitecto se encuentra en los límites de otras vertientes más alejadas de su disciplina. Sin suficientes conocimientos matemáticos, informáticos, o biológicos para desempeñar tan pintoresca tarea: las especialidades crecen, y del mismo modo así lo hacen los factores que afectan a la profesión de la arquitectura, dificultando la convergencia entre diferentes ramas y sectores con el fin de que produzcan algo útil, tangible, y al alcance de todas las personas.

Además de las razones lógicas expuestas y razonadas en el apartado de justificación de esta tesis, se añaden las circunstancias y contexto que atañen al doctorando siendo estas haber cursado previamente el máster de Arquitectura Biodigital en la ESARQ-UIC (Escuela Técnica Superior de Arquitectura de la Universitat Internacional de Catalunya), pertenecer al grupo de Investigación de Arquitecturas Genéticas y ejercer en el despacho de Genetic Architectures Office. Siendo todos estos elementos dirigidos y fundados por el Dr. Alberto T. Estévez que hará sus veces de director de esta Tesis. Por otro lado el doctorando, por su interés y conocimiento en el área de la computación, ejercerá como profesor en las siguientes asignaturas de la ESARQ: Informática, Representación digital del proyecto, Composición 1 y 3, y Proyectos 1 y 2. Asumiendo el papel de profesor responsable, asistente, o participando de forma parcial en los casos de Composición y Proyectos bajo

la responsabilidad del Dr. Alberto T. Estévez.

Todos los elementos favorecen el inicio y desarrollo de la tesis, explicando su motivación e interés, también acompañados por las sucesivas ediciones del Máster de Arquitectura Biodigital y los ciclos de conferencias 'International Conferences of Biodigital Architecture y Genetics'. El marco descrito invita a reflexionar sobre una clara dicotomía. Una relación paralela entre la información digital-artificial que puede ser manipulada, y la propia información intrínseca en la naturaleza: compuesta por el ADN y que se manifiesta en el campo de las ciencias biológicas. A día de hoy la intersección de estos dos campos (computación y genética) goza de un fértil crecimiento y un futuro prometedor aunque incierto. Entre ellos se encuentran en la actualidad cada vez más puntos en común, apareciendo así disciplinas mixtas como son la nanotecnología, la biomecánica, la cibernética, etc. Por una parte, el entorno digital (formado por software y hardware), se impone como un elemento esencial en nuestra cultura y sociedad actual, y empieza a formalizarse de una manera más directa en la arquitectura a través de la domótica, la industria robotizada, o el software de diseño. Por otro lado, la biología, con millones de años de evolución en eficiencia por lo que a estructuras, formas, espacios, comportamientos y relaciones se refiere; y por lo tanto una rica fuente de información a considerar que se ve actualizada gracias al campo de la genética.

Se analizará la situación de la arquitectura para con la naturaleza -y cuáles son las nuevas maneras de entenderla-, la implicación de las herramientas digitales, la filosofía y aportación de la arquitectura paramétrica, y los procesos Evo-Devo (evolución y desarrollo) que han abierto una nueva manera de entender el orden de la forma. Con estas bases se llevarán a cabo experimentos con carácter geométrico o arquitectónico que pongan todo lo anterior en adecuada relación. Por lo transdisciplinario de los temas, la tesis goza de una mirada periférica y un especial interés por contextualizar las motivaciones de la misma, hilando antecedentes considerablemente alejados para conformar la red cultural necesaria para justificar sus pasos.

1.1. Objetivos

El objetivo de esta tesis es establecer relaciones y puntos en común entre los campos de la biología y la arquitectura a través de la computación. Si bien cualquier proceso natural o universal puede tener interés para el desarrollo de la tesis -y de hecho aparecerán muchos en lo sucesivo- la tesis se centra en los mecanismos y sistemas que utiliza la biología para generar el resto de procesos geométricos, siendo estos el Desarrollo y la Evolución (la recientemente conocida como ciencia Evo-Devo).

Este documento trata de recuperar para la arquitectura los principios más elementales de la naturaleza y a la vez, las innovaciones y asombrosos descubrimientos que nos brindan otras ciencias a través de la investigación. Estos pueden ver sus resultados objetivados en una arquitectura actualizada que se alimenta del mundo digital y computacional. Mediante la comprensión, estudio y re-aplicación de la naturaleza en la arquitectura (la técnica de crear espacio, geometría) la tesis plantea una serie de conclusiones tanto teóricas como prácticas, siendo estas últimas ejecutadas a través de lo digital, y permitiendo así establecer paralelismos entre lo natural y su aplicación en lo arquitectónico. Estos paralelismos vienen impulsados especialmente por la capacidad del software para simular y reproducir procesos de creciente complejidad.

Así pues, se elaborará un discurso coherente y continuo de conceptos interdisciplinarios (no exentos de polémica³) a medida que se vayan introduciendo los temas con el fin de aunarlos en los últimos ejercicios de la tesis y relacionar las tres disciplinas: biología (estrictamente enfocada a procesos de desarrollo y evolución), computación (como herramienta paramétrica y de simulación), y arquitectura (como técnica de organización y formalización).

La tesis también contempla dos aspectos fundamentales que se desarrollarán en detalle más adelante: su vigencia como elemento de actualidad y su accesibilidad al mundo de la arquitectura. Es decir, uno de los valores que se le pretende es que sirva como un punto de partida cercano a la situación actual y que sea aplicable por un abanico relativamente amplio de arquitectos. Por lo tanto, que tenga potencial divulgativo por su frescura y contemporaneidad.

De forma más sintética podemos enumerar los objetivos y agruparlos en las consecuentes partes que componen la tesis:

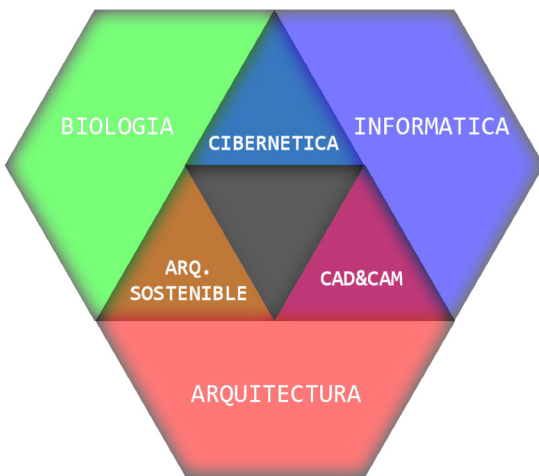
- Desarrollar un recorrido histórico de la arquitectura en su relación para con la naturaleza en contraposición a las nuevas posturas hacia lo natural y su impacto en el mundo del diseño y su aproximación social (cap. 2.1).
- Valoración del ecosistema digital. Las primeras consideraciones sobre la computación, su representación gráfica, y los lenguajes de la lógica digital (lo paramétrico y el meta-diseño), que se concretará

³ Desarrollado en esta tesis, sobre las implicaciones estilísticas del parametriso sobre la arquitectura (cap 2.3.3), comunmente relacionadas con un exceso constructivo que contribuyó a la crisis económica de 2008.

en un análisis exhaustivo del plug-in para Rhinoceros: Grasshopper. Y un listado de otros paquetes de software (add-ons) que puedan ser de utilidad en el ámbito de la arquitectura (cap. 2.2, 2.3).

- Establecer repercusiones del modelado digital y sistemas complejos en forma del concepto de emergencia (sistemas morfodinámicos y morfogenéticos) a través de una serie de personajes destacados en diferentes campos: Alan Turing, Stephen Wolfram y Karl S. Chu. (cap 3.1).
- Estudiar la digitalización de los procesos biológicos que afectan a la forma y geometría de los seres vivos: desarrollo y evolución. Incluir en ellos los últimos descubrimientos que han propiciado la aparición de la ciencia biológica Evo-Devo así como sus aplicaciones en el diseño a través de lo computacional (cap. 3.2, 3.3 y 3.4).
- Formalizar los objetivos anteriores en experimentos mediante el uso del ecosistema de software de Rhinoceros (especialmente a través de Grasshopper y sus add-ons). Establecer y determinar la asociación de conceptos transdisciplineras aplicados a conceptos arquitectónicos (o en su defecto, geométricos). El análisis de dichas técnicas y procesos en experimentos para comprobar su validez, puntos fuertes, debilidades y potencial analítico (cap. 4).

001. /// Esquema transdisciplinar. Mauro Costa, curso de Grasshopper en el máster de Arquitectura Biodigital, 2011.



1.2. Justificación

Se considera en el momento de comenzar la presente tesis que una serie de factores en la actualidad convergen para propiciar esta investigación y su estudio. Plantear nuevos paradigmas para la arquitectura, como señala Thomas Herzog⁴, implica asumir una nueva filosofía proyectual; se necesita un marco conceptual potente y global, un entendimiento profundo de las relaciones ecológicas, una construcción que satisfaga plenamente las necesidades vitales humanas y que esté en equilibrio con los ciclos vitales de la naturaleza⁵.

Primeramente, una crisis económica, medioambiental, y social que sugiere la evidente necesidad de un cambio en el quehacer arquitectónico (y por supuesto, otros campos). La arquitectura debe organizar y dar respuesta a esta serie de problemas al mismo tiempo que hace autocrítica sobre su presente y su futuro. Plantear esta crisis como una oportunidad de cambio es fundamental, pues si bien esta nueva oportunidad hacia la arquitectura ya venía vislumbrándose varios años atrás es ahora cuando hay un motivo acuciante para aplicarla, más allá del interés teórico o la pura experimentación. Lamentablemente, a medida que pasa el tiempo parece que la balanza entre la curiosidad y necesidad se declina claramente hacia la última.

La arquitectura es a su vez herramienta y producto de cambio. Murallas y puentes como alteradores topográficos, las nuevas tipologías durante las explosiones demográficas, revoluciones tecnológicas que inducen a nuevos paradigmas, lo icónico como resultado de poder (político, religioso, o económico), los monumentos como marcador temporal, las ciudades y sus infraestructuras como intercambiadores comerciales y culturales, espacios de representación y autoorganización de grupos sociales (segregadores o integradores), etc. La arquitectura es la herramienta propositiva que puede promover de forma activa el cambio. La arquitectura tiene el potencial de “comportarse” a voluntad y en consecuencia.

Además, la reciente carrera en pos de una sociedad (y una arquitectura) más sostenible imbuye a la arquitectura de esta responsabilidad moral y legal. A pesar de que se criticarán ciertos aspectos sobre este término más adelante, su pretensión de una adecuación del consumo a unos recursos limitados es totalmente válida. Previamente al inicio de esta tesis (2012) Investigadores del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) publicaban las fuerzas que pueden “estar dirigiendo” un nuevo cambio en el estado planetario, propiciando así un nuevo episodio de extinción masiva, siendo este el sexto en la historia de la Tierra:

Los humanos estamos provocando cambios que podrían llevar a un nuevo estado planetario; estos cambios parecen involucrar

⁴ Georgoulas, Andreas, Kara Hanif. *Interdisciplinary design. New Lessons from architecture and engineering*. Barcelona: Actar, 2013. p. 68.

⁵ AA.VV. “Edificios ecoeficientes Sostenibles.” *aa'arquitectura*. Barcelona: Colegio de Arquitectos de Catalunya, Julio, 2005. p. 5.

*alteraciones en la química de la atmósfera y los océanos, y grandes trastornos en los flujos de energía desde el principio hasta el final de la cadena alimentaria*⁶.

El estudio destaca que el incremento de la población ha traído consigo la transformación del 43% de la superficie terrestre en áreas urbanas y agrícolas. El arquitecto especialmente debería sentirse afectado por la situación, pues su quehacer supone la modificación y habitar de este entorno en crisis, pero más aún porque la propia arquitectura implica el 40% de las emisiones de CO₂, incluso por encima de los transportes⁷ -36% en el caso de la Unión Europea⁸. Neri Oxman pone de manifiesto la manera dividida en la que evoluciona la arquitectura en el punto 5 de su tesis:

*On the one hand there exists a desire to explore an expressive formal repertoire (how curvy can a building become?) while on the other, an aspiration to redefine sustainable design as we know it. Those two approaches are effortlessly detected across the scope of contemporary practice as two opposing worlds, each corresponding to a completely different set of values: formal expression vs. being good to our environment. The former approach celebrates advances in computation and digital fabrication technologies while the latter rejoices in the continuous improvement of building codes as they may become more environmentally friendly*⁹. NERI OXMAN

Ciertamente en esta aproximación dividida se advierte que aún queda mucho camino por recorrer y que el ideal arquitectónico debería encontrarse en un punto de confluencia que abarca ambas aproximaciones. Por el momento sin embargo, son más los ejemplos polarizados que los unificadores.

Otro de los factores mencionados en la justificación de esta tesis es el meteórico avance de la ciencia de Evo-Devo (sistemas evolutivos del desarrollo), que se reinicia en la década de los ochenta con el descubrimiento de los genes homeóticos y las aparentes similitudes entre todos los seres vivos. Sin duda, que un kit de herramientas relativamente simple permita desarrollar tal variedad de formas es fascinante, pero lo es más aun cuando comienzan a entenderse sus sistemas y sus semejanzas con lo digital. Advertir y replicar estas semejanzas significa abrir las puertas de una arquitectura más natural. Los postgrados asociados a esta tesis manifiestan las virtudes e importancia de introducir y sintetizar estos procesos naturales ('biolearning') en pos de una arquitectura capaz de responder a un contexto complejo de manera

⁶ VV.AA. "Has the Earth's sixth mass extinction already arrived?" *Nature*, nº471. Marzo, 2011. pp. 51-57.

⁷ Armstrong, Rachel. *Living Architecture: How Synthetic Biology Can Remake Our Cities and Reshape Our Lives*. s. l.: TED Books, 2012. pos. 77-79.

⁸ DICYT. Mayo, 2012. "El sector de la construcción genera el 36% de las emisiones de CO₂ en la Unión Europea." Consultada 20 de marzo, 2015. <http://www.dicyt.com/noticias/el-sector-de-la-construccion-genera-el-36-de-las-emisiones-de-co2-en-la-union-europea>

⁹ Oxman, Neri. *Material-based design computation*. Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology, 2010. p.135.

autónoma: Emergent Technologies (Architectural Association) y Biodigital Architecture (Universitat Internacional de Catalunya).

Por supuesto, esto no serviría de nada si no fuese acompañado de las herramientas pertinentes, las herramientas que permiten situar al arquitecto en una posición capaz de manipular y procesar información: la computación (Internet, PCs, sistemas operativos, interfaces gráficas...): el final del siglo XX quedó marcado por la adopción masiva de los ordenadores. Y desde entonces no ha cesado en un ascenso vertiginoso que requiere un esfuerzo considerable por parte del usuario/individuo para mantenerse actualizado. Esta velocidad de crecimiento es una de las razones que apoyan el sistema elegido para el proceso de recopilación en la metodología de la tesis. Los últimos años han permitido la explosión del modelado 3D a todos los niveles, permitiendo niveles de complejidad crecientes con mayor detalle y tamaño. La potencia computacional ha llegado al usuario medio y permite trabajar con ella sin necesidad de especializarse en el campo. El arquitecto puede por primera vez manipular y construir lo paramétrico por sí mismo en la escala y dimensión propia de su oficio.

En la conferencia “Realidades de Interconexión” introducida por Bart Lootsma sugiere que la computadora se vuelve un mediador entre diversas realidades y diversos paisajes, variando según lo que tradicionalmente entendemos como paisaje en la arquitectura y el planeamiento urbano, supliéndolo por paisajes en los cuales se envuelve la lluvia, el sonido y la naturaleza misma, jugando un papel más activo, provocando que esta dinámica y la ayuda de la tecnología surja como un organismo o por lo menos adquiera características orgánicas. El papel dinámico de la computadora como mediador para el diseño también implica un cambio con respecto al momento de la intervención creativa del diseñador y eso es algo que se debe tener presente a la hora de proyectar.

En el ámbito de lo computacional (o del diseño asistido por computación) merece especial atención el apartado de Grasshopper, herramienta con la cual se llevará a cabo las ejemplificaciones/experimentos de las asociaciones planteadas entre naturaleza y computación. Se justifica de manera excepcional y esquemática el uso de la mismo (a extender durante el estado de la cuestión):

- McNeel tiene su sede en Barcelona (lugar donde se desarrolla el doctorado).
- La tradición de la ESARQ con Rhinoceros (base de Grasshopper).
- Los cursos realizados por el doctorando en “Rhinoceros avanzado”, y Grasshopper.
- Sagrada Familia como ejemplo de fabricación digital y uso de Rhinoceros y GH.
- Grasshopper en fase beta (y por lo tanto en constante cambio por su carácter experimental).
- El doctorando ha estado en contacto con Giulio Piagentino y Rodrigo Bárcena (desarrolladores de McNeel en Barcelona).
- Se ha seguido de cerca la comunidad de Grasshopper: novedades,

dudas, discusiones, tutoriales y ejemplos.

- Dicha comunidad ha permitido contactar directamente con David Rutten, encargado principal del desarrollo de GH.
- GH es gratis, permite la creación de código propio, y consta de una biblioteca de ejemplos y experimentos de tamaño considerable. Por lo tanto su difusión ha sido enorme.
- La plataforma de food4rhino (y otras externas) plantean un ecosistema de add-ons sobre el plug-in de Grasshopper.

Por último, acudiremos al término NEXT-NATURE¹⁰, acuñado por el filósofo Koert van Mensvoort en 2003, y que será uno de los conceptos más relevantes de la tesis. Su papel en la investigación es más propio de legitimizar que justificar, desvelando una aproximación distinta en nuestro contexto más directo y cotidiano, y que permitirá naturalizar la arquitectura de la manera más extrema y agresiva.

With our attempts to cultivate nature, humankind causes the rising of a Next Nature, which is wild and unpredictable as ever. Wild systems, genetic surprises, autonomous machinery, and splendidly beautiful black flowers. Nature changes along with us¹¹. KOERT VAN MENSVOORT



Esta situación contextual a nivel ideológico y técnico condiciona la aparición de una arquitectura de gran valor e interés frente a los “estilos” anteriores: el parametrismo dota al proyecto de complejidad y le permite adaptarse con mayor flexibilidad a situaciones difíciles y variadas, repletas de problemas intrincados (irresolubles mediante sistemas estándar y/o habituales); y su desarrollo autónomo -vivo- le brinda la objetividad para crecer positivamente, al margen de decisiones arbitrarias u errores (bajo la premisa de que hayan sido formulados adecuadamente). Las virtudes de dichos conceptos y aquellos procesos derivados de los mismos se extenderán a lo largo de la tesis, demostrando que las características de los mismos suponen grandes ventajas en la elaboración de una nueva arquitectura contemporánea y bio-digital.

El término “arquitectura biodigital” propuesto por Alberto T. Estévez¹² hace referencia directa a la binomio natural-digital que la tesis trata de enfatizar en los caminos específicos de la ciencia Evo-Devo y parametrismo

¹⁰ Mensvoort, Koert van, y Hendrik-Jan Grievink. *Next Nature*. Amsterdam: Next Nature Network, p. 23.

¹¹ Next-Nature. Consultada 15 de agosto, 2015. <http://www.nextnature.net/>

¹² Estévez, Alberto. T. “Arquitectura Biodigital.” *Memorias SIGraDi’2008*. La Habana: Sociedad Iberoamericana de Gráfica Digital, 2008. pp. 484-487.

respectivamente, y que tal y como se ha justificado siguen creciendo en importancia a medida que nos adentramos en el s. XXI.

Deben revelarse las fuertes potencialidades que tiene el mundo natural si se trabaja con ADN como si fuese un 'software' natural, y las grandes posibilidades que tiene el mundo digital si se trabaja con 'software' como si fuese ADN digital. Su fusión lleva a la arquitectura biodigital y al organicismo digital, consolidándose estos años como una auténtica vanguardia del siglo XXI¹³. ALBERTO T. ESTÉVEZ.

¹³ Estévez, Alberto T. *Arquitectura Biodigital y Genética: Escritos = Biodigital Architecture & Genetics: Writings*. Barcelona: ESARQ, 2015. p. 123.

1.3. Metodología

A continuación se detallan los métodos establecidos para el correcto desarrollo de la tesis, los cuales dividiremos en los siguientes tres apartados: recopilación, aplicación y contraste. Aunque no de manera estricta, se corresponden considerablemente con el estado de la cuestión, el desarrollo y las conclusiones de la tesis.

Por la transdisciplinariedad de la tesis (arquitectura-computación-biología) se ha optado por una estructura que divida los diferentes campos y progrese gradualmente en complejidad a medida que la tesis avanza. Esto conlleva un estado de la cuestión integrado con el desarrollo más teórico, que corresponde al apartado de recopilación (cap. 2 y 3 respectivamente). Contrapuesto, el cap. 4 está formado exclusivamente por experimentos prácticos que se alimentan de los capítulos predecesores, conformando los apartados dedicados a aplicación y contrastación. De este último se extraerán las conclusiones.

Recopilación: interdisciplinariedad

Se pretende, por lo novedoso de los ámbitos aquí tratados y por la rápida evolución de las herramientas utilizadas (muchas en fase beta), una tesis que sea cuanto más contemporánea posible en el momento de su escritura.

Uno de los hilos conductores de la tesis, el uso del plug-in Grasshopper, marcará también el periodo temporal de la misma. A pesar de que inicialmente en Diciembre de 2013 David Rutten da por finalizado el desarrollo de la versión WIP ('work in progress') de GH¹⁴, no será hasta Agosto de 2014 cuando se detendrá por completo el desarrollo de dicha versión¹⁵ -siendo la 0.9.0073-. A partir de ese punto, se decide cursar el seminario de Emergence Technologies en la AA (año 2015) y sintetizar su contenido en un artículo presentado en el congreso eCAADe en Septiembre de 2015 para reunir y poner en práctica los conocimientos adquiridos hasta el momento en materia de software (GH y plug-ins) y ciencia Evo-Devo. El resto de tiempo hasta la defensa de la tesis se debe a la necesidad de relacionar y plasmar los objetivos argumentados en un documento coherente junto a otras referencias contemporáneas.

Tiene una especial relevancia el seguimiento sobre la comunidad de GH y los temas allí tratados a lo largo de los años. Ya no solo como un lugar de reunión donde solucionar problemas, plantear filosofías, o aprender tecnicismos, sino por los 'posts' dónde se llevan a cabo las primeras pruebas para formalizar conceptos universales en Grasshopper, poniendo al alcance del diseñador

¹⁴ Grasshopper3d. "Grasshopper 1.0 beta 1 available for download." Consultada 14 de julio, 2016. <http://www.Grasshopper3d.com/forum/topics/Grasshopper-1-0-beta-1-available-for-download>

¹⁵ Grasshopper3d. "Grasshopper 0.9.0076 available for download." Consultada 15 de julio, 2016. <http://www.Grasshopper3d.com/forum/topics/Grasshopper-0-9-0076-available-for-download?id=2985220%3ATopic%3A1121907&page=2#comments>

nuevas herramientas y procesos proyectuales. A detallar posteriormente, se ha hecho especial seguimiento sobre los miembros más relevantes, normalmente asociados al desarrollo de plug-ins de vital importancia para esta tesis.



Las bases bibliográficas iniciales se establecen a través de las referencias planteadas por los principios del máster de Arquitectural Biodigital en relación a los temas de Evo-Devo, Emergencia, Computación y Parametrismo: profesores del máster, 'studios', y 'workshops' realizados durante el mismo, así como las conferencias de la primera y segunda edición de la International Conference of Biodigital Architecture y Genetics. A continuación se enumeran los miembros de mayor relevancia: Alisa Andrasek, Ezio Blasetti, Mark Burry, Bernard Cache, Fran Castillo, Karl S. Chu, Matias Del Campo, Dennis Dollens, Evan Dougliis, Alberto T. Estévez, Mark Goulthorpe, Michael Hensel, Neil Leach, Duncan Lewis, Pablo Lorenzo-Eiroa, Greg Lynn, Sandra Manninger, Achim Menges, Marcos Novak, Kas Oosterhuis, François Roche, Lars Spuybroek. Todos ellos incluidos en lo que el mismo Estévez describe como 'GenBauhaus', padres de diferentes ramas punteras de lo biodigital que se han reunido a lo largo del tiempo en el máster del mismo nombre¹⁶.

Paralelamente y con especial valor, se han incluido las referencias del master de Emergent Technologies y Design de la AA de Londres, dónde el doctorado realiza un seminario de dos semanas sobre software evolutivo aplicado a tejidos urbanos. El seminario sirve para aproximarse con mayor detalle las figuras pioneras en arquitectura evolutiva como John Frazer o -posteriormente- Mike Weinstock, y de otras más específicas del campo de Evo-Devo como pueden ser: Sean B. Carroll y Armand Marie Leroi.

Se ha consultado con especial interés la revista AD (Architectural Design) para consolidar más aún una base de conocimientos sobre los que asentar la terminología de la tesis, sirviendo las últimas ediciones como estudio para el contenido de la tesis, pues ya se consideran contemporáneas a la misma. Los últimos años de AD se relacionan con la vanguardia y la innovación de la arquitectura y como muestra de ello muchos de sus números orientan lo arquitectónico bien al campo digital o al biológico.

- Schaik, Leon Van. "Pavilions, Pop-Ups and Parasols: Are They Platforms for Change?" AD, Volume 85, Issue 3, abril/mayo, 2015.
- Menges, Achim. "Material Synthesis: Fusing the Physical and the Computational." AD, Volume 85, Issue 5, septiembre/octubre, 2015.
- Verebes, Tom. "Mass-Customised Cities." AD, Volume 85, Issue 6, noviembre/diciembre, 2015.
- Van Schaik, Leon, y Fleur Watson. "Pavilions, Pop-Ups and Parasols:

¹⁶ Estévez, Alberto. T. "Arquitectura Biodigital." *Memorias SIGraDi'2008*. La Habana: Sociedad Iberoamericana de Gráfica Digital, 2008. pp. 484-487.

- The Impact of Real and Virtual Meeting on Physical Space.” AD, Volume 85, Issue 3, mayo/junio, 2015.
- Garcia, Mark. “Future Details of Architecture.” AD, Volume 84, Issue 4, julio/agosto, 2014.
 - Leach, Neil. “Space Architecture: The New Frontier for Design Research.” AD, Volume 84, Issue 6, noviembre/diciembre, 2014.
 - Derix, Christian, y Asmund Izaki. “Empathic Space: The Computation of Human-Centric Architecture.” AD, Volume 84, Issue 5, septiembre/octubre, 2014.
 - De Kestelier, Xavier, y Brady Peters, “Computation Works: The Building of Algorithmic Thought.” AD, Volume 83, Issue 2, marzo/abril, 2013.
 - Menges, Achim. “Material Computation: Higher Integration in Morphogenetic Design.” AD, Volume 82, Issue 2, marzo/abril, 2012.



Buena parte de las referencias documentadas en esta tesis -apoyando el proceso de la misma- serán noticias científicas, artículos de investigación, o proyectos de ensayo arquitectónico. De estas referencias, con el fin de enfatizar el carácter efímero del desarrollo experimental, una cantidad considerable será extraída de la web. Es en los pequeños comentarios en los foros, los tweets durante las conferencias, o en los ‘posts’ de sus blogs donde las personas de interés para la tesis “dejan escapar” algunas de las verdades y curiosidades más interesantes. Estas tienen un valor similar al comentario extraído de una entrevista personal e inédita: muchas de estas informaciones frecuentemente hacen alusiones a trabajos o pensamientos en proceso, sobre proyectos que nunca llegarán a formalizarse, o que serán publicados o expuestos en varios meses o años más tarde. Es frecuente que un autor de un artículo “confiese” sus incertidumbres en su blog, no por desconocimiento, sino por matices subjetivos o porque temas demasiados ajenos al artículo influyen en él, destapando contenido inédito y exclusivo que puede desvelar los entresijos de las cosas. Estos valores de contemporaneidad y actualidad posiblemente dotarán a la tesis de una caducidad más temprana, puesto que sus “avances y descubrimientos” quedarán rápidamente absorbidos por otros de nuevos, desapareciendo en una efímera sucesión de mejoras. A pesar de que el enfoque de la tesis no es histórica o documental, podría tener un valor añadido en un futuro si se pretendiese estudiar las tendencias aportadas durante este periodo (2012-2016) dentro de un marco temporal más amplio.

Para alimentar con un flujo de información (“feed”) coherente con el espíritu de la tesis, se han adoptado metodologías propias de los conceptos que se desarrollan más tarde en la tesis. Por lo tanto, una parte de la tesis no consta de fuentes originales concretas y seleccionadas a priori por el doctorando a través de las referencias bibliográficas previamente mencionadas, sino que se confía la tarea de un primer filtrado a otros agentes. Estos agentes, descritos y enumerados a continuación, realizan una primera selección con lo que se considera relevante. Se confía pues, parcialmente, en la emergencia de la información a considerar en la tesis. El uso de herramientas propias de

la Web 2.0¹⁷ se considera altamente coherente con el contenido y propósito de la tesis, que se aprovecha de esa cadena palpitante de contenidos que permanecen vivos, críticos y constantemente superados por otros nuevos a través de la participación y divulgación en internet, ese ecosistema de democracia informativa. El ‘feed’ dedicado a aquellos ámbitos de la tesis ajenos (complementarios) a la arquitectura genera un total aproximado de 200 posts al día que son tomados en consideración para su descarte o inclusión en la tesis como referencia representativa de actualidad o mención a aspectos geométrico-biológicos.

El ‘feed’ de la lista consta de las siguientes fuentes:

1. Webs de revistas dedicadas a los ámbitos de interés.
2. Universidades y/o congresos.
3. Comunidades relacionadas con el software empleado.
4. Arquitectos afines que generen material práctico o teórico.
5. Otras fuentes que se han considerado oportunas.

La selección de revistas parte del ranking de impacto sobre webs científicas llevado a cabo por la web eBizMBA¹⁸, que se basa en los rankings mundiales y estadounidenses de las siguientes compañías de análisis de tráfico en internet: Alexa, Compete, y Quantcast. La consulta se realizó en Febrero de 2012.

A esa lista inicial se añadieron aquellas webs que aparecían de manera reiterada en otros listados de webs sobre revistas científicas con más impacto (basado en número de visitantes o impacto en las redes sociales, la calidad del contenido, o la manera en la que este contenido se presentaba). También se incorporaron las recomendaciones personales del propio doctorando. Se descartaron aquellas que estaban enfocadas a temas ajenos a la tesis.

Webs de listados:

- http://www.realclearscience.com/lists/top_10_science_sites/bbc_news.html?state=stop
- <http://www.howtogeek.com/120865/the-best-websites-for-expanding-your-scientific-knowledge/>
- <http://unadocenade.com/una-docena-de-webs-de-divulgacion-cientifica-en-espanol-para-todos-los-publicos/>
- <http://www.whatsnew.com/2010/02/08/sitios-web-de-noticias-cientificas/>

Webs de ciencia con mayor impacto:

- American Association for the Advancement of Science (AAAS)
<http://www.aaas.org/>
- Ars technica <http://arstechnica.com/>

¹⁷ Beck, Timo. *Web 2.0 User-generated Content in Online Communities; a Theoretical and Empirical Investigation of Its Determinants*. Hamburgo: Diplomica-Verl., 2007.

¹⁸ Ebizmda. “Top 15 Most Popular Science Websites”. Consultada 14 de enero, 2014. <http://www.ebizmba.com/articles/science-websites>

- BBC http://www.bbc.com/news/science_and_environment/
- Discovery <http://www.discovery.com/>
- HowStuffWorks <http://science.howstuffworks.com/>
- io9 <http://io9.com/>
- Live Science <http://www.livescience.com/>
- NASA <http://www.nasa.gov/>
- National Geographic <http://www.nationalgeographic.com/>
- National Public Radio (NPR) <http://www.npr.org/sections/science/>
- Nature <http://www.nature.com/nature/index.html>
- New Scientist <http://www.newscientist.com/>
- Nueva York Times Science News <http://www.nytimes.com/pages/science/index.html>
- NOVA <http://www.pbs.org/wgbh/nova/>
- Popular Science <http://www.popsci.com/>
- Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS) of the USA <http://www.pnas.org/>
- Public Library of Science (PLOS) <http://www.plos.org/>
- Science Daily <http://www.sciencedaily.com/>
- Science Direct <http://www.sciencedirect.com/>
- Science Magazine <http://www.sciencemag.org/>
- Science News <http://www.sciencenews.org/>
- Science.gov <http://www.science.gov/>
- Sciencestage <http://sciencestage.com/>
- Scientific American <http://www.scientificamerican.com/>
- Smithsonian <http://www.smithsonianmag.com/>
- Time <http://time.com/tag/environment/>
- Tree Hugger <http://www.treehugger.com/science/>
- WIRED <http://www.wired.com/science/>
- World Science EU <http://www.worldscienceeu.com/>
- Xataka Ciencia <http://www.xatakaciencia.com/>

Los conceptos más concretos sobre los cuales se ha profundizado en estas web son: simulaciones digitales de procesos biológicos, avances en el entendimiento del comportamiento de la genética, diferentes miradas al campo de la evolución, y computación inspirada en modelos biológicos.

Se han añadido las siguientes instituciones/asociaciones al ‘feed’ contemporáneo durante el desarrollo de la tesis.

- eCAADe Education and research in Computer Aided Architectural Design in Europe <http://www.ecaade.org/>
- ACADIA Association for Computer-Aided Design in Architecture in North America <http://acadia.org/>
- CAADRIA Computer Aided Architecture Design Research In Asia <http://www.caadria.org/>
- ASCAAD Arab Society for Computer Aided Architectural Design

<http://www.ascaad.org/>

- SIGRADI Sociedad Iberoamericana de Gráfica Digital (SIGRADI)
<http://www.sigradi.org/index.php/ijac>

Otros congresos y/o asociaciones

- ICGG International Conference on Geometry and Graphics <http://geometrie.uibk.ac.at/icgg2014/>
- Smart Geometry <http://smartgeometry.org/>

Otras consideraciones

No se han descartado inputs que pudiesen ser de utilidad para la investigación aunque fuesen ajenos al flujo de información propuesto inicialmente, ya sean noticias en otros medios, conferencias imprevistas o libros descubiertos por azar.

La tesis se asienta sobre noticias, artículos, y publicaciones actuales que tienen lugar durante el desarrollo de la misma tesis, pero ello no implica que no se acuda a una constante referencia sobre personajes y conceptos claves en su origen y en periodos temporales fuera de la tesis, ya sea porque ellos mismos aparecen referenciados dentro de las propias referencias de actualidad, o porque a veces es necesario recuperar las claves generadoras para reconstruir el concepto a desarrollar. Esta aproximación permite tener noción de los elementos más punteros mientras se alimenta paralelamente las ideas primigenias que las constituyen. Con todo, en el bien entendido que la tesis ha de acotarse para evitar su crecimiento hacia lo que supondría un horizonte muy amplio (más aún cuando son tres disciplinas las que aquí se tienen en cuenta), la tesis se centra en reestructurar y reaplicar los conceptos, apropiándose de alguna manera de ese método emergente de proceder, en la que las últimas generaciones no tienen conciencia -parcial en este caso- de las previas y siguen entremezclándose para producir un futuro incierto. Más importante que recoger la herencia es construir el nuevo legado.

Todas estas noticias se han guardado y clasificado mediante álbumes de Pinterest¹⁹ (servicio web para linkar otras páginas a través de sus imágenes). Aun cuando todas las noticias de relevancia serán debidamente referenciadas a lo largo de la tesis siempre queda la opción de acudir a estos álbumes para hacer una lectura diferente (y parcial) de la tesis. Ni todo lo registrado en la tesis aparece en los álbumes, ni todo el contenido de los álbumes aparece en la tesis. Los álbumes asociados a la tesis son los siguientes y se encuentran bajo el dominio <http://es.pinterest.com/386Diego/>

- Bio-logic <http://es.pinterest.com/386Diego/bio-logic/>
- Bio/digital architecture <http://es.pinterest.com/386Diego/bio-digital-architecture/>
- Digital (soft/hardware) <http://es.pinterest.com/386Diego/digital-softhardware/>

¹⁹ Pinterest. Consultada Febrero 28, 2016. <http://es.pinterest.com/>

La herramienta de Pinterest es de gran utilidad para un visionado rápido de grandes cantidades de información de una manera muy visual, siendo su gran virtud referenciar de manera permanente la fuente original. Su presencia en todas las plataformas así como extensiones en navegadores supone otra de sus ventajas.

Asociación y aplicación: experimentos en Grasshopper

Basándose en los contenidos adquiridos y clasificados en la primera fase metodológica se procederá a cruzar conceptos de los distintos ámbitos estableciendo paralelismos entre ellos. Podemos distinguir estos paralelismos en tres categorías:

- Por lo simple del proceso, se da tanto en biología como en computación, es decir, es un proceso universal con fundamentos matemáticos de relativa simplicidad.
- El proceso ha sido utilizado en computación con anterioridad y cuenta con software desarrollado para simular sus resultados.
- Se desconoce la naturaleza del proceso (bien porque es realmente desconocida o porque forma parte de un proceso solamente abordable por la genética) y por lo tanto se construirá uno como modelo digital cuyos resultados sean similares.

En todos los casos se señalarán las lógicas biológicas y se compararán con una de las tres categorías de paralelismo anterior. Los procedimientos se ejecutarán digitalmente para ejemplificar los procesos usando el plug-in Grasshopper y los add-ons necesarios. Estos ejemplos variarán en su nivel de abstracción, entendiendo que una vez dominados por los medios digitales -y por lo tanto geometrizables y fabricables- son aplicables a la arquitectura. Las referencias obtenidas durante el estado de la cuestión también acompañaran en forma de ejemplos teóricos, existentes, o propuestas de su aplicación, para ayudar a la visualización de posibles formalizaciones y su potencial aplicativo.

Se explicarán definiciones que sucesivamente irán ganando complejidad y carácter propositivo a medida que se añaden y combinan factores biológicos, repletos de pequeños y variados ejemplos (evitando caer en la redacción de un manual de instrucciones). Las demostraciones se presentarán mediante la redacción de los procesos y sus resultados, la captura de determinadas partes de la definición, la inserción de la geometría resultante a lo largo del proceso y, con la inclusión de la definición al completo.

A pesar del carácter pragmático de estos experimentos, la intención de esta tesis es mucho más activo, propositivo, y busca un ámbito más manipulador de lo que la naturaleza ha de ofrecer. Manipulador en el bien entendido de

redireccionar y aprovechar en un beneficio mutuo. De una arquitectura que acude a la ficción natural a través de lo digital, pero sin convertirse en mera apariencia y sin dejar de cumplir sus funciones. Hay entre todas las vertientes abordadas en esta tesis, la intención de artificializar y construir una naturaleza deliberadamente industrializada, donde se tomarán sistemas y procesos, y en absoluto se convertirá en un catálogo de la forma biológica. Pretende abstraerse el funcionar natural en la forma arquitectónica²⁰.

Contrastación: AA Londres y ESARQ Barcelona

Durante el último año se han consultado -ya sea de manera presencial o mediante mensajería- a profesores e invitados que han acudido al máster en Arquitectura Biodigital (Universitat Internacional de Catalunya); el equipo del máster en Emergent Technologies durante la estancia del doctorando en la AA (Architectural Association, Londres); y algunos de los miembros del grupo de investigación Genetic Architectures de la ESARQ-UIC School of Architecture, Barcelona).

Igualmente valiosa ha sido el contacto intermitente con otros doctorandos pertenecientes al mismo campo o las opiniones de alumnos y ex-alumnos del máster en Arquitectura Biodigital.

En su mayoría las definiciones han sido divulgadas parcialmente durante las clases en el máster de Arquitectura Biodigital a fin de comprobar resultados y verificar su eficiencia y flexibilidad. Algunas de ellas también han servido para la ejecución de ejercicios rápidos en asignaturas de grado en Arquitectura, donde los alumnos que no poseían conocimiento previo del software paramétrico debían generar proyectos derivados de una definición acabada que se les proporcionaba al comienzo de la clase.

- Informática: sobre el aprendizaje del modelado digital y las leyes que lo rigen, entendiendo que ocurre más allá de la interfaz y cómo afecta a la representación de la geometría. Variedad de software, siendo Rhinoceros la principal (pregrado).
- Representación digital del proyecto arquitectónico: sobre técnicas de diseño gráfico. Estas técnicas, requieren y aprovechan sistemas íntimamente ligados con lo digital y lo paramétrico, su representación gráfica y las capacidades geométricas de la computación (pregrado).
- Composición 1 y 3: prácticas proyectuales digitales. Sesiones individuales donde se asocian estrategias digitales con determinados movimientos artísticos/arquitectónicos. Responsable Dr. Alberto T. Estévez (pregrado).
- Proyectos 1 y 2: clases teóricas sobre estrategias digitales y

²⁰ Brownlee, John "How Apple uses Picasso to teach employees about product design." *Co.Design*. Consultada 27 de agosto, 2014. <http://www.fastcodesign.com/3034240/how-apple-uses-picasso-to-teach-employees-about-product-design>

correcciones para aplicarlas al proyecto. Responsable Dr. Alberto T. Estévez (pregrado).

- ‘Genetic y Biodigital Architectonical Design’ del master de Arquitectura Biodigital: Curso de introducción a Rhinoceros3D y preparación en Grasshopper (postgrado).
- ‘Genetic y Biodigital Architectonical Design’ del master de Arquitectura Biodigital: Tutorías para aplicar y formalizar elementos de carácter biológicos y/o genéticos durante el ‘studio’ del Dr. Alberto T. Estévez.

Estas definiciones han influenciado en mayor o menor medida proyectos arquitectónicos del despacho profesional y grupo de investigación Genetic Architectures²¹, así como en otras aplicaciones de diseño infográfico²². Los proyectos se describen y añaden en el apartado sobre aplicación de algoritmos genéticos.

Por último han sido presentados resultados de los experimentos de la tesis en las siguientes conferencias y congresos durante el proceso de desarrollo de la misma:

- “Adaptación evolutiva de tejidos urbanos a través de análisis computacional.” TRP 21 #3 Urbanismo. La Ciudad del futuro. Universidad de Buenos Aires, abril de 2016. <http://www.trp21.com.ar/trp3/dnavarro.html>
- “Adaptación evolutiva de tejidos urbanos.” Jornada Internacional de Nuevas Tecnologías e Innovación: De lo biológico y digital en la arquitectura. ESARQ, Universitat Internacional de Catalunya, Barcelona, septiembre de 2016.
- “The evolutionary adaptation of urban tissues through computational analysis.” 33rd ECAADE Conference. Technische Universität Wien, Viena, septiembre de 2015.
- “Evolutionary Algorithms.” 2nd International Conference Biodigital Architecture and Genetics. ESARQ, Universitat Internacional de Catalunya, Barcelona, junio de 2014.

²¹ Genetic Architectures. Consultada 11 de junio, 2014. <http://geneticarchitectures.weebly.com/>

²² 386. “Design.” Consultada 10 de mayo, 2014. <http://www.386.es/design.html>



2. CONTEXTO BIO-DIGITAL:

El primero de los dos apartados principales que componen el estado de la cuestión (primero, el contexto bio-digital -cap. 2-, y segundo, los procesos de emergencia -cap.3-) se centra en establecer la situación y relación entre los tres campos que intervienen en la tesis: naturaleza, arquitectura y computación.

Frente al carácter técnico y específico de la segunda parte, el “contexto bio-digital” asienta las bases de las deducciones posteriores y establece las posiciones relativas de los campos antes de su transformación en el apartado de experimentación. En su mayor parte, el hilo deductivo de este primer apartado del estado de la cuestión se centra en la conceptualización de la naturaleza, ya sea en relación para con la arquitectura como su entendimiento cultural. Desde las aproximaciones más figurativas hasta la comprensión de una naturaleza propia, desatada por el hombre y que escapa de los entendimientos más tradicionales de lo biológico. Una vez expuesto el planteamiento de una naturaleza humana con todas sus repercusiones, se profundiza en las herramientas que han dado lugar a nuevas naturalezas y son, por si mismas, naturaleza propia.

Entre ecosistemas artificiales y objetos de diseño evolucionados, se destaca el papel de lo computacional y lo algorítmico, así como la especificación de software determinante para el desarrollo de futuros modelos de diseño que incorporen estos valores (p.e. la arquitectura paramétrica). A medida que la tecnología de la información ha adquirido un lenguaje más rico y mayor complejidad, se ha corroborado su sorprendente similitud con el comportamiento más natural -más vivo, más autónomo-. Por eso no ha de sorprender que este apartado cierra el círculo de lo natural aplicando las tecnologías más punteras a los ámbitos de la biología más vanguardistas (‘biolearning’ y biología sintética).

Nature is the destiny of computation²³. SANFORD KWINTER

²³ Koolhaas, Rem, Stefano Boeri, Sanford Kwinter, Nadia Tazi, y Hans Ulrich Obrist. *Mutations: Rem Koolhaas, Harvard Project on the City, Stefano Boeri, Multiplicity, Sanford Kwinter, Nadia Tazi, Hans Ulrich Obrist*. Barcelona: ACTAR, 2000. p. 57.

2.1. Naturaleza y su papel en la arquitectura

Es menester mencionar algunos puntos clave de la historia de la arquitectura donde naturaleza y arquitectura han compartido propósitos, y si bien el objetivo de esta tesis no es hacer un análisis histórico sí que se repasarán algunos de esos encuentros para tener una noción básica y, más importante aún, valorar qué tipos de relaciones han habido previamente y como se ha influenciado a la arquitectura desde lo natural previamente al desarrollo de esta tesis. Obviamente muchos aspectos que difuminan o contradicen aspectos del análisis han sido omitidos pero no descartados o ignorados. Una segunda parte también considerará el papel actual de la naturaleza para la sociedad contemporánea, poniendo en perspectiva los límites de la misma y su propia definición.

2.1.1. Naturaleza como arquitectura durante lo pre-digital

Arquitectura primigenia: cuevas y casas-árbol

Para empezar, figurativamente desde el principio, se reconoce el valor conceptual del jardín del edén como idea y referencia perfecta a un entorno que no requiere de arquitectura -la naturaleza es arquitectura y todo es naturaleza-, y que repercute constantemente en los ideales posteriores de cualquier aspiración para crear el espacio último de confort, ya sea en nuestros propios jardines, casas de cuento, o utopías urbanas. A pesar de ello, el discurso de esta tesis se inicia con naturalezas salvajes e indómitas, alejadas de la espontaneidad idílica del jardín, y que reverberan posteriormente en el carácter de la obra gaudiniana o la arquitectura autónoma de Karl S. Chu.

In history, architecture evolved from two different type of spaces: the cave and the nest²⁴. CHRIST PRECHT

La caverna es esa arquitectura natural que no requiere de arquitecto, sólo de habitantes que la ocupen. Al contrario que otras, es una tipología tangible y real que se conoce útil y extendida por miles de años a lo largo y ancho de todo el planeta. A posteriori, en un intento de arquitecturizar el espacio encontramos los ejemplos más significativos (de entre las miles existentes) de

²⁴ Dezeen. "Leading architects are turning the focus back on bamboo." Consultada 30 de mayo, 2015. <http://www.dezeen.com/2014/07/18/penda-chris-precht-interview-bamboo-architecture/>

cuevas habitadas o urbanizadas en: las ciudades subterráneas de la Capadocia -hasta 36 ciudades-, excavadas²⁵ por ejércitos en el s. VII; las casas-cueva cerca del monte de Sahand en Irán, s. XIV; los pueblos trogloditas en Pays de la Loire, Francia; o las casas trogloditas de Guadix, Granada, que fueron rehabilitadas tras la reconquista. La cueva como elemento será revalorizado -aunque no arquitectónicamente- durante el Romanticismo y especialmente a finales del s. XIX²⁶, movimiento que también influenciará a Gaudí como se verá más adelante. En un tiempo más reciente, pueden resaltarse extraños casos como los Forestine Underground Gardes, en California 1906, por Baldasare Forestiere²⁷; o las catedrales esculpidas en el interior de catorce cuevas en el desierto de Nuevo México, por Ra Paulette²⁸.

En paralelo a la cueva, pocas tipologías arquitectónicas parecen mantener el atractivo del que goza la cabaña primitiva, el “nido” que mencionaba Christ Precht, esa casa-árbol propia de los cuentos, una de las viviendas teóricas por antonomasia²⁹. La línea comienza con el único tratado arquitectónico que ha sobrevivido del mundo antiguo: Los Diez Libros de Arquitectura³⁰. En él ya se menciona el uso de ramas y troncos flexibles reforzados con adobe para la construcción de muros, basados en sus viajes a Crimea, Turquía y cerca de Marsella. También encontramos rastro del “edificio primitivo” en el teórico francés Eugène Emmanuel Viollet le Duc³¹, dónde una serie de árboles dispuestos en círculo se unen en el centro formando una cúpula acabada en punta; o el grabado de Antoine Laugier sobre la “cabaña primitiva”³². Es característico de estas tres referencias que los elementos naturales aparecen como tales, con brotes y hojas, incluso arraigados al suelo en alguno de ellos, y en ningún caso se presentan como madera preparada y tratada para su uso constructivo. Este tipo de prácticas de carácter tan primitivo aún pueden encontrarse en algunos pueblos étnicos contemporáneos y, por supuesto, en las mejores arquitecturas del s. XX.

Es oportuno abordar en este párrafo la postura sobre el debate entre la madera y la vegetación: no se considera que el uso de materiales de procedencia biológica, pero que han dejado de estar vivos, deban considerarse en absoluto bio-arquitectura. En ese sentido, una cabaña de madera no es más “natural” que una de plástico siendo ambos elementos de origen orgánico, y el estado de

²⁵ El término excavar hace referencia a ampliar o perfilar cuevas ya existentes debido a procesos naturales.

²⁶ Consúltese: Lucante, Angel. *Essai géographique sur les cavernes de France et l'étranger*. s. l.: Germain et G. Grassin, 1822.

²⁷ Consúltese: Daubrée. *Les eaux souterraines à l'époque actuelle et aux époques anciennes*. s. l.: Veuve Ch. Dunod, 1887.

²⁸ Karoff, Jeffrey. *Cave Digger*. Karoff Films, 2013. Película.

²⁹ Consúltese: Fletcher, Banister, y John Musgrove. *Sir Banister Fletcher's A History of Architecture*. Londres: Butterworths, 1987.

³⁰ Polión, Vitruvio. *Vitruvio: Los Diez Libros De Arquitectura*. Madrid: Alianza Editorial, 1995. (original en Siglo I a.C.).

³¹ Viollet-le-Duc, Eugène-Emmanuel, y M. F. Hearn. *The Architectural Theory of Viollet-le-Duc: Readings and Commentary*. Cambridge, MA: MIT Press, 1990. pp. 25, 26.

³² Laugier, Marc-Antoine, Lilia Maure Rubio, Maysi Veuthey Martínez, y Lilia Maure Rubio. *Ensayo Sobre La Arquitectura*. Tres Cantos, Madrid, España: Akal Ediciones, 1999. p.10.

las células fallecido. No por ello se menosprecian las cualidades y diferencias entre estos dos materiales puestos como ejemplo, y se valora la tendencia generalizada hacia el uso de materiales “menos tratados e industrializados, renovables”.

La cueva y la casa-árbol definen los orígenes de la naturaleza habitable. Sus ideales están presentes en cualquier persona -arquitecto- y los sucesivos años demostrarán un afán, a veces casi marchito, por recuperar su protagonismo. Sus tipologías formulan los pilares de la “arquitectura natural” o la “arquitectura naturalizada”: que habita y se extiende en el espacio, arraigada a un contexto que forma parte de la propia arquitectura. La tesis pondrá especial interés en el aspecto autónomo de los procesos naturales “armonizados en sus propias leyes” que persigue su “independiente evolución” gracias al “principio generador del desarrollo armónico”³³. Por ende, la geometría y arquitectura resultante de esta tesis ha de compartir las mismas propiedades con la naturaleza y ser considerada (cuasi) como tal.

Comúnmente en los ejemplos contenidos de esta tesis -más concretamente en la primera parte del estado de la cuestión- el término naturaleza suele asociarse al reino de los vivos (plantae, animalia, bacteria, archaea, protista, fungi³⁴), haciendo especial hincapié en el de los vegetales. Aun así, se puede observar un repiqueteo constante que alude a las propuestas más cavernosas y que a la larga derivan a fenómenos como las estructuras de cristalización mineral, el comportamiento de fluidos, desgastes aerodinámicos o erosivos... fenómenos que también son considerados naturales -y universales- en oposición a lo artificial. Sin embargo, asignar y definir fronteras entre lo natural, lo vivo, lo biológico, lo físico, es sin duda una ardua tarea que se presta a la confusión y la ambigüedad. Lejos de definir y delimitar se propone estar abierto y suspicaz ante los términos. Se verá durante el capítulo relativo a la ‘Next-Nature’, que los papeles de lo natural, lo vivo, lo artificial, lo espontáneo o lo diseñado, se intercambian constantemente en lo contemporáneo, reduciendo a lo imposible las etiquetas simplistas.

Emancipación: naturaleza y cultura

Con la aparición de la artesanía, disciplina que derivará en la modificación del entorno natural en todas sus vertientes, la construcción se plantea la naturaleza como un elemento deformable que adaptar a unas necesidades que no cesan de crecer, siendo nuestro contexto original incapaz de resolverlas: seguridad en relación a protección de predadores, fenómenos climáticos -que derivarán posteriormente en comodidad-, y otras funciones culturales o

³³ Primera acepción de la palabra “Naturaleza” en la Real Academia Española. <http://lema.rae.es/drae/?val=naturaleza>

³⁴ La división más aceptada desde 1990, renombrada por Woese. Balch, William E., Linda J. Magrum, George E. Fox, Ralph S. Wolfe, y Carl R. Woese. “An Ancient Divergence among the Bacteria.” *Journal of Molecular Evolution* 9, no. 4. Diciembre, 1977.

metafísicas. Llegado el momento, esa naturaleza deformada, es abstraída en forma de arquitectura, abandonando y desligándose del entorno inmediato. El exterior debe ser aislado del interior. Comodidad y seguridad se convierten en los principios del espacio humano, que ha trascendido la adaptabilidad al contexto por la construcción del mismo. La arquitectura acoge materiales inertes que permiten ser moldeados a voluntad y ordenados para alcanzar dimensiones inalcanzables hasta la fecha. La artesanía -la fabricación- hace libre al hombre pero al mismo tiempo lo libera de la naturaleza. Ello lleva a una larga sucesión material basada en la piedra, la madera, el barro; y posteriormente el ladrillo, el acero, el hormigón... La naturaleza quedará en muchos casos relegada a un elemento meramente decorativo.

Por supuesto, siempre se mantendrá el uso de ciertos materiales propios de la cultura vernácula, que mantienen una relación más cordial con el medio ambiente y lo local como pueden ser cubiertas inclinadas de paja, cubiertas planas vegetales, estructuras de bambú, casas enterradas, muros de adobe, etc. Pero el uso de ellos con frecuencia está arraigado a una falta de recursos y por lo tanto es más una necesidad que una voluntad propositiva. No obstante, la idea de la casa árbol -efímera ella- siempre queda a lo largo de la historia, pequeña y casual pero constante. Existen datos de pasarelas de observación en Japón, lujosas plataformas en Persia y en el periodo de la Roma clásica y, como una afición más popularizada, en la Inglaterra Victoriana³⁵. Esta tipología primera del refugio ejemplifica en sus orígenes el momento en el que la arquitectura no puede luchar contra lo salvaje, lo virgen, y ha de adaptarse a un ambiente hostil para camuflarse en él y para cubrir los mínimos de supervivencia. La casa en el árbol continuará su incesante goteo hasta nuestros tiempos, llegando a desarrollar incluso propuestas industrializadas de la misma³⁶.

Al margen de la caverna y la casa-árbol como primeros hábitat del ser humano, interpretaremos a continuación el papel de la naturaleza en la arquitectura, con el prisma de lo "natural" valga la redundancia, como aquello que existe o se desarrolla sin la intervención humana, sin el proceso artesanal o industrial del hombre. La frecuente presencia de elementos naturales en los ornamentos arquitectónicos y/o mobiliario deja intuir una cierta nostalgia presente en casi todas las culturas a lo largo de los años. Ya en las columnas de la cultura egipcia se distingue la flor del papiro. Esta presencia usualmente se asocia al propósito de acondicionar y tornar amable un método constructivo frío, ausente de vida.

El origen del Romanticismo a finales del siglo XVIII traerá consigo el retorno de la naturaleza con un papel protagonista. En contraste con la serena y constructiva naturaleza neoclásica definida y dominada por los dioses, al paisaje romántico se le dota de voluntad propia, una naturaleza salvaje,

³⁵ Bahamón, Alejandro, y Felisa Minguet. *Casas En Los Árboles Casas / Em Árvores*. Sant Adrià De Besòs: Instituto Monsa De Ediciones, 2005. pp. 6-9.

³⁶ Asensio, Paco. *Arquitectura Alternativa: Móvil, Ligera, Desmontable, Modular, Adaptable*. Madrid: H Kliczkowski, 2002. p. 104-108.
Proyecto: Softroom Architects, "treehouse", 1998. Desarrollada para la revista Wallpaper.

misteriosa, imponente, simbólica³⁷.

*I love not Man the less, but Nature more, From these our interviews,
in which I steal, From all I may be, or have been before, To mingle
with the Universe, and feel, What I can ne'er express, yet cannot all
conceal*³⁸. LORD BYRON

A pesar de lo histórico y lejano que resulta este recorrido en el papel de la naturaleza las palabras del poeta inglés Gordon Byron inspiran a crear una arquitectura lo suficientemente potente para contaminar al usuario de la misma forma que la presencia de la naturaleza lo hace. Una arquitectura que refleje la situación del entorno al igual que el paisaje reflejaba los sentimientos en el romanticismo, una arquitectura que tenga suficiente identidad para ser un personaje más a considerar.

El siglo XIX trae consigo la exploración de la tierra y de la naturaleza. Gracias a los diversos inventos que giran en torno a la tecnología del vapor y al colonialismo, los europeos de aquella época recorren el mundo explorando nuevas tierras, maravillándose ante la naturaleza, y colonizando países asiáticos y africanos que conservan sus antiguas civilizaciones. Todos esos descubrimientos y movimientos interculturales se verán expuestos con gran acierto en las sucesivas exposiciones universales, comenzando por el mítico Crystal Palace en la Exposición Universal de Londres en 1851. En aquel resumen histórico de las Exposiciones pueden destacarse:

- El progresismo industrial (construcción en hierro sometida a la disciplina de cálculo).
- El colonialismo (formas exóticas).
- El historicismo (formas históricas y románticas).
- El naturalismo (formas naturales).

Todas ellas formarán los componentes arquitectónicos de la época ecléctica. Pero el naturalismo sólo se manifestará en los detalles y en la ornamentación, hasta aparecer últimamente ligado al Art Nouveau. Esta tardanza se debe a que las formas naturales son menos familiares como componentes o elementos arquitectónicos, mientras que el resto de las formas derivan o sirven a la arquitectura³⁹. Se omite en este capítulo la mención de Gaudí que sí que logrará ejecutar la geometría de la naturaleza como verdadera generadora de espacio, y que por su importancia se le dedica especial atención más adelante.

Estos sucesos (y todos los venideros) se ven marcados por las transformaciones socio económicas de la segunda revolución industrial que marcará la llegada del acero, el vidrio y, finalmente, el hormigón. La llegada de estos materiales junto al Fordismo -o producción en serie-, algo más tardío, determinarán las ideologías arquitectónicas hasta nuestros días. Se “resistirán” a la pureza

³⁷ Friedrich, Caspar. *Viajero frente al mar de niebla*. 1818. Pintura.

³⁸ MacCarthy, Fiona. *Byron: Life and Legend*. Londres: John Murray, 2014. p. 139.
Poema: *Childe Harold's Pilgrimage*.

³⁹ Torii, Tokutoshi, y Antoni Gaudí. *El Mundo Enigmático De Gaudí: Cómo Creó Gaudí Su Arquitectura*. Madrid: Inst. De España, 1983. p. 197.

de dichas ideologías: Modernismo, Art Nouveau –en Bélgica y Francia–, Jugendstil –en Alemania y países nórdicos–, Sezession –en Austria–, Modern Style –en los países anglosajones–, Nieuwe Kunst –en Países Bajos– y Liberty o Floreale –en Italia–. Estos movimientos cercanos (o cuasi sinónimos) traerán la inspiración por la geometría de la naturaleza, frecuentemente aplicadas a través del hierro y el cristal, desde el objeto más pequeño hasta el rascacielos más alto. Importante destacar las propuestas de John Ruskin y William Morris⁴⁰, que pretendían la democratización del diseño, posible ahora si gracias a las técnicas de producción masiva y su influencia en el movimiento ‘Arts & Crafts’⁴¹. Todos estos factores darán el pistoletazo de salida para una arquitectura moderna, amante de la técnica y de lo industrial, fascinada con un futuro puro (o mecanicista), más abstracta que nunca⁴². Una arquitectura que elimina los motivos naturales restantes pero que, cabe decir, vuelve a dar especial atención al jardín en determinadas situaciones. Entre ellas la terraza-jardín, el segundo punto de Le Corbusier que promulga las cubiertas planas ajardinadas y con desagües en el interior⁴³. La otra, la ciudad moderna, o ciudad jardín de Ebenezer Howard⁴⁴.

Retorno a la naturaleza: el jardín y el espejo

En el presente capítulo se destacan algunas de las estrategias y pensamientos de arquitectos que valoraban especialmente la naturaleza y su diálogo con la arquitectura. Se obvian en esta tesis otros aspectos de la relación arquitectura-naturaleza que abarcan situaciones con otro carácter. Entre ellas el ‘land-arch’, la proyección del paisaje y los parques, así como cualquier intervención efímera o de mínimo impacto en entornos plenamente naturales con vocación de reserva natural. Aunque se anima a la modificación del paisaje en su aspecto más amplio, cuya aportación fundamental de muchas de esas acciones sería precisamente la utilización pragmática de la imagen del paisaje no de manera dilatante, sino instrumental, positiva, susceptible a favor de construir una nueva naturaleza de las cosas, basada en la experimentación de la forma, la confianza en nuevas fórmulas alternativas e imaginativas, propositiva como se promueve de manera reiterada en este documento.

En la vertiente más discreta del land-arch y la relación de la arquitectura

⁴⁰ Harvey, Charles, y Jon Press. *William Morris: Design and Enterprise in Victorian Britain*. Manchester: Manchester University Press, 1991.

⁴¹ En capítulos posteriores se verá la evolución de esta técnica en una “customización en masa”, donde el diseño pertenece a todos al mismo tiempo que se incorporan las necesidades/gustos particulares de cada individuo.

⁴² Consúltese: Loos, Adolf. *Ornamento Y Delito: Y Otros Escritos*. Barcelona: Editorial Gustavo Gili, 1972.

⁴³ Consúltese: Corbusier, Le, y Willy Boesiger. *Le Corbusier*. Nueva York: Praeger, 1972.

⁴⁴ Aymonino, Carlo, Ebenezer Howard, Tony Garnier, Ludwig Hilberseimer, y N.A Miliutin. *Orígenes Y Desarrollo De La Ciudad Moderna*. Barcelona: Gustavo Gili, 1972.

con el paisaje encontramos algunos de los ejemplos de casas enterradas, o cubiertas verdes más relevantes (reminiscencias de la tipología primitiva de la cueva, claro). Las casas enterradas de Skara Brae, asentamiento neolítico (Escocia, 3000 a.C.) o las casas protegidas por tierra: Turf Houses (Islandia, s. XV.) son referencias históricas.

- El centro de comunicación de Gustav Peichl, Aflenz, 1979.
- Los laboratorios de investigación de Schlumberger de Emilio Ambasz, Austin, 1983.
- Nine Houses, Peter Vetsch, Suiza, 1993⁴⁵.

Como se había mencionado previamente, no se valorarán sistemas constructivos que hagan uso de material orgánico “fallecido”, aunque se agradece la tendencia positiva generalizada hacia el uso de materiales “menos tratados e industrializados”. Especialmente el reciente auge de la construcción mediante bambú:

- Penda, “Modular bamboo hotel”, 2014.
- Vo Trong Nghia Architects, “Kontum Indochine Wedding Restaurant”, 2013.
- Kengo Kuma, “Nanchang bamboo installation”, 2013.
- Simón Vélez⁴⁶, “Pabellón Zeri”, 2000.

*When we see a building made of bamboo, we think about the natural environment. [...] That creates a certain campfire romanticism of being off the grid for a while*⁴⁷. PRECHT

Si el lector se interroga en busca de una imagen que aúne árboles y arquitectura, probablemente un la primera sea el pabellón de Sverre Fehn, el cual representó a los países nórdicos en la Bienal de Venecia de 1958. El pabellón no sólo marca el respeto por el lugar, sino que toda su arquitectura se idea para albergar un pequeño grupo de árboles. En 1958 también, Hundertwasser manifiesta un claro posicionamiento frente al racionalismo y la ciudad muerta, que encierra lo vivo en parques vallados: “dejar entrar la vida en la arquitectura”⁴⁸.

José María Buendía, que antepone la experiencia sensorial por encima de lo conceptual, la narración de una historia fantástica y no la demostración de una idea genial, el laberinto frente a la caja de cristal, estaba totalmente en contra de la caja miesiana o el argumento de Le Corbusier, divorciados de su entorno. Casa y jardín son para él inseparables. Debe ser la arquitectura la expresión humana del dominio sobre la naturaleza, donde esté, la condiciona

⁴⁵ Consúltase: Vetsch, Peter, Erhard Wagner, y Christoph Schubert-Weller. *Erd-Und Höhlenhäuser Von Peter Vetsch = Earth and Cave Architecture*, Peter Vetsch. Sulgen: Niggli Verlag, 1994.

⁴⁶ Simón Vélez hace uso de la ‘guadua’, una especie de crecimiento rápido que se encuentra en la India.

⁴⁷ Fairs, Marcus. “Leading Architects are turning the focus back on bamboo.” *Dezeen*. Consultada 8 de julio, 2014. Entrevista a Chris Precht. <http://www.dezeen.com/2014/07/18/penda-chris-precht-interview-bamboo-architecture/>

⁴⁸ Hundertwasser, Friedensreich. manifiesto *Verschimmelungs-Manifest*. Abadía de Seckau, 4 de julio de 1958. En 1972 publicó otro manifiesto *Your window right — your tree duty*: en el que sugería que plantar árboles en entornos urbanos debía ser obligatorio.

a sus necesidades y conveniencias o, la calidad de un objeto arquitectónico dependerá también de la respuesta que ofrezca a la realidad ambiental del lugar donde emplaza. Alvar Aalto explica que la arquitectura debe ofrecer en todo momento los medios para posibilitar una relación orgánica entre edificio y naturaleza⁴⁹. Alberto Kalach, que una casa entre arbustos, frondes y pastizales, enredaderas, musgos, árboles y malezas se acercan al paraíso y una arquitectura que se cierne en ellas no es apta para timorato⁵⁰.

Ricardo Devesa da buena cuenta de la especial relación que une el árbol y el espacio doméstico⁵¹, de cómo el árbol en el tiempo crece y cambia el espacio al que pertenece, de cómo da una escala “natural”, de cómo su preexistencia ayuda a integrar el proyecto en el paisaje si es aceptado con sensibilidad. Es un tesis destaca más de 150 proyectos que durante el siglo XX habían tenido en cuenta los árboles existentes e incorporarlos como protagonistas en la vivienda unifamiliar. Son muchos de ellos, obras clásicas de la arquitectura que no requieren presentación. Remarca en su discurso a Bernard Rudofsky, de arquitectura sin arquitectos, y la intencionalidad de su arquitectura respecto a las posiciones y tamaños de los árboles; a José Antonio Coderch y Josep Valls, en la Casa Ugalde, que establecen las visuales y triangulan el proyecto a partir de la posición original de los mismos; y a Eduardo Arroyo y la Casa Levene, totalmente deconstruida ante la existencia de una arboleda.

La Case Study House No.8, de Charles y Ray Eames, casa que sitúa detrás de una fila de árboles para que estos proyecten patrones en los diferentes materiales de la fachada -hasta el punto de que uno de los paneles es la fotografía de los árboles que se le anteponen-; la casa Gilardi de Luis Barragán, cuyo árbol jacaranda parece motivar los colores y las ventilaciones de la casa; la casa Farnsworth de Mies, un aparente caja de vidrio -un invernadero-, dispuesta tras un enorme árbol al borde del río que propicie sombra y confort térmico a la vivienda; la casa Ferret en Nueva Zelanda de LACATON & VASSAL, se subordina al pinar del lugar y admite su llegada al contexto en último lugar, dejando penetrar los árboles en su interior; también la casa de Saenz de Oiza en Mallorca permite los árboles en su interior, otorgándoles la misma importancia que a las columnas. Todas ellas casas “modernas” que parecen al menos respetar y acompañar a la naturaleza.

La forma es también algo que aparece por sí misma, y no una escultura que deba moldearse. ANNE LACATON Y JEAN VASSAL

En algunos casos, la mezcla entre jardín y arquitectura se entretejen buscando los límites del diálogo. Entender el jardín como un elemento de simbiosis con el edificio, un espacio que habita el espacio, repercutiendo con su vida y sus alteraciones. La japonesa es sin duda una de las culturas que ha mantenido una relación más íntima y cercana con el jardín, y como tal se ha experimentado en profundidad sobre esta concepción de simbiosis,

⁴⁹ Nikula, Riitta. *Construir Con El Paisaje: Breve Historia De La Arquitectura Finlandesa*. Helsinki: Otava, 1996. p. 9.

⁵⁰ Adrià, Miquel, y Alberto Kalach. *Alberto Kalach*. Naucalpan, México: Gustavo Gili, 2004. p.4.

⁵¹ Consúltese: Devesa, Ricardo. *La casa y el árbol*. Barcelona: ETSAB, 2012.

invitando a la reflexión sobre cuán lejos puede llevarse esta convivencia. En la arquitectura contemporánea podemos encontrar algunos ejemplos donde el jardín se convierte en la génesis de la idea y la arquitectura crece a su alrededor y servicio: la ampliación de un palacete por Cristian Pottgeisser; la casa miniatura, de Denso Sugiura; o la Casa Nagakura, por el mismo Suizo Nagakura. Destaca en estos ejemplos la permisividad con la que se permite a la vegetación habitar el interior del proyecto -siendo, ahora sí, la planta un habitante más de la vivienda-. Pavimentos y forjados dejan paso a firmes más orgánicos y huecos que permiten el paso de las plantas entre alturas. De estos ejemplos, la casa Nagakura es el caso más extremo, convirtiendo el comedor en un lugar sorprendente y vivo, cuyo suelo de tierra es bañado ocasionalmente con abono de restos de tazas de té verde, y donde los helechos trepan sobre las patas del mobiliario allí presente. El diseño del jardín ha absorbido los ingredientes, del arte del edificio⁵².

002. /// Suiko Nagakura, *Casa Nagakura*, año desconocido. Foto de Michael Freeman. Las plantas invaden la estancia y el mobiliario.

Es interesante sembrar la duda sobre si un espacio natural ha sido arquitectonizado de manera parcial e incompleta, o si la naturaleza en un “arrebato vengativo” ha recuperado el territorio que originalmente le pertenecía, absorbiendo la arquitectura mientras se adapta y parasita el espacio.



Desde un prisma opuesto, se encuentran proyectos cuyos acabados espejados reflejan el contexto. ¿Puede considerarse la Fábrica Aplex de Dominique Perrault (2000)⁵³ un proyecto de arquitectura en simbiosis con la naturaleza? ¿Y la sucursal del Cielo, de Solano Benitez (2000)? o más recientemente: el Pabellón para un artista de DHL (2008), el Serpentine Gallery de SANNAA (2009), el Tree Hotel de Tham & Videgård Arkitekter (2010)... incluso el Vieux Port Pavilion de Foster + Partners (2013), y el mismísimo Mercat dels Encants de b720 (2014). No hacen sino reflejar la vida, aunque sea urbana y dura. ¿Por qué proliferan en la actualidad este tipo obras anónimas donde la arquitectura no quiere ser arquitectura para convertirse en su propio contexto?



⁵² François, Édouard, y Duncan Lewis. *Construire Avec La Nature: Vingt Projets D'architecture Dans Le Paysage = Building with the Nature*. Aix-en-Provence: Edisud, 1999. p. 5.

⁵³ Fábrica APLIX: «World Architecture Award», 1º Premio a la mejor construcción industrial, 2001.

003. /// Dominique Perrault, *Fábrica Aplix*, 2000. Foto de la web del autor. La fachada refleja el contexto “desapareciendo” en su entorno.



Sin duda, el intelecto y lo conceptual es lo que hacen del proyectar arquitectónico ese agradable rompecabezas. Con el reflejo de la naturaleza, la arquitectura se torna más que nunca esa “caja de luz” de la que hablaba Le Corbusier, la arquitectura retorna por completo el espectro en un truco casi mágico, desapareciendo, dejando sólo aquello que ya existía. Conceptualmente, pero de manera pasiva, puede que el espejo sea una de las respuestas más contundentes que la arquitectura puede dar en el nivel de apariencia externa e impacto en el paisaje.

Naturaleza como elemento verdaderamente arquitectónico

Pero la historia natural estudia lo efímero y accidental; no las cosas eternas o universales; sus causas y efectos despiertan nuestra curiosidad y se convierten en el objetivo definitivo de nuestra contemplación⁵⁴. D'ARCY THOMPSON

Si la arquitectura ha sido concebida como la disciplina que ha permitido sobreponerse al medio natural a través de la construcción y el planeamiento urbano, ahora está asumiendo un papel más relevante y activo en la formulación de los problemas regionales y ecológicos que afronta la sociedad: los problemas relacionados con el lugar, con el tiempo y con el proceso, convirtiéndose en una forma híbrida inventada a partir de un papel adoptado y un diálogo establecido⁵⁵.

La naturaleza es un método para crear nuevos paisajes donde vivir. En consecuencia, los arquitectos intentan definir, adoptando la misma actitud, un método que sea capaz de reaccionar y de integrar la vida del hombre y los espacios que le protegen, entendiendo como una superficie activa aquella que estructura las condiciones para nuevas relaciones y nuevas interacciones entre las personas, los edificios y la naturaleza que los soporta⁵⁶. Con las estaciones, los colores y los aromas, se abren decenas de alternativas; cada proyecto puede convertirse en un microecosistema donde arquitectura y naturaleza se

⁵⁴ Thompson, D'Arcy Wentworth, y Ibeas Delgado Juan Manuel. *Sobre El Crecimiento Y La Forma*. Madrid: Hermann Blume, 1980. p. 3.

⁵⁵ Whinston, Anne. *Architecture in the landscape: toward an unfield vision*. No. 80, 1990. p.145.

⁵⁶ Sottsass, Ettore. *Domus*, nº 874. Italia: Octubre del 2004. p.85.

retroalimentan, performando como la botella de David Latimer⁵⁷.

Ejemplos en los que la vegetación participa activamente en la arquitectura hay pocos pero valiosos: la naturaleza se toma para dar carácter e identidad al pabellón Holandés, hecho por MVRDV (Winy Maas) para la Expo 2000, en el que el uso de la flora, el paisaje y el simbolismo del viento en sus molinos nos muestran la clara intención de representar un paisaje de Holanda dentro del edificio.

Como recubrimiento, las obras artísticas que suponen las fachadas verdes del arquitecto Patrick Blanc, presentes en numerosos proyectos a lo largo de todo el mundo: El 'Musée du Quai Branly in Paris', con Jean Nouvel (2005), el Caixa Forum de Madrid junto a H&M (2007), y los sucesivos proyectos hasta la fecha de publicación que no se recogen en esta tesis⁵⁸. Y llevando la idea a extremos, los proyectos artísticos de Heather Ackroyd y Dan Harvey, que superan la rigidez del plano vertical de las fachadas verdes para convertir por completo cada recoveco del espacio y su geometría en un motivo verde, en una bandera de césped.

El tipo de naturaleza que estamos en condiciones de producir en los próximos años tendrá potentes efectos sobre formas sociales emergentes e incluso nuevas. Como produzcamos la naturaleza aquí y ahora constituye un fundamento crucial de cualquier utopismo dialéctico. Y como elaboremos el problema discursivamente también resulta crucial ya que es un elemento constituyente del momento imaginativo mediante el cual se pueden elaborar visiones alternativas⁵⁹. DAND HARVEY

Atelier Kempe Thill logra con su pabellón holandés, Hedge Building (2008), utilizar de manera significativa la vegetación, en esta ocasión una enredadera, como elemento arquitectónico e industrial: mediante placas de 1,2 por 1,8 de metros el montaje del umbráculo aparece instantáneamente cuando lo normal sería que tardara años, convirtiendo el despiece en una celosía bio-prefabricada. A su vez, la estructura de acero sirve para contener la tierra que alimenta a la hiedra que es regada por un sistema de tuberías controladas por ordenador.

El compromiso de la arquitectura es dar una respuesta a un tiempo, y que optimice al máximo los contextos culturales, técnicos, económicos y sociales⁶⁰. DUNCAN LEWIS

⁵⁷ David Latimer, es un jardinero que ha logrado (por el momento 53 años) aislar un pequeño ecosistema dentro de una botella donde la planta se autoregula con la luz como única necesidad del exterior.

Neoteo. "Un jardín de 53 años dentro de una botella." ABC. Consultada 30 de abril, 2013. <http://www.abc.es/ciencia/20130415/abci-jardin-anos-dentro-botella-201304151009.html>

⁵⁸ Vertical Garden Patrick Blanc. Consultada 6 de abril, 2015. <http://www.verticalgardenpatrickblanc.com/>

⁵⁹ Ackroyd & Harvey. Consultada 10 de febrero, 2015. www.ackroydandharvey.com

⁶⁰ François, Édouard, y Duncan Lewis. *Construire Avec La Nature: Vingt Projets D'architecture Dans Le Paysage = Building with the Nature*. Aix-en-Provence: Edisud, 1999. p.79

En la introducción radical de elementos vivos, son Duncan Lewis y Adrian Geuze algunos de los personajes más notables. El primero por su idea de compañerismo entre naturaleza y arquitectura presentadas en sus proyectos, va más allá del alcance de las ideologías reductoras del paisaje, llevando a la par ambos campos. En el proyecto de 'La maison dans les arbres', ventanas árboles y fachada se alternan rítmicamente sustituyéndose en posición y función, conformando extraordinarios collages donde viven buganvillas, rosas, pinos, y musgos. Duncan y su equipo pretenden una disolución de la ciudad, el esparcir los edificios más allá del terreno es una atractiva alternativa en un proceso en el cual la ciudad se expande por un camino, comiéndose piezas o partes del campo⁶¹. El segundo -Geuze-, por sus parques verticales que crecen en altura, rodeando rascacielos o edificando masas verdes: en el edificio Schloss Eyvesfeld (Austria, 2013) donde la vegetación cuelga y crece entre la circulación que ocurre a lo ancho y alto de la fachada⁶².

En un intento drástico de controlar y dirigir el crecimiento de la vegetación, las catedrales con varas de sauce, del artista natural Marcel Kalberer, o más específicamente el pabellón Auerwood Palace en Alemania (1998), demuestran las capacidades estructurales inherentes de un árbol jugando a ser arquitectura humana. Brillante ejemplo de coordinación y modificación del comportamiento natural. Más allá, otros proyectos -esta vez en calidad propositiva, sin haberse llegado a materializar- intentan alcanzar los extremos de estas vertientes. Es el caso del Fab Tree Hab Village, por Mitchell Joachim, Javier Arbona y Lara Greden, donde tratan de abordarse todos los aspectos de la arquitectura a través del crecimiento controlado de las plantas y su autosustentación.

2.1.2. Abstracción del concepto natural en la arquitectura

*I'm not trying to imitate nature, I'm trying to find the principles she is using*⁶³. BUCKMINSTER FULLER.

Señala Thomas Herzog, que una arquitectura adaptada implica asumir una nueva filosofía proyectual; se necesita un marco conceptual potente y global, un entendimiento profundo de las relaciones ecológicas, una construcción que satisfaga plenamente las necesidades vitales humanas y que esté en equilibrio con los ciclos vitales de la naturaleza⁶⁴.

⁶¹ François, Édouard, y Duncan Lewis. op. cit. 1999. p.14.

⁶² Estévez, Alberto T. Arquitecturas Genéticas II: Medios Digitales & Formas Orgánicas = Genetic Architectures II: Digital Tools & Organic Forms. Santa Fe, NM: Sites, 2005. p. 18-80.

⁶³ Fuller, R. Buckminster, y Cam Smith. *Buckminster Fuller to Children of Earth*. Garden City, Nueva York: Doubleday, 1972. p. 19.

⁶⁴ AA.VV. "Edificios ecoeficientes Sostenibles". *aa'arquitectura*. Publicación del colegio de Arquitectos de Catalunya. Barcelona: Julio, 2005. p. 5.

La arquitectura no es un arte escultórico, sino una ingeniería plástica. Da vida a lo inerte o inexistente y explora el material como fuente de ideas y efectos. La relación que nos interesa entre lo artificial y lo natural, está en la creación del propio proyecto, como algo que evoluciona y que a partir de cierto momento se vuelve independiente. Hoy en día se trata de naturalizar al máximo lo artificial. Nosotros intentaremos construir lo natural. En el abstracto y lejano mundo de las ideas y la geometría, la coincidencia y el subconsciente harán que proyectos se asemejen a lo natural cuando nunca lo pretendieron. Los habrá que por procesos naturales en su desarrollo acabarán pareciendo artificiales aunque nunca fue su intención. Igualmente, es posible que aquellos que siguen fielmente la manera de hacer de la naturaleza no caigan en el formalismo de representarla. Es tentador pues organizar los edificios como obras naturales de la construcción en base a su aspecto, pero se corre el riesgo de caer en la disyuntiva universal: ¿es la geometría naturaleza? ¿Es la geometría algo inherente y preexistente con el potencial “Natural” de expresarse en infinitas situaciones? ¿O es un invento humano para representar nuestra percepción de la naturaleza? ¿Dónde están los límites de la abstracción sin que la referencia pierda su identidad?

La naturaleza nos proporciona miles de modelos para la solución natural de los problemas técnicos de la arquitectura tal y como decía Gaudí, y sus efectos pueden superar en mucho a los resultados de una tecnología brutal. El comportamiento termo-mecánico del mundo vegetal nos muestra una capacidad de adaptarse frente a las influencias climáticas dignas de imitación, estrategias que podrían sugerir a nuestra civilización soluciones a muchos problemas que, por su sencillez y armonía, podrían impulsar a nuevas técnicas constructivas. La naturaleza ha de inspirar las claves con las que interpretar los cambios culturales que la era digital introduce en nuestras vidas. Su aplicación requiere evadir la copia sin reflexión, la mimetización pura. Y es apremiante captar el espíritu de la naturaleza y de la tradición constructiva para aplicarlo de acuerdo a nuestros tiempos.

Como primer ejemplo de esta ideología el edificio Tod's, donde Toyo Ito enfatiza el robusto comportamiento de la estructura al mismo tiempo que invita a leer la silueta de un árbol, en combinación con las transparencias de las capas y el vidrio. Sobre el mismo proyecto, escribe:

Lo real y lo virtual antes estaban separados en dos mundos aparte. Yo tenía curiosidad y necesidad de analizar ese componente, de ahí mi investigación con la transparencia y la ligereza. Hoy he llegado a la conclusión de que real y virtual pueden unirse⁶⁵. TOYO ITO

Con esta última frase, Toyo Ito enuncia la realidad de esta filosofía que ya no forma parte de la experimentación o de lo utópico. Y en el mismo afán que comparte con esta tesis de unificar el trinomio computación-naturaleza-arquitectura, continúa:

⁶⁵ Ito, Toyo, y Torres Nadal José María. Escritos. Murcia: Colegio Oficial De Aparejadores Y Arquitectos Técnicos De La Región De Murcia, 2007. p. 14.

*La naturaleza esconde revelaciones privilegiadas para quienes sepan atender a su voz y sepan ligar los cambios tecnológicos con formas distintas de convertirla y aproximarse a ella*⁶⁶. TOYO ITO

Son estos algunos de los ejemplos más perturbadores, cuando las razones técnicas y materiales derivan en las mismas decisiones que la naturaleza hubiese tomado, llegando a un magnífico punto de encuentro: Frei Otto, durante su experimentación de sistemas ramificados, agrupación de células, y formas autoemergentes en función de la tensión material⁶⁷; y de mayor actualidad pero sin perder similitudes, proyectos como el Londres Shooting Venue de Magma Architecture⁶⁸ evocan inevitablemente las superficies mínimas, tan presentes en la naturaleza por motivos estructurales y de eficiencia. Tal y como indica Estévez: el organicismo de Toyo Ito, alumno del árbol al igual que lo era Gaudí, destaca por su proyectar orgánico, formal y conceptualmente entendido sin solución de continuidad, aportando coherencia a todo el proyecto. Complejidad geométrica y morfogenética, que se percibe como armonía, el ADN del edificio⁶⁹.

El polémico Santiago Calatrava recurre innumerables veces a formas humanas y animales, prestando especial interés a las disposiciones estructurales y óseas⁷⁰. Y si es cierto que muchas de sus obras han sido criticadas por sus fallas, también lo es que algunas son brillantes ejercicios formales y escultóricos donde se logra armonizar y domar las formas de una arquitectura que bien podría pecar de figurativa. Muchas de sus obras son el proceso de reconversión de lo natural a lo escultórico -lo geométrico-, y de lo escultórico a lo arquitectónico.

*...son también ellas puras creaciones del espíritu humano, es decir, son interpretaciones de la naturaleza a través de modelos empíricos, o son también nociones abstractas del funcionamiento de cosas que todavía no se conocen porque o no se pueden ver o no se pueden tocar*⁷¹. SANTIAGO CALATRAVA

*Vivimos en un mundo en el que todo son cristales, todo es concierto, todo es orden, nada se mueve por casualidad. Todo es producto de un orden preciso y unas reglas*⁷². SANTIAGO CALATRAVA

Hay en algún lugar un equilibrio entre las fachadas facetadas -más aún si

⁶⁶ Ídem.

⁶⁷ Otto, Frei, Bodo Rasch, y Sabine Schanz. *Frei Otto, Bodo Rasch: Finding Form: towards an Architecture of the Minimal*. Fellbach: Axel Menges, 2006.

⁶⁸ Magma Architecture. "Londres Shooting Venue - Olympic and Paralympic Games." Londres, 2012

⁶⁹ Estévez, Alberto T. *Arquitectura Biodigital Y Genética: Escritos = Biodigital Architecture & Genetics: Writings*. Barcelona: ESARQ, 2015. p. 260.

⁷⁰ Avizanda, Francisco. *Tres Arquitecturas, Santiago Calatrava*. Valencia: Concilleria de Cultura, Educació i Ciència, Generalitat Valenciana, 1990. Documental.

⁷¹ Adda, Catherine. *Calatrava, Dios no juega a los dados*. s. l.: RTVE, 1999. Documental. Consultada 20 de septiembre, 2015. <http://www.rtve.es/alacarta/videos/tres-arquitecturas/tres-arquitecturas-n2-santiago-calatrava/652834/>

⁷² Idem

son de vidrio-, el movimiento artístico del cubismo, y la cristalización de los minerales. Una balanza que de nuevo plantea el dilema del huevo o la gallina. El voladizo de la torre de Gas Natural de Enric Miralles; la sede del Departamento de Sanidad del Gobierno Vasco en Bilbao, y el edificio E8, por Coll-Barreu Arquitectos; el Pabellón 21 MINI Opera Space de Wolf Prix y Coop Himmelb(l)au; el pabellón Hindustan de Charles Correa, la casa Mónaco de McBride Charles Ryan; el auditorio de Leon, de Mansilla y Tuñon; la iglesia de Pilgrimage, por Gottfried Böhm; y por supuesto, la mayor parte de los proyectos de Daniel Libeskind, guiados por ese gesto punzante. La arquitectura facetada, cristalizada, fue y sigue siendo una de las grandes familias que permiten un entendimiento más orgánico y libre de la geometría y el espacio.

En el proyecto para la Fundación 'Jérôme Seydoux-Pathé'⁷³, Renzo Piano proyecta un volumen curvo que adopta una "criatura orgánica" con el fin de responder al requerimiento de un programa funcional y representativo supeditado a las restricciones del sitio. La adaptabilidad, la habilidad para responder a diferentes escenarios (las variables de un mismo entorno en este caso) de una forma homogénea y coherente es, sin duda, una de las grandes características de lo orgánico. También Zaha Hadid resuelve con una única forma orgánica la cubierta, estructura y lucernarios en el Serpentine Sckler Gallery, controlando el volumen y la luz de forma gradual.

La misión de François Roche⁷⁴ es intentar disolver las barreras entre los edificios y el espacio abierto. La interpretación de la tierra como un plano elástico que se puede levantar, cortar y doblar al compás de los edificios, logrando que el desarrollo urbano y la agricultura literalmente coincidan y la densidad del edificio en la isla, pueda ser aumentada considerablemente sin afectar el paisaje o extenderse a las aldeas existentes. También para FOA (Foreign Office Architects), el paisaje es una ocasión para explorar la tradicional oposición entre lo natural y lo artificial, entre lo racional y lo orgánico. El paisaje emerge desde la hibridación entre naturaleza, arquitectura, tecnología y contexto. Que lo natural y lo virtual dejan de ser discernibles y el espacio producido surge de una organización compleja de elementos sencillos.

Izasku Chinchilla, decanta la idea de lo orgánico hacia el proceso y, haciendo referencia a la filosofía del crecimiento orgánico para el pabellón del mismo nombre (Organic Growth⁷⁵) comenta: mantener una flexibilidad de ideas que sean adaptativas para el desarrollo/crecimiento del objeto arquitectónico es crucial. El crecimiento del pabellón ha de darse in situ simultáneamente con su construcción, sin planos preestablecidos del objeto final.

Philip Rahm y Gilles Decosterd exploran otras vertientes más energéticas tratando de equilibrar las fuerzas térmicas de un edificio que contrapone

⁷³ Renzo Piano. "Fundación Jérôme Seydoux-Pathé en París." *Arquitecturaviva*. Consultada 21 de octubre, 2015. <http://www.arquitecturaviva.com/es/Info/News/Details/5882>

⁷⁴ Fujimoto. "Nomadic House." 2014. Consultada 10 de octubre, 2014. www.new-territories.com

⁷⁵ Nueva York Figment Project. "Competition City of Dreams Pavilion." Consultada 20 de septiembre, 2013. http://newyork.figmentproject.org/2015_pavilion_competition

usos y necesidades⁷⁶. Sus edificios son sin duda una micro-meteorología de reacciones químicas que define el aire contenido por la arquitectura.

The very mission of architecture is to define this hollow which is space, to describe a void which contains a quantity of air⁷⁷. PHILIP RAHM

Sou Fujimoto es otro de los arquitectos que pone especial atención a la abstracción de la naturaleza. Además, su obra progresivamente se va dotando de notas digitales de una delicadeza y sutilidad propias de lo japonés, evitando la ostentación de lo paramétrico. La casa NA House (Tokio, 2010), trata de multiplicar las relaciones de una vivienda de igual forma que la disposición de las ramas se esparcen de manera heterogénea, descrita como “una unidad entre la separación y la coherencia”⁷⁸. Su escultura para la Small Nomad House Series⁷⁹ (París, 2004), posee una semejanza ineludible con el sistema de teselación OctoTree, un algoritmo para poblar el espacio tridimensional a partir de puntos preexistentes y poblarlo de cubos que en este caso sirven de maceteros⁸⁰.

004. /// Fujimoto, *Nomadic House*, 2004. Foto de Marc Damage. Nomad House (izq.) VS Octree (der.).



En otra faceta diferente de la abstracción, hay quien intenta “artificializar” la naturaleza, construir entes naturales a través de los ojos de lo de industrial y lo constructivo, como lo son los proyectos de Enric Ruiz Geli (de CLOUD9), para

⁷⁶ Rahm, Philippe. *Form and Function Follow Climate*. Londres: AA Publications, 2007.

⁷⁷ Décosterd, Jean-Gilles, y Philippe Rahm. *Décosterd & Rahm: Physiological Architecture: Published for the Exhibition at the Swiss Pavilion as Part of the 8th International Architecture Exhibition in Venice 2002*. Basel: Birkhäuser, 2002.

⁷⁸ Plataforma arquitectura. “NA House Fujimoto.” Consultada 10 de octubre, 2014. <http://www.plataformaarquitectura.cl/cl/02-155411/casa-na-sou-fujimoto>

⁷⁹ Architecture and design. “floating matrix of metal cubes and trees form a nomadic house.” Consultada 30 de octubre, 2014. <http://www.architectureanddesign.com.au/news/floating-matrix-of-metal-cubes-and-trees-form-a-no>

⁸⁰ Winston, Anna. “Sou Fujimoto stacks aluminium boxes to form “nomadic” house installation in Paris.” *Dezeen*. Consultada 30 de octubre, 2014. <http://www.dezeen.com/2014/10/22/sou-fujimoto-many-small-cubes-installation-paris-jardins-des-tuileries-fiac-art-fair/>

el Aviario del Zoológico de Barcelona⁸¹, o la instalación temporal Morphorest, también en Barcelona⁸².

Antoni Gaudí: geometría de la naturaleza

De entre todos estos personajes, por su indiscutible vanguardia, cabe destacar la figura de Antoni Gaudí. Su obra y evolución suponen un constante esfuerzo por comprender las fuerzas que rigen lo natural para transformarlas y aplicarlas al ámbito arquitectónico.

*Este árbol junto a mi taller: ¿este es mi maestro!*⁸³. ANTONI GAUDÍ

En contraposición al ‘international style’, la archiconocida figura del arquitecto Gaudí resolverá de manera magistral sus obras mediante la geometría oculta en las plantas (y otras referencias físico-geológicas, hilando de nuevo con la tipología cavernosa). Por primera vez en la arquitectura -más allá del ornamento y el simbolismo- utiliza el orden y las virtudes matemáticas que se expresan en la naturaleza, abstrayéndose en elementos que funcionan estructural y espacialmente. Gaudí es, basándose en los objetivos de esta tesis, uno de los referentes más cercanos que logra captar los sistemas naturales sin salir de la pureza geométrico-arquitectónica, evitando caer en la combinación de lo natural o lo arquitectónico de manera separada. El discernimiento de estas reglas subyacentes en lo natural estructurará los esfuerzos y evolución del proyectar de Gaudí, mostrando un delicado equilibrio entre la voluntad, la apariencia y la medida de la abstracción. No es equivocado nombrar a Gaudí como el abuelo de la arquitectura biodigital, por su trabajo con la maquetas funiculares para controlar sus propias geometrías complejas, que lo reafirman como un pionero en lo paramétrico; por su continuidad orgánica cuyo eco llegó al organicismo digital, consolidado como la primera vanguardia del siglo XXI, hasta evolucionarlo a biodigital⁸⁴.

Según Ortega y Gasset, en el mundo hay dos clases de persona, de las cuales Gaudí era claramente de la segunda: “las que no se exigen nada especial, sino que para ellas vivir es ser cada instante lo que ya son, sin esfuerzo de perfección sobre sí mismas, boyas que van a la deriva”, y otras, “las que se exigen mucho y acumulan sobre sí mismas dificultades y deberes”, con otras palabras, las que sienten aquel imperativo de ser mejor, se entiende, de ser siempre mejor de lo que ya son, de no vivir jamás en abandono y a la deriva de los usos en torno y de los propios hábitos, sino, por el contrario, exigirse a

⁸¹ Domus, nº 874. Sottsass: Octubre del 2004. p. 85.

⁸² Thiemann, Robert. “Morphorest.” *Mark n°1*. Amsterdam: invierno 2005/06. p. 56.

⁸³ Puig-Boada, Isidre. *El pensamiento de Gaudí: compilación de textos y comentarios*. Barcelona: Dux, 2015.

⁸⁴ Estévez, Alberto T. “La evolución del legado gaudiniano: organicismo digital.” *1st Gaudi World Congress*. Libro de ponencias. Barcelona: Universitat de Barcelona, 2014.

sí y de sí mismas siempre más⁸⁵.

Por ese motivo, la insistencia de Gaudí por desentrañar la lógica natural se ve patente en su obra. Tokutoshi Torii divide las etapas de Gaudí en tres tomando como referencia las formas de las cuales hace uso:

1. El Gaudí historicista o ecléctico. Bellesguard, la sala interior del “Torino”, las bodegas del Conde Güell...
2. Las formas naturales: Parque Güell, Casa Batlló, Casa Milà...
3. Formas geométricas: en las últimas partes del Templo de la Sagrada Familia, la escuela provisional del Templo, la iglesia de la Colonia Güell...

Estas fases no están separadas, sino que se fundamentan unas sobre las otras. En la tercera especialmente, se busca la abstracción geométrica de las dos primeras, tratando de buscar la objetividad y conocimiento que las rige. Gaudí intenta descomponer y comprender las leyes internas de la geometría natural.

*La bóveda es la cueva de sección parabólica*⁸⁶. ANTONI GAUDÍ

Concerniendo a la segunda etapa, en el proyecto de la Casa Vicens, Gaudí aludirá nuevamente a la naturaleza como referencia: “un techo plano en el cual se han sostenido las estalactitas como recuerdo de la frescura de la cueva”⁸⁷. Este tipo de espacios que D. Fernando Chueca denominará “espacio cueviforme” tienen seguramente su origen en las bóvedas musulmanas como una derivación geometrizada de las cuevas o grutas naturales. El quebrado techo de la Sagrada Familia parece compartir sin duda alguna esas mismas pretensiones. Las semejanzas entre la arquitectura troglodita de la iglesia de Soganli, en Capadocia, eran desconocidas por Gaudí⁸⁸ pero tanto Juan Bassegoda como Puig Boada coincidieron en que Gaudí habría quedado muy satisfecho de ver que la fuerza eólica había realizado algo parecido a su propia intención, asemejándose fuertemente a la iglesia de la Colònia Güell⁸⁹.

Son estos ejemplos de sistemas complejos, procesos naturales continuos que afectan con las mismas leyes a todas sus partes, los que parecen inspirar las geometrías por las que Gaudí tenía aprecio.

*Aquí hallamos soluciones para resolver las columnas y su continuidad hacia las bóvedas ¿Lo ves...? Es aquí donde me inspiro para estas soluciones*⁹⁰. ANTONI GAUDÍ

⁸⁵ Ortega y Gasset, José. *La rebelión de las masas*. Madrid, 1970, pp. 64-66.

⁸⁶ J. Bergós. op.cit., 1954. p.96.

⁸⁷ Martinell, Cesar. *Gaudi: Su Vida, Su Teoría, Su Obra*. Barcelona: Colegio De Arquitectos De Cataluña Y Baleares Comision De Cultura, 1967. p. 482.

⁸⁸ Se cree que no tenía constancia aunque no habría resultado imposible por algunos estudios publicados sobre la región troglodita en Barcelona llegasen a sus manos.

⁸⁹ Torii, Tokutoshi, y Antoni Gaudí. *El Mundo Enigmático De Gaudí: Cómo Creó Gaudí Su Arquitectura*. Madrid: Inst. De España, 1983. p. 236.

⁹⁰ Matamala, Joan. “Gaudí en la intimidad.” *Jornadas Internacionales de estudios gaudinistas*. Barcelona: Blume, 1970. p. 85.

La tercera etapa encuentra su origen en sus estudios, donde el profesor José Castelaro Saco, seguidor de los conocimientos de Gaspard Monge (fundador de la escuela politécnica de París), influenciará y fascinará a Gaudí sobre las superficies alabeadas en la disciplina de la Geometría Descriptiva durante su aprendizaje en la Escuela Libre de Arquitectura de Barcelona⁹¹. Dos soportes directores y un hilo generador son el elemento de toda arquitectura; todas ellas quieren hacer planos, pero la realidad les proporciona planoides⁹². El término planoide acuñado por el mismo se llama geoméricamente paraboloides hiperbólicas, siendo esos soportes e hilo generador las directrices y la generatriz. Gaudí comenzó a aplicar el paraboloides hiperbólicas en la Colonia Güell, a partir de 1908. Y si es cierto que Gaudí había estado ejecutando superficies desarrollables hasta ese momento (superficies cónicas, cilíndricas, cilindroides y conoides), a partir de ese momento se lanzará a las alabeadas (paraboloides hiperbólicas e hiperboloides de revolución) siendo ambos grupos pertenecientes a las superficies regladas, es decir, generadas por una recta⁹³.

Un árbol que se yergue, que aguanta él mismo sus ramas, y éstas sus hojas. Y todo crece armónicamente, grandiosamente como que es el mismo Dios el artista que lo dibuja. Para nada necesita el árbol apoyo externo. Todo en él se equilibra por sí mismo. Todo está en equilibrio, y no es más que una serie de paraboloides hiperbólicas. Y entonces vi en las proyecciones del paraboloides hiperbólicas que marca su sombra todas la figuras de la geometría⁹⁴. ANTONI GAUDÍ

El estilismo de esa tercera etapa influenciada por las superficies regladas es evidente en la Sagrada Familia, donde es fácil discernir cantos y cortes vivos por doquier, probablemente debido a una excesiva purificación de la geometría. Queda la duda de si Gaudí habría suavizado los resultados de las últimas fases, otorgando un acabado continuo -orgánico- sobre las finas aristas matemáticas. ¿Habría llegado Gaudí a una cuarta etapa donde la justificación geométrica de la tercera se veía contaminada por la segunda, comprendiendo que continuidad y naturaleza son indiscutibles en todas sus escalas? ¿Qué hay leyes materiales de resistencia en subniveles que propician el aspecto orgánico de lo natural?

El ordenador es una herramienta adecuada para descubrir las leyes complejas que rigen la naturaleza que Gaudí intuía⁹⁵. TOYO ITO

La contribución de la computación al desarrollo del proyecto inacabado de Gaudí es innegable. Aun así, el panorama actual queda muy lejos de un modelo completo de toda la Sagrada Familia que incorpore toda su riqueza y que se

⁹¹ Martinell, Cesar. *op. cit.* 1967. p.25.

⁹² Bassegoda i Nonell, Joan. "Las Conversaciones de Gaudí con Juan Bergós". *Hogar y arquitectura*, nº 112. 1974. p. 45.

⁹³ Cardellach, F. "La mecánica d'en Gaudí." *La Veu de Catalunya*. Barcelona: 1906. p. 3.

⁹⁴ De Dalmases, José Manuel, Antonio Gaudí y Cornet. *Calendario Josefino para 1927*. Barcelona: s.e., 1927. pp. 19-20.

⁹⁵ Ito, Toyo. "La arqueología del futuro." *Sagrada Familia s. XXI: Gaudí Ara/Ahora/Now*. Barcelona: Edicions UPC, 2008.

comporte a su vez como una catenaria gigante, tal y como la computadora analógica que Gaudí creo para que respondiese como un sistema de catenaria. La física en los modelos requiere una cantidad de recursos colosal pero, ¿cuán fantástico sería que las formas geométricas -relativamente puristas- de la Sagrada Familia se deformasen recíprocamente por las fuerzas internas que les afectan para definir un estado último y perfecto de equilibrio? Sobre el estudio geométrico de la Sagrada Familia y su modelado en 3D a través de Rhinoceros merece ser referenciado en esta tesis Manuel Hidalgo y su artículo sobre la arquitectura gaudiniana⁹⁶, así como los trabajos y publicaciones de Mark Burry.

Hacia 1990, era evidente que el software desarrollado específicamente para la arquitectura en 3D no podía adaptarse a las principales necesidades de la Sagrada Familia -modelado en 3D. Entonces, al igual que ahora, recurrimos a las industrias aeronáuticas y del diseño de vehículos, que utilizan un software de diseño paramétrico gráfico de alta capacidad que nos ayudaría a continuar el proyecto de Gaudí. ... sitúa la Sagrada Familia a la vanguardia de las iniciativas arquitectónicas más avanzadas⁹⁷. MARK BURRY

...No es fácil ejecutar las conexiones entre los armados de las distintas piezas. De hecho, los modelistas tuvieron que buscar los puntos de intersección utilizando la maqueta a escala real. Como test de comprobación se repitió el mismo ejercicio utilizando el ordenador y las mayores discrepancias detectadas eran inferiores a los 2 milímetros entre el trabajo artesanal y la investigación electrónica. Eso demuestra, más que la eficacia del ordenador, el talento de los modelistas. Pero, sea cual sea la técnica que se siga para proseguir con la ejecución de la nave, todo viene a demostrar el genio de Gaudí y su capacidad de generar una arquitectura aparentemente abstracta sobre una base racionalista⁹⁸. MARK BURRY



Por comparación y alusiones, se considera oportuno recoger aquí un ejemplo de características digitales basado en la nave principal de la Sagrada Familia como referencia. La aproximación y desarrollo contiene numerosas similitudes con los conceptos a desarrollar posteriormente en la tesis (cap. 3). El proyecto de Yota Adilenidou⁹⁹ adopta un sistema de células autómatas que crece sobre una rejilla, un espacio deformado, estructurado sobre la disposición del proyecto de Gaudí.

⁹⁶ Hidalgo, Manuel. "Las formas edificatorias de la arquitectura de Antonio Gaudí." *Wiki McNeel*. Consultada 31 de septiembre, 2015. <http://wiki.mcneel.com/rhino/geometriainformaticaarquitectonica>

⁹⁷ Burry, Mark, Jordi Coll Grifoll, y Josep Gómez. *Sagrada Familia s. XXI: Gaudí Ara/ Ahora/Now*. Barcelona: Edicions UPC, 2008. p.15.

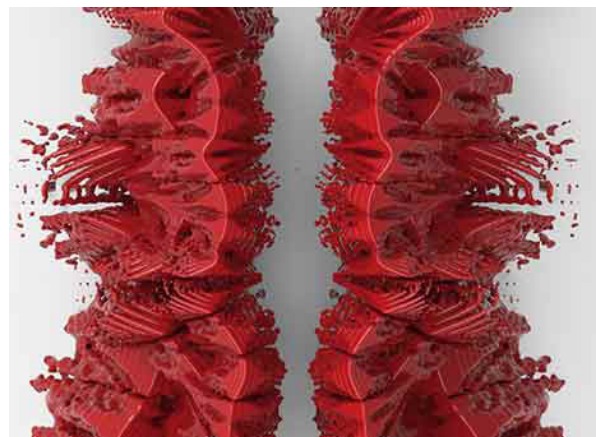
⁹⁸ *Ibidem*, p. 53.

⁹⁹ Adilenidou, Yota. *Error as Optimization*. Vienna eCAADe, 2015. pp. 601-610.

005. /// Yota Adilenidou, 2015. p. 609. Render del autor. Reinterpretación del interior de la Sagrada Familia.

*There is symmetry because I want to break it*¹⁰⁰. YOTA ADILENIDOU

El resultado es una geometría vibrante, cercana a la simetría pero claramente imperfecta por los errores, las mutaciones, por la naturalización del proceso debido a su propia sutonomía. El proyecto de Adilenidou crece, vivo, sobre el de Gaudí, generando una superficie rica en matices y detalles.



2.1.3. Naturaleza contemporánea

Los siguientes capítulos describen y argumentan una manera más amplia de entender el contexto y nuestra impresión de la naturaleza contemporánea. Es requisito inherente de la arquitectura entender la versión más actualizada del presente para dar la mejor respuesta. Gracias a los términos que aquí se describen dicha arquitectura será susceptible de formar parte de esa misma naturaleza y trascender su anterior significado.

El hilo conductor de este apartado de la tesis es el siguiente: escepticismo hacia la postura actual, legitimización del impacto humano, e interpretación de la situación contemporánea a través del concepto “next-nature”. Este último capítulo dará por acabado la justificación de la existencia de una arquitectura natural que replantee la idea de naturaleza y nuestra pertenencia a ella.

*What we observe is not nature itself, but nature exposed to our method of questioning*¹⁰¹. WERNER HEISENBERG

Naturaleza estanca / crítica al modelo maceta

A lo largo de los años la naturaleza ha cambiado de manera incesante, unas veces de forma más agresiva (cinco más concretamente¹⁰²) y otras más paulatinamente, casi imperceptibles pero constantes. Es fácil pues extrapolar sin tener un conocimiento profundo de la historia de la vida en

¹⁰⁰ Adilenidou, Yota. *Error as Optimization*. Viena: 16 de septiembre, 2015. Conferencia.

¹⁰¹ Heisenberg, Werner. *Physics and Philosophy: The Revolution in Modern Science*. Universidad de St. Andrews: Invierno 1955-56. Conferencia.

¹⁰² Ussía Alfonso. “Plan de emergencia para la Tierra.” *LA RAZÓN*. Consultada 30 de junio, 2012. <http://www.larazon.es/noticia/3602-los-humanos-podrian-estar-provocando-un-nuevo-estado-planetario>

nuestro planeta que una cantidad sustancial de especies y ecosistemas han desaparecido y otros tantos han emergido. El equilibrio en la naturaleza como tal, está constantemente sometido a factores que decantan la balanza hacia un lado: plagas, cambios climáticos, desastres naturales, enfermedades... No puede tildarse la desaparición de una especie como algo negativo o positivo, es sólo historia, sucesos amorales. Sin la desaparición de unas no podrían darse oportunidades para que aparezcan de nuevas y los ecosistemas tracen nuevos ciclos. Sin esos cambios el ser humano no estaría aquí, debatiendo de esto y lo otro, sopesando la legitimidad de las especies: ¿Qué define si una especie es autóctona o invasora? ¿Estaban desde el principio allí o vinieron de otro lugar? ¿Es el lugar o el clima lo que debería delimitar el alcance de una raza? ¿El orden de aparición legitima su permanencia? El cambio es la raíz de la evolución y como tal implica dejar lo viejo por lo nuevo. La historia de la tierra se resume en una adición de desequilibrios, no en un estado de acuerdo máximo donde todas las especies conviven en paz y armonía¹⁰³.

*For Dawkins, evolution is a battle among genes, each seeking to make more copies of itself. Bodies are merely the places where genes aggregate for a time*¹⁰⁴. STEPHEN JAY GOULD

Durante el propio proceso de supervivencia y el incesante esfuerzo por domesticar la naturaleza el ser humano ha partido de la necesaria agricultura hasta la banalización de la maceta o los espacios verdes. A lo largo de los siglos, el uso de macetas ha influido en la historia de la horticultura, la cual “floreció” en cuanto la gente adquirió la habilidad para trasladar las plantas de un lugar a otro. Los egipcios fueron de los primeros pueblos en utilizarlas de esta forma. Los romanos por su parte, trasladaban las plantas al interior cuando llegaba el clima frío. Durante el siglo XVIII se transportaron en macetas semilleros del árbol del pan desde Tahití a las Indias Occidentales, y los geranios hicieron el viaje desde África a Norte América. Las orquídeas y las violetas africanas también recorrieron grandes distancias en este tipo de contenedores.

006. /// Frederick Law Olmsted, *Central Park*, 1873. Foto de autor desconocido. Las fronteras entre naturaleza y ciudad, acotadas cual macetas a escala urbana.



Al margen de su funcionalidad, hoy en día es muy común encontrar macetas como un elemento clave para la decoración de jardines, terrazas, balcones, plazas y parques. Incluso con cierto valor arquitectónico, como podrían ser los prominentes maceteros del parque de Diagonal Mar, de Enric Miralles. Al margen de los ejemplos aquí

¹⁰³ Consúltense: Gould, Stephen Jay. *La Estructura De La teoría De La evolución*. Barcelona: Tusquets Editores, 2004.

¹⁰⁴ *Ibidem*, p.80.

presentados en la relación naturaleza-arquitectura (cap. 2.1), la naturaleza ha quedado relegada a un elemento meramente decorativo desaprovechando sus características innatas en la construcción y quehacer arquitectónico. Lo que se percibe y se acuña como naturaleza es una mera simulación: una idea romántica de lo balanceado, lo armónico, lo inherentemente bueno, de la identidad amenazada. Es una visión falsa, probablemente alimentada por el mito del Edén y la brevedad de las vidas humanas. Se proyecta en esa naturaleza algo mejor, unos valores eternos que no están sometidos a la moda o las tendencias¹⁰⁵. Y por supuesto, se rechaza aquello que no agrada: mordiscos, inundaciones, plagas, suciedad... hasta el punto de estar dispuestos a sustituir la naturaleza por atrezos de plástico o fotografías de paisajes. Incluso la ciudad jardín-moderna¹⁰⁶, perpetúa esa función pasiva que se manifiesta en la colocación de bancos, caminos pavimentados, o vallas, con la siempre necesaria flota de jardineros para mantener la naturaleza bajo control. Los parques siguen siendo, a excepción de los pocos bienaventurados que se tumban en el césped arriesgando lo impoluto de sus prendas, macetas de escala urbana, fotos tridimensionales por las que pasear y contemplar esa naturaleza no tan salvaje que antaño se habitara. La naturaleza de las ciudades poco tiene de natural, si entendemos por natural cosas que se desarrollan libre y espontáneamente.

007. /// Estévez-Navarro, Genetic Architectures Office, *Biodigital Barcelona Chair*, 2010. Foto del autor. Proposición de una naturaleza con papel activo en la ciudad.

El proyecto de Biodigital Barcelona Chair (Genetic Architectures Research Group, 2010)¹⁰⁷ trata de invertir esa situación: frente a los bancos artificiales desperdigados en los parques, el despacho de Genetic Architectures propone un banco de césped para las plazas más duras. Una pieza de mobiliario viva, que crece, que es habitada por otros seres, que sufre las inclemencias del tiempo... una porción de naturaleza que obliga al usuario a gozar -y sufrir¹⁰⁸- un contacto más directo¹⁰⁹.

El proceso de reconstruir el concepto naturaleza pasa



¹⁰⁵ Metz, Tacy. "Nature is an agreement". *Next Nature*. Amsterdam: Next Nature Network, 2015. p.78.

¹⁰⁶ El movimiento urbanístico de las ciudades jardín fue fundado por Sir Ebenezer HOWARD (1850-1928). Sus conceptos sociológicos y urbanísticos se contienen en el libro *Ciudades Jardín del mañana*.

¹⁰⁷ Estévez, Alberto T., Diego Navarro. "Genetic Architectures Research Group, ESARQ (UIC)." AA.VV., *eme3_2010: International Architecture Festival*. CCCB/ MACBA, Barcelona, 2010. pp. 78-79.

¹⁰⁸ Algunos de los maravillosos efectos secundarios de este proyecto son: ropa manchada de verde, humedad, defecación de otros animales, y población de insectos.

¹⁰⁹ Navarro, Diego. "La nova natura a la arquitectura". V *JORNADES INTERNACIONALS. Innovacions Artístiques i Nous Mitjans: Conservació, Xarxes i Tecnociència*. Barcelona: Mayo, 2012. Conferencia.

por tratar de aislarlo y definirlo: ¿dónde encontrar naturaleza virgen? Se busca constantemente naturaleza que no haya sido tocada o manipulada por el hombre y paradójicamente, el ser humano viene de esa misma naturaleza. Aun cuando se logra alcanzar ese punto totalmente aislado de la humanidad, nuestra propia presencia mancha o pervierte esa virginidad ya sea con un yate en medio del océano, o una tienda de campaña en medio del monte. Una extraña obsesión que, por suerte, resulta imposible controlar en todos los aspectos: la naturaleza también se abre camino en lo artificial. Todo sistema ya sea natural o digital tiene un margen de error que alimenta la teoría del caos. Y ese caos, positivamente, ha creado “parques involuntarios”, verdaderamente naturales y libres, como el Cypriot Green Line o Chernobyl-scale event (el parque involuntario más grande del mundo).

*Idealizing a distant wilderness too often means not idealizing the environment in which we actually live, the landscape that for better or worse we call home*¹¹⁰. TACY METZ

En la continua búsqueda de la naturaleza idealizada, el ser humano ha sublimado el concepto más allá de la propia naturaleza: ha creado la híper-naturaleza: productos tan perfectos que la propia naturaleza no había sido capaz de evolucionar por sí misma. Tomates más rojos, sandías sin pepitas, gatos sin pelo, melocotones sin pelusa, vacas más carnosas, perros más dóciles... Aun sin la necesidad de la ingeniería genética el ser humano ha readaptado y deformado la naturaleza en beneficio propio: ha dado lugar a elementos que superan su propia naturaleza y que no serían posibles sin el hombre. La verdadera naturaleza puede que no sea verde, pero la fabricada sí que lo es. Sobre todas las características de la naturaleza se valora su estética: en 1520, Albrecht Altdorfer pinta por primera vez un paisaje europeo.

*...only a society that is no longer immersed in the landscape is able to treat it as art*¹¹¹. TACY METZ

Las reservas naturales ya no son naturales, sino que las forzamos a permanecer en equilibrio, controlando natalidad e invasividad. Si entre el 90% y el 99% de las especies de seres vivos que han existido en la Tierra están extintas¹¹². ¿Qué premisa justifica el estancamiento de la naturaleza en una postal inalterable? Cuando se niega el cambio, ¿se niegan nuevas oportunidades? ¿se está coartando el proceso de emergencia en el planeta?

Cuando atacas a la naturaleza ella te repele, y es mucho más fuerte. Es violenta, lucha por la supervivencia. Es un caos, la naturaleza es una batalla constante. Es una tierra que Dios creó con su ira. Lo único sobrecogedor es el asesinato colectivo. Nosotros no somos nada delante de esta sobrecogedora falta de orden, falta de armonía,

¹¹⁰ Redclift, Michael. *Sustainability. Sustainability*. Londres: Routledge, an Imprint of Taylor & Francis Books, 2005. p. 373.

¹¹¹ Metz, Tacy. “Hypernature”. *Next Nature*. Amsterdam: Next Nature Network, 2015. p.125.

¹¹² Daniel D. Chiras. *Environmental Science*. 7º edición, Ed. Jones & Bartlett Publishers, 2006. p. 58.

sobrecogedor crecimiento, sobrecogedora miseria y fornicación. Incluso las estrellas en el cielo parecen un desastre...¹¹³. THOMAS HERZOG

El ser humano como fuerza de la naturaleza

La huella del ser humano sobre la tierra y su impacto está más allá de cualquier duda. Antropólogos y filósofos considera al ser humano y sus implicaciones una capa adicional en la esferas que componen la tierra. En el capítulo de “La Esfera Digital” en esta misma tesis, se profundizará sobre las concepciones sociales y los medios que la permiten, un nivel adicional por encima de los físicos -la geosfera- y los vivos -la biosfera-, que suponen un nuevo entendimiento de nuestro ecosistema, del ser humano como transformador de niveles inferiores (o simplemente previos)¹¹⁴.

La creciente fuerza del ser humano casi hace parecer que la naturaleza es un subconcepto dentro del mundo antropocéntrico, y no al revés como debiera ser¹¹⁵. El impacto humano en el planeta no puede ser subestimado: cambio climático, explosión demográfica, manipulación genética, redes digitales, conectar océanos a través de canales, construir mega-ciudades en lapsos de tiempo inauditos... Los humanos ya no son una especie más: son una fuerza geológica. Desde “pequeños accidentes” que suponen catástrofes ecológicas (vertidos de crudo¹¹⁶ o escapes nucleares¹¹⁷) hasta el goteo constante que puede provocar un cambio planetario¹¹⁸. Algunos lugares del planeta se han convertido en infiernos post-digitales, donde los residuos formados por hardware acaban conformando la arquitectura del lugar: monitores, ventiladores, y teclados construyen puentes y muros en gigantescos vertederos¹¹⁹. Las derivas no intencionadas del ser humano dan lugar a nuevas naturalezas, tan salvajes y crueles como la original.

De entre todas estas transformaciones y alteraciones, Holanda es uno de los

¹¹³ Herzog, Thomas. “Obscenity of the jungle.” *Youtube*. Consultada 20 de mayo, 2015. <http://www.youtube.com/watch?v=3xQyQnXrLb0>

¹¹⁴ Vernadski, Vladimir Ivanovitch, Jacques Grinevald, David B. Langmuir, y Mark A. McMenamin. *The Biosphere*. Nueva York: Copernicus, 1997.

¹¹⁵ Sterling, Bruce, “Preface”, Mensvoort, Koert van., y Hendrik-Jan Grievink. *Next Nature*. Amsterdam: Next Nature Network, 2011.

¹¹⁶ Maizquez, Miguel. “La lista más negra.” *20 minutos*. Consultada 28 de junio 2010. <http://www.20minutos.es/noticia/728547/0/vertidos/petroleo/claves/>

¹¹⁷ Carlin, John. “Chernóbil, la sombra de una catástrofe.” *El País*. Consultada 25 de marzo, 2016. http://elpais.com/elpais/2016/03/11/eps/1457722766_979859.html

¹¹⁸ Ussía, Alfonso. “Plan de emergencia para la tierra.” *LA RAZÓN*. Consultada 27 de junio, 2012. <http://www.larazon.es/noticia/3602-los-humanos-podrian-estar-provocando-un-nuevo-estado-planetario>

¹¹⁹ Schiller, Jakob. “Inside the hellscape where our computers go to die.” *Wired*. Consultada 28 de abril, 2015. http://www.wired.com/2015/04/kevin-mcelvaney-agboglobshie/?mbid=social_twitter

casos más singulares, colosal y a la vez sorprendentemente sutil, un ejemplo exitoso de ‘Terramorphing’.

A nation of artifice that still clings to a pretty myth of tulips, clogs y contented cows while, in some anxious corner of the Dutch psyche, the dykes leak endlessly y the laboring windmills creak in a fitful breeze. Next nature is about the planet becoming Dutch: Nature made the world, but mankind made Holland¹²⁰. BRUCE STERLING

En el caso de China, su influencia ya no se ciñe solo a sus mega-ciudades y su impacto en la producción mundial, sino en el hito de producir el primer terremoto artificial. Es una idea terrorífica, no el hecho en sí, sino la capacidad de ser casi omnipotentes, de desconocer los propios límites. Históricamente, esas catástrofes, esos cambios drásticos en el planeta han supuesto un cambio de era, recalcando una vez más que no existe la naturaleza balanceada -cíclica y armónica-, sino que es una serie de mega-catástrofes, donde todo va “mal constantemente” y cuyas repercusiones impulsarán las nuevas generaciones. La supervivencia humana probablemente pase por evitar dichas catástrofes, pero también por controlarlas: redirigiendo y provocando cataclismos, se da lugar al término ‘geo-engineering’ o intervención climática. La alteración de la geo-esfera a gran escala, ya sea mediante la activación controlada de volcanes, la gestión de radiación solar, o la modificación atmosférica. Un juego con mucho potencial y alto nivel de peligrosidad¹²¹:

Geo-engineering might be a viable solution to an overheated planet For instance, it could work as an emergency measure to slow a melting ice cap. Yet, before we dive in the game of deliberately manipulating the Earth’s climate to counteract the effects of global warming, we must realize that maakbaarheid is never finished: every cultivation of nature typically causes the rise of a next nature that is wild and unpredictable as ever. Just like the inventor of the fridge did not anticipate a hole in the ozone layer, we should be bracing ourselves for some serious side effects of geo-engineering. Thus, if we get in the geo-engineering game our methodology should be one of guided growth’ rather than ‘rnaakbaartied’.*

Arguably, rather than desperately attempting, to stop all changes in the climate, we should as a culture gain more of a flexibility towards a constantly mutating environment after change happens¹²². JOSE DE MUL

¹²⁰ Fuentes, Fernando. “El plan de 10 megaciudades para China.” Consultada 28 de diciembre, 2015. La Tercera. <http://www.latercera.com/noticia/mundo/2015/12/678-660892-9-el-plan-de-10-megaciudades-para-china.shtml>

¹²¹ Zizek, Slavoj. “Nature does not exist.” *Youtube*. Abril, 2011. Consultada 19 de septiembre, 2015. <http://www.youtube.com/watch?v=DIGeDAZ6-q4&feature=related>

¹²² Jose de Mul. “The techno-logical sublime”. Mensvoort, Koert van., y Hendrik-Jan Grievink. *Next Nature*. Amsterdam: Next Nature Network, 2011. p.156

‘Next Nature’

Hablar de ‘Next Nature’, es hablar del valor de una cultura o sociedad cambiante, de la naturaleza y su fuerza, de la posibilidad de plantear una arquitectura basada en otros valores. ‘Next Nature’ implica hablar de lo natural fuera de la naturaleza. Fruto de nuestra creación, lo digital y lo artificial está más vivo que la naturaleza domesticada y controlada de la que nos rodeamos (virus digitales, cadenas sociales, efecto 2000, la bolsa, etc.). A medida que el desarrollo se hace más veloz resulta más difícil simplificar causas y efectos, los fenómenos evolucionan con su propio valor intrínseco, y no como desarrollo temporal de una sucesión de nuestras ideas. Dichos fenómenos adquieren independencia y leyes propias, acciones que no pueden ser previstas más allá de formular las premisas originales. Lo artificial puede ser salvaje y vicerversa. En el día a día a excepción de alguna planta o mascota, todo lo que te rodea en tu entorno está diseñado. Incluso estás puede que estén modificadas a lo largo de cruces intencionados entre especies. La naturaleza intacta es difícil de encontrar. Se vive en una época en la que lo “hecho” y lo “nacido” se están fundiendo. Esto sin embargo, no quiere decir que el ser humano se haya convertido en Dios y sea dueño de su destino, sino que la relación con la naturaleza está cambiando. Aunque tradicionalmente naturaleza y tecnología se han visto como cosas opuestas, ahora parecen mezclarse e incluso cambiar sitios. La naturaleza cada vez más controlada (modificada genéticamente, control de población, etc.) y la tecnología escapa al control (mercados económicos, virus informáticos, etc.), pareciéndose cada vez más a la naturaleza.

Como se ha comentado anteriormente en el capítulo del “Naturaleza estanca / crítica al modelo maceta” (dentro del cap. 2.1.3), lo que percibimos o llamamos como naturaleza es una mera simulación: una idea romántica de lo balanceado, lo armónico, lo inherentemente bueno, de la identidad amenazada. En contraposición la tecnología que tradicionalmente fue creada para protegernos de las fuerzas de la naturaleza y permanecer bajo control da poco a poco lugar a una nueva naturaleza, igual de cruel y salvaje que siempre. Aun arriesgo de dramatizar, la sombra de la IA (inteligencia artificial) comienza a proyectar un sentimiento de desazón sobre la humanidad.

I am not an advocate of running to the hills, going off the grid, living in the trees, eating nuts and berries. I am interested in how the technology can facilitate new kinds of intimate relationships with the nature. How technology can be an active agent in, not only creating new natures, but also reconditioning our relationship to old concepts.

YOUNG LIAM

Koert Van Mensvoort, reitera estas ideas en las que la naturaleza intacta es cada vez más rara. Pero mientras lo salvaje se retira, la frontera entre cultura y naturaleza está desapareciendo también¹²³. ¿Puede que se mire en la dirección equivocada? Cerca de Bloemendaal, un poste telefónico vestido de árbol no

¹²³ Van Mensvoort, Koert. “Real Nature Is Not Green.” Mensvoort, Koert van., y Hendrik-Jan Grievink. *Next Nature*. Amsterdam: Next Nature Network, 2011. p.30

es naturaleza¹²⁴, es una foto de ella, como un paisaje en un cuadro encima del sofá. Cuando un pájaro construye un nido lo llamamos naturaleza, cuando lo hace una persona cultura. El ser humano ha hecho la naturaleza más natural que lo natural: hypernatural. Un tomate “natural” es una maravilla de raza-selectiva e ingeniería genética. Es una simulación de una naturaleza que nunca existió, es mejor que la propia cosa. Más bonita, más segura, más sabrosa... Cuanto más se aprende sobre la naturaleza, más se la acerca hacia lo cultural. Acercarse a lo natural puede implicar muchas cosas más allá del aparentar o el camuflar. Cargar todos los procesos de diseño con este aspecto del desarrollo biológico, ese ‘savoir faire’ natural, puede repercutir en los resultados con otros valores añadidos.

La nostalgia innovadora (‘innovative nostalgia’) es una estrategia que pretende suavizar la frontera del cambio tecnológico, conectando nuevas tecnologías con procesos más familiares. El ser humano siente una mayor aceptación, es decir, más comodidad y menor nivel de estrés, frente a objetos que tienen hábitos, valores, tradiciones o instituciones ya aceptadas. Hacer referencia a valores positivos como es el de la naturaleza imbuye al proyecto final de un halo que afecta al subconsciente del futuro cliente/usuario. La reminiscencia o alegoría a un proceso más natural transmite valores aun cuando no necesariamente pueden tenerse conocimiento del porqué de lo positivo de esa asociación. Si bien puede darse una segunda lectura a esta estrategia (la de crear una ilusión artificial y superficial) con la intención de mejorar su comprensión durante sus primeros años de aplicación, no hay que olvidar la importancia del skeuomorfismo y todo el revuelo asociado a él que dividió el mundo del diseño de interfaces en 2012 durante el conflicto de iOS6¹²⁵.

El mismo Joris Laarman comenta sobre su Bone Chair el irónico resultado provisto de “an almost historic elegance” que es “far more efficient compared to modern geometric shapes”. He aquí un diseño que emite cierta familiaridad como producto de un complejo proceso de adición y sustracción de materia de la misma manera que los huesos lo harían. En el caso de esta tesis, aunque bienvenido, cualquiera que pueda ser el matiz de nostalgia innovadora siempre será un añadido secundario y nunca el objetivo primero del experimento. No se profundizará más en este aspecto aunque se advierte que es un tema relevante y muy influyente para la prosperidad de “nuevas arquitecturas”. ¿Se considera al plano blanco y abstracto del movimiento moderno arquitectura estandar o lo son los tradicionales muros cubiertas de yeso? ¿Tratamos los revestimientos cerámicos que imitan la piedra o la madera como una nueva forma de skeuomorfismo? ¿Son las formas producto de la naturaleza (y por tanto las más antiguas) las más transgresoras? ¿Qué papel juega el ornamento, lo retro, o lo ‘vintage’ a la hora de proyectar la arquitectura y su contemporaneidad?

Separar entre lo cultural y natural siempre ha sido relevante. La palabra

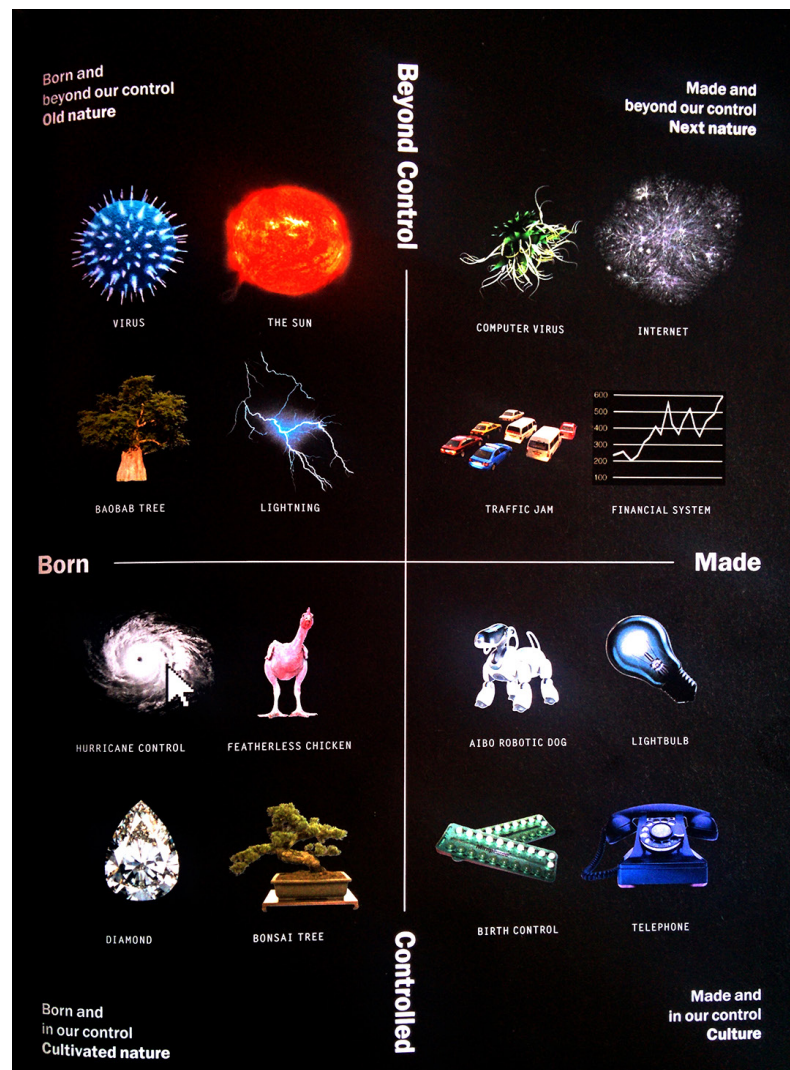
¹²⁴ Heuvel, Arnoud. “Antenna Tree Mast Safari.” *Next Nature*. Consultada 29 de agosto, 2009. <https://www.nextnature.net/2009/08/antenna-tree-mast-safari/>

¹²⁵ Van Mensvoort, Koert. “iBookshelf: Simulation before Extinction.” *Nextnature*. Consultada 31 de agosto, 2010. <http://www.nextnature.net/2010/08/iBookshelf-simulation-before-extinction/>

“naturaleza” deriva del término latín “natura”. Está a su vez era la traducción del término griego “physis”. En latín “natura” se relaciona con el significado de “nacido” (y para los griegos “physis” implicaba “crecimiento”). Muchas cosas han cambiado desde entonces y el sentido más puro de naturaleza inalterada ya apenas existe, ‘Nacimiento’ ya no es una palabra que pertenezca a lo natural. Más adelante puede que dibujemos esa misma línea entre lo controlable y lo autónomo. Cultura es lo que controlamos, lo autónomo se sale del campo del poder humano. Así, los tomates son cultura y el tráfico es naturaleza. La naturaleza también cambia con el hombre, la verdadera naturaleza ya no es verde.

008. /// Koert Van Mensvoort, 2010. p. 30. Esquema Born vs made.

Through the use of mathematical models, it has become possible to visualize those abstract entities, verify their existence and project their behavior into a once unimaginable world. The introduction of new electronic media in the last fifty years gave a different twist to the exploration of these mathematical notions. The ideas of mathematical models and simulations were realized through fast computations and large memory capacities. A world was discovered, the world of virtual reality, which is a “make-believe” representation of mathematical models. This world can be projected to the computer screen or animated through real-time computations. Objects, represented through instructions in the computer’s memory, were projected to a screen by simple algorithms, then transformed as if they were physically there, occasionally dressed in fancy textures and, in special cases, animated and transformed indefinitely. KOERT VAN MENSVOORT



Actualmente, los occidentales están más preocupados por los movimientos de la bolsa que por las inundaciones. Esta, opera de una forma amoral, cruel y amable a partes iguales, sin pertenecer ni ser responsabilidad de nadie en concreto. Como en los ecosistemas, hasta el más pequeño desajuste puede producir consecuencias inesperadas. Los virus pueden producir el caos, más allá de lo que su creador hubiese podido imaginar, afectando a usuarios inocentes.

Este contexto no ha pasado inadvertido para los diseñadores: MALWAREZ, es un proyecto artístico que crece y reacciona ante la presencia de virus¹²⁶. En su artículo “Razorius Gilletus: on the origin of next species” Koert toma como ejemplo la cuchilla de afeitar¹²⁷. Entiende como los productos diseñados (que bien podrían ser arquitectura) son un producto evolutivo, que si bien son dueños de “un” ingeniero, este no es sino una pequeña pieza dentro de empresas gigantes, donde la voluntad creadora se diluye, frecuentemente a manos de la economía (entorno), competencia (otros seres vivos depredadores) o los gustos humanos (que también somos producto evolutivo).

*I therefore propose we consider the development of razors as a truly evolutionary process not metaphor-ically, but in fact. The species this process has brought into being we shall now classify as: Razorius Gillettus. It is just one of the many new species emerging within the techno-economic system, a system that is fast evolving*¹²⁸. KOERT VAN MENSVOORT

Así Mensvoort introduce la Evolución No-Genética (en términos estrictamente biológicos). Algunos productos industriales impulsados por la ideología de mejora constante generan año tras año nuevas versiones de sí mismos que siempre introducen pequeños cambios y mejoras. Las cuchillas Gillette son uno de los casos más evidentes, pero otros productos como coches, logos, o Smart-phones también la sufren. Este suceso no es un simple progreso de mejora sino que en la mayoría de los casos están motivados para mantener la validez del producto o de la marca para adecuarse a las tendencias, es decir, el entorno, la selección natural de nuestra civilización. Pertenecen a nuevas especies que emergen de nuestra ecología tecno-económica. Todos los modelos se construyen sobre los anteriores, las alteraciones exitosas se mantienen y el resto se descartan, suelen ser incompatibles con otras especies -marcas-, tienen detalles superfluos que solo sirven al propósito de destacar sobre sus competidores, ofrecen opciones que generan nuevas subespecies... Algunas de las mejoras de estos artefactos son lineales y continuistas (mejora de la adecuación), pero también las hay que son descubiertas por accidentes (mutaciones), u otras en las que los consumidores dan una función inesperada (contexto). Con esto, Mensvoort considera que restringir los valores evolutivos a seres basados en Carbono es erróneo, ya que el concepto de evolución puede cambiar de medio. Justifica que, ya de por sí, el mismo ADN resulta como una forma más evolucionada para codificar vida de un sistema más simple: el ARN (ácido ribonucleico), que es necesario para el correcto funcionamiento del ADN, encargándose de tareas de transmisión y activación, pero sí que se vale por sí mismo para “dar vida” en determinados tipos de virus. Tal vez, la evolución debería ser un principio universal más allá del ADN (igual que se propone que la naturaleza lo sea más allá de lo vivo).

¹²⁶ Dragulescu, Alex. “Malwarez.” <https://sq.ro/malwarez.htm>

¹²⁷ Van Mensvoort, Koert, “Razorius Gilletus”, Mensvoort, Koert van., y Hendrik-Jan Grievink. *Next Nature*. Amsterdam: Next Nature Network, 2011. p.60-65

¹²⁸ Next Nature. “Non Genetic Evolution.” Consultada 21 junio, 2015. http://www.nextnature.net/themes/nongenetic-evolution/?utm_content=buffer21da&utm_medium=social&utm_source=twitter.com&utm_campaign=buffer

*There is no reason why evolutionary processes could not transfer themselves to other media*¹²⁹. KOERT VAN MENSVOORT

En un ámbito más próximo al de la arquitectura, el del diseño de mobiliario, Jonathan Olivares usa explícitamente el uso de vocabulario biológico para clasificar la historia de las sillas de oficina. En el puntualiza que la evolución de las diferentes piezas es independiente, y que las sillas no siempre evolucionan gradualmente, sino que asemejan más a una bacteria, donde secuencias genéticas completas pueden ser incluidas o no. Olivares, menciona específicamente la ausencia de interés sobre la evolución de nuestros productos.

*I find it ironic and unnerving that our society cherishes, studies and documents the natural world, but keeps little track of the products that make up our predominant reality*¹³⁰. JONATHAN OLIVARES

Sea cual sea la disciplina de diseño, cualquier producto artificial... Todo puede ser considerado como lo mismo, parte de la misma máquina evolutiva desde los días de Darwin (o incluso de la máquina Universal de Turing). **

La naturaleza humanizada es la intencionalidad. Un perro lo es, un zorro no. Un parque lo es, un bosque no. Las cosas no intencionadas son una clase de naturaleza, ya sea ruinas de edificios, o programas automáticos. Next nature da lugar a servicios de ecosistemas, aunque puede que no sean lo que esperábamos. Los árboles filtran el aire, los insectos polinizan, los arbustos evitan la erosión... ¿cuánto costarían estos servicios si se diseñasen como objetivo primario¹³¹? Puede ser que de cosas que aparecen espontáneamente creen nuevos valores que no tenían originalmente. La búsqueda de esos valores espontáneos, emergentes, es otra de las virtudes de dar rienda suelta al diseño autónomo; la exploración es necesaria para descubrir dichos valores añadidos.

En última instancia, personajes como Liam Young, abogarán por la desaparición del concepto Naturaleza en pos de otro que incluya la idea de tecnología y todas sus repercusiones como una fuerza implícita en lugar de elementos ajenos¹³². La tecnología siempre ha sido un agente en el cambio evolutivo, siempre ha moldeado nuestro planeta a escalas que ni siquiera podríamos imaginar. Hay una necesidad de apartarse de la disposición binaria y opuesta, para comenzar a dar oportunidades a la ecología. Young afirma que incluso conceptos como “new nature” o “next nature” favorecen esa ideología subjetiva y anticuada.

¹²⁹ Van Mensvoort, Koert. “Razorius Gilletus.” *Next Nature*. Consultada 30 de marzo, 2010. <http://www.nextnature.net/2010/03/razorius-gilletus/>

¹³⁰ Olivares, Jonathan. *A Taxonomy of Office Chairs: the Evolution of the Office Chair, Demonstrated through a Catalogue of Seminal Models and an Illustrated Taxonomy of Their Components*. Londres: Phaidon Press, 2011.

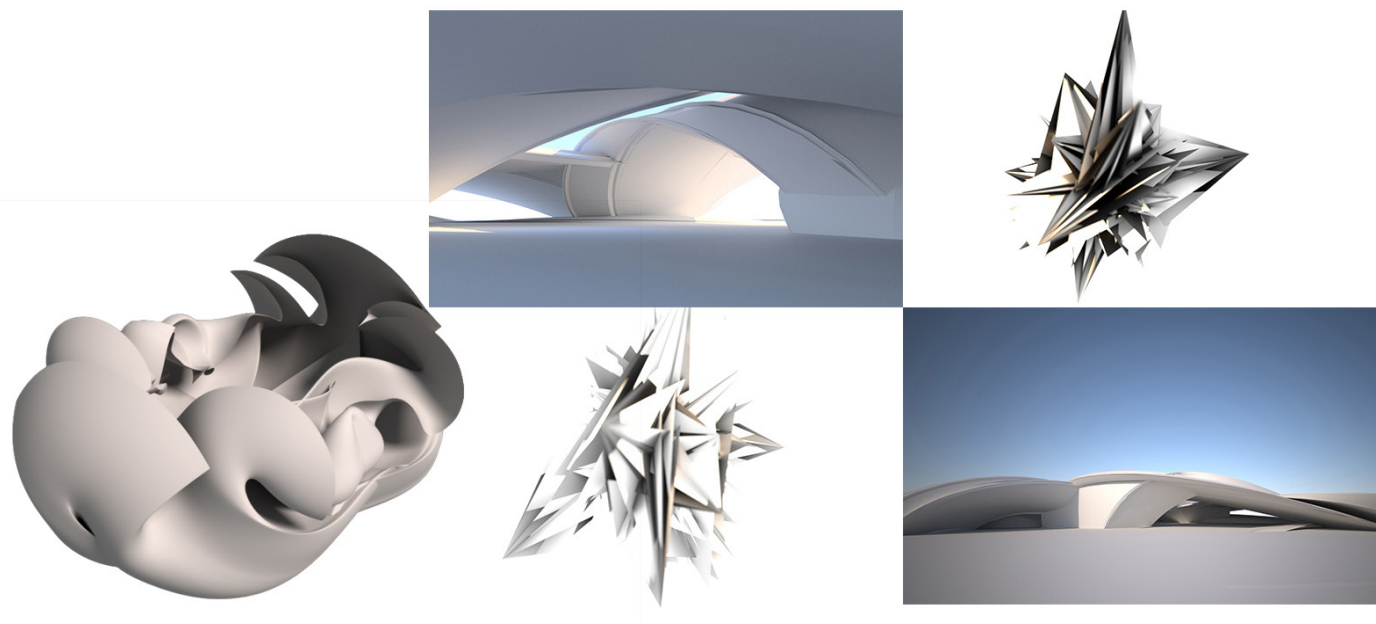
¹³¹ Haring, Bas, “Next Nature Services”, Mensvoort, Koert van., y Hendrik-Jan Grievink. *Next Nature*. Amsterdam: Next Nature Network, 2011. p.180

¹³² Young, Liam. “On speculative architecture and engineering the future.” *Next Nature*. Consultada 30 de marzo, 2015. <http://www.nextnature.net/2015/03/interview-liam-young-on-speculative-architecture-and-engineering-the-future/>

We should use a totally new word that is not loaded with the cultural baggage that comes with nature, where new implies something better and improved. Talking about nature as something that never existed at all is potentially more productive. LIAM YOUNG.

La discusión entre lo natural y lo artificial se extiende a cualquier ámbito, y así el mundo del modelado digital, tampoco está exento de vida y de sorpresas. Los errores ('bugs') y fallos del software a veces dan lugar a "happy accidents", donde un proyecto totalmente inesperado emerge del caos para formalizar algo totalmente sorprendente¹³³. En la Teoría del Caos¹³⁴, el orden puede aparecer espontáneamente a partir de lo aleatorio, y pequeños cambios pueden desencadenar dramáticas consecuencias. ¿Puede soñarse con una arquitectura accidental? ** En varias ocasiones durante el desarrollo de la tesis, se han dado resultados totalmente inesperados e involuntarios de los cuales se presentan aquí algunas capturas. Resultan evidentes sus virtudes armónicas dentro de sus "errores internos", así como sus cualidades estéticas y espaciales.

009. /// Diego Navarro, *Happy accidents*, 2015. Renders del autor. La geometría resultante de 'bugs' informáticos no está exenta de interés.



¹³³ Designboom. "Noa Raviv visualizes immaterial computer errors with grid installation." *Designboom*. Consultada 28 de abril 2015. <http://www.designboom.com/art/noa-raviv-grid-installation-oops-hansen-house-jerusalem-04-08-2015/>

¹³⁴ Lewin, R. *Complexity: Life at the Edge of Chaos*. Nueva York: Macmillan, 1992.

2.2. Herramientas como naturaleza humana

So what is actually predictable is the human passion to make improvement, so use the machines from 2014 to create the computers from 2015¹³⁵. RAY KURZWEIL

Como animal, el hombre es una de las especies que peor se adapta a un entorno. Pero las características y fallas físicas se compensan con inteligencia y capacidad creativa: ingeniería de herramientas y construcción de entornos. Ningún otro ser puede igualarse en este aspecto. Al mismo tiempo, el impacto de las creaciones es recíproco: nuevas tecnologías y nuevos avances nos dan nuevas utilidades, pero también requieren nuestra adaptación a ellas enfatizando ciertas habilidades. Le damos tanto a los sistemas como ellos nos dan a nosotros¹³⁶.

Traditionally, technology is seen as a force that diminishes our instincts and distances us from nature. Increasingly however, we realize technology can also energize and amplify our deepest human sensibilities—even some we had forgotten about. Propelling us not so much back to, but rather forward to nature¹³⁷. KOERT VAN MENSVOORT

Si las herramientas y la ciudad son la expresión de la naturaleza humana, si las mismas nos definen y adaptan recíprocamente ¿están a la altura de semejante responsabilidad? El compositor Brian Eno decía que los ordenadores estaban poco africanizados, eran poco naturales o viscerales, que la relación del ser humano -estático, pasivo y observador- con los ordenadores es fría: pantalla y teclado. ¿Peca la arquitectura de esa relación distante entre persona y contenedores programáticos? ¿Cuán sensoriales y transcendentales son las construcciones del s.XXI?¹³⁸.

At times of change, the learners are the ones who will inherit the world, while the knowers will be beautifully prepared for a world which no longer exists¹³⁹. ALISTAIR SMITH

¹³⁵ Kurzweil, Ray. "On how technology will transform us." *TED*. https://www.ted.com/talks/ray_kurzweil_on_how_technology_will_transform_us?language=es

¹³⁶ Haring, Bas. "We serve our systems as much as they serve us." Mensvoort, Koert van., y Hendrik-Jan Grievink. *Next Nature*. Amsterdam: Next Nature Network, 2011. p. 227.

Desde la aparición de la palabra escrita (y la imprenta), parece ser que las nuevas generaciones tienden a una mente con menos memoria y más capacidad de analítica (esto no es un cambio evolutivo, teóricamente el tiempo ha sido insuficiente).

¹³⁷ Koert van Mensvoort. "Back to the tribe. Forward to Nature." *Next Nature*. Consultada 31 de julio, 2011. <https://www.nextnature.net/2011/07/back-to-the-tribe-forward-to-nature/>

¹³⁸ *Ibidem.*, "There is not enough Africa in computers." *Next Nature*. Consultada 30 de junio, 2010. <https://www.nextnature.net/2011/07/back-to-the-tribe-forward-to-nature/> <https://www.nextnature.net/2010/06/there-is-not-enough-africa-in-computers/>

¹³⁹ Smith, Alistair. *High Performers: The Secrets of Successful Schools*. Carmarthen: Crown House Pub, 2011. p. 15.

Lo más notable y sorprendente en la discusión contemporánea sobre la influencia de la tecnología en arquitectura es que la relación entre la arquitectura y la naturaleza está concebida de una manera totalmente diversa. La tecnología ahora se imagina como un medio flexible para adaptar la arquitectura a la naturaleza, la computadora desempeña un papel crucial como intermediario entre la arquitectura y la naturaleza. En la conferencia, “Realidades de Interconexión” introducida por Bart Lootsma, se sugiere que la computadora se vuelve un mediador entre diversas realidades y diversos paisajes, variando según lo que tradicionalmente entendemos como paisaje en la arquitectura y el planeamiento urbano, supliéndolo por paisajes en los cuales se envuelve la lluvia, el sonido y la naturaleza misma, jugando un papel más activo, provocando que esta dinámica y la ayuda de la tecnología surja como un organismo o, por lo menos, adquiera características orgánicas. El papel dinámico de la computadora como mediador para el diseño también implica un cambio con respecto al momento de la intervención creativa del diseñador y eso es algo que se debe tener presente a la hora de proyectar.

*We become what we behold. We shape our tools and thereafter our tools shape us*¹⁴⁰. MARSHALL MCLUHAN

El ser humano siempre ha avanzado a través de sus herramientas, el nivel de su tecnología marca uno de los factores más determinantes para valorar cuan evolucionada está una sociedad, una cultura... A su vez, esas herramientas nos hacen terriblemente dependientes (haga el lector el sencillo ejercicio de recordar un apagón del sistema eléctrico de unos pocos minutos y sus implicaciones).

*The only intuitive interface is the nipple. After that, it's all learned*¹⁴¹. BRUCE EDIGER

La “frase de Ediger” revela el necesario proceso de aprendizaje. Es a través de la técnica, de la repetición y el dominio, cuando las herramientas nos cambian a nosotros, y el individuo se torna maestro. Tiempo y masa crítica son necesarios para alcanzar el máximo potencial de una herramienta¹⁴². Su dominio implica comprensión de las leyes que la rigen, y así Louis Kahn recomendaba no olvidar que cada material, desde su condición, contiene una voluntad de ser y que los mejores momentos del oficio del arquitecto se han dado cuando los materiales y las formas hablan de los procesos de transformación a los que fueron sometidos.

Cuando se habla de la relación entre arquitectura y tecnología nos ocupamos tradicionalmente de cuatro asuntos diversos: organización e infraestructura, estética, construcción y producción. Los progresos en tecnología de la

¹⁴⁰ Clarke, Arthur C. *Profiles of the Future; an Inquiry into the Limits of the Possible*. Nueva York: Harper & Row, 1962.

Frase aparentemente atribuida por error, aunque si relacionada con su compañero John Culkin. Consultada 26 de julio, 2014. <https://mcluhangalaxy.wordpress.com/2013/04/01/we-shape-our-tools-and-thereafter-our-tools-shape-us/>

¹⁴¹ Cita mal atribuida como el mismo Ediger explica en este post. https://groups.google.com/forum/#!msg/comp.editors/qoEUZnUNo7Q/cOc-he_UL4gJ

¹⁴² Sennett, Richard. *The Craftsman*. New Haven: Yale University Press, 2008.

construcción han conducido a una industrialización de este proceso. La primera edad de la máquina consideró cambios importantes en el campo de la infraestructura y de la organización. El gas, el agua y la luz entraron en los edificios. El edificio en sí mismo fue concebido como máquina que disciplinaba o que curaba los males del hombre, como ha sido descrita por Foucault o como el habitar de la máquina según las ideas de Henry Ford. Las máquinas habían llegado para salvar a la humanidad.

The building industry may still be identified with the value system projected by the industrial revolution: standardization, homogenization, modularity, redundancy and repeatability. However, most or all of these characteristics of industrialization are antithetical to Nature's Way¹⁴³. NERI OXMAN

Por desgracia las técnicas arquitectónicas se han convertido meramente en reproducciones de una fabricación en serie, abandonando en gran parte el ámbito de la técnica como espacio legítimo de la experimentación para concentrarse en el lenguaje y la imagen de las cosas -que ahora suponen escasos ejemplos de I+D¹⁴⁴. Mientras las herramientas e investigación de otros ámbitos se desarrollan a lo largo de los años, la arquitectura ha dejado de promover sus propios sistemas y mendiga del resto de disciplinas, a rebufo de la industria.

2.2.1. La esfera digital

Tradicionalmente la tierra se ha subdividido en dos esferas físicas: la geosfera, que contiene a su vez otras esferas llamadas manto, núcleo y corteza; y la atmósfera, compuesta por troposfera, estratosfera, mesosfera, termosfera, y exosfera. Otras esferas como la hidrosfera o la biosfera se encuentran entremezcladas, normalmente en la corteza y las primeras capas de la atmósfera. A principios del siglo XX, Vladimir Vernadski¹⁴⁵ teoriza sobre una nueva esfera basada en el conjunto de seres vivos dotados de inteligencia, la noosfera (del griego 'noos', inteligencia). Vernadski predice que la noosfera (lo inmaterial) transformará la biosfera igual que esta lo ha hecho con la geosfera y establece su punto crítico con el descubrimiento de los procesos nucleares (la energía atómica y la capacidad de transmutar los elementos). Vernadski apunta a una última etapa donde el pensamiento científico acelera y toma control de lo "natural". Otros autores más tardíos que recogieron el concepto de la noosfera como Pierre Teilhard¹⁴⁶ consideran que la última etapa de la noosfera deriva en un lado psíquico y se convierte en una súper-mente que

¹⁴³ Oxman, Neri, *Material-based design computation*, Massachusetts Institute of Technology, 2010, p.130

¹⁴⁴ *2G International Architecture*, nº 16, Vol. IV. Barcelona: Gustavo Gili, 2000. p. 122.

¹⁴⁵ Vernadski, Vladimir Ivanovitch, Jacques Grinevald, David B. Langmuir, y Mark A. McMenamin. *The Biosphere*. Nueva York: Copernicus, 1997.

¹⁴⁶ Marcos. *Notes from the Jungle: An Anthropologist Views Today's World*. S.I.: Xlibris, 2008. p.199.

simboliza el espíritu de la Tierra, filosofía mucho más próxima a la antigua concepción de Gaia¹⁴⁷.

Con el tiempo, este concepto se ha transformado en uno que incorpore el flujo de información y conocimiento que los seres humanos generan. El término infosfera ('infosphere') se acuña por primera vez en la revista Time, en el cual R. Z. Sheppard escribe

*In much the way that fish cannot conceptualize water or birds the air, man barely understands his infosphere, that encircling layer of electronic and typographical smog composed of clichés from journalism, entertainment, advertising and government*¹⁴⁸. SHEPPARD

En 1980, el autor Alvin Toffler asocia esta capa de información a La Tercera Ola¹⁴⁹ (siendo la primera la revolución agrícola y la segunda la revolución industrial) y la caracteriza con factores de descentralización, desmasificación y personalización. A pesar de su antigüedad, el libro de Toffler resulta sorprendentemente acertado en muchos de los aspectos que han aparecido en los últimos cinco años. Esta tercera revolución afecta a la industria a través del prosumidor y la customización en masa, los procesos computacionales se consideran amplificadores de la fuerza mental¹⁵⁰, así como la capacidad del software para crear más software. La Tercera Ola permitirá interactuar con esa esfera de información y modificarla, el espectador ya no solamente recibe, sino que decide, interactúa y en algunos casos modifica. Advierte también de una posible desconexión social entre los individuos por la falta de necesidad de relacionarse y una tendencia hacia la soledad.

Actualmente, el filósofo Luciano Floridi sigue trabajando sobre la infosfera y la "ética de la información", de la relación entre la sociedad digital y las entidades biológicas, una esfera que él basa en la "existencia" más que en la vida. El profesor Floridi defiende que la infosfera trata tanto de moralidad como de significado, la tecnología es solamente el medio en el que se mueve. Advierte también que la estructura de datos, en un intento por conectar e interrelacionar, simplifica las interpretaciones y los individuos. Por supuesto, las maravillas tecnológicas no vienen sin contrapartes: la información se vuelve volátil, la privacidad es frágil, las sugerencias son manipuladoras... la infoesfera representa un potencial enorme, pero resulta sencillo ser absorbida

¹⁴⁷ Consúltense: Lovelock, James. *Gaia: Una Nueva Visión De La Vida Sobre La Tierra*. Madrid: Hermann Blume, 1983.

Teoría ideada por el químico James Lovelock en 1969 que defiende que la atmósfera y la parte superficial del planeta Tierra se comportan como un todo coherente donde la vida, su componente característico, se encarga de autorregular sus condiciones esenciales. El término se acuña a razón de la diosa griega de la Tierra (Gaia, Geo o Gaya).

¹⁴⁸ Sheppard, R.Z.. "Rock Candy." *Time Magazine*. Abril, 1971.

¹⁴⁹ Toffler, Alvin. *La Tercera Ola*. Barcelona: Plaza & Janés, 1980.

¹⁵⁰ "That's what a computer is to me: the computer is the most remarkable tool that we've ever come up with. It's the equivalent of a bicycle for our minds." Steve Jobs. Krainin, Julian. *Memory & Imagination: New Pathways to the Library of Congress*. Michael Lawrence Films, 1990. Película. http://www.mfilms.com/productions/m_and_i

por ella¹⁵¹.

En 1995, Peter Russell¹⁵² -Teilhard también hará esta consideración, en el sentido de una evolución direccionada- ve la conexión de tantos pensamientos humanos a través de la red computacional, internet, como un nuevo nivel evolutivo. Russell llamará a esta esfera o súper organismo social humano el 'Gaiafield'. Este nivel evolutivo escapa a la concepción genética de mejora e introduce los grandes saltos tecnológicos como elementos que mejoran -o cambian- la raza humana en todos sus niveles.

Hoy conocemos esas esferas como el ciberespacio, o "la internet de las cosas", la nube, una red que se amplía cada día absorbiendo más y más de los objetos que nos rodean (la nevera, coches, relojes...). El ciberespacio por su carácter virtual e intangible contiene mucho más que Internet/World Wide Web: es la suma de cada aparato electrónico, por muy aislado que este, las intranets y extranets, las estaciones meteorológicas, cada bit de información en un 'pen-drive', las telecomunicaciones, emisoras de radio o satélites, todos y cada uno de nuestros 'smart-phones'... incluso gestos tan nimios como usar el mando a distancia para encender la tele o abrir el coche supone una conexión virtual, una transferencia de datos. Todo ello conforma una enorme y gigantesca red -esfera- de datos e información.

El reconocimiento de la infoesfera también acarrea la compresión y gestión de la misma: en 1967 un artículo sobre B. A. Marron y P. de Maine menciona por primera vez el término 'information explosion' aplicado a la era digital -ya había sido mencionado con anterioridad en referencia a la información per se y la dificultad que suponía gestionar los volúmenes de información disponibles¹⁵³-, y en lo sucesivo irán apareciendo diferentes artículos que hacen referencia al incremento exponencial de información y la incapacidad para almacenarlo o gestionarlo¹⁵⁴. En 1990 Peter J. Denning plantea el problema -y la solución- de manera muy concisa¹⁵⁵:

The imperative [for scientists] to save all the bits forces us into an impossible situation: The rate and volume of information flow overwhelm our networks, storage devices and retrieval systems, as well as the human capacity for comprehension... What machines can we build that will monitor the data stream of an instrument, or sift through a database of recordings, and propose for us a statistical summary of what's there?... it is possible to build machines that can recognize or predict patterns in data without understanding the

¹⁵¹ Handy, Charles. "The Seductions of the Infosphere." *Harvard Business Review*. Consultada 31 de julio, 2015. <https://hbr.org/2015/07/the-seductions-of-the-infosphere>

¹⁵² Russell, Peter. *The Global Brain Awakens: Our next Evolutionary Leap*. Palo Alto, CA: Global Brain, 1995. p.150.

¹⁵³ Aparece por primera vez en el periódico *Lawton Constitution*, 1941.

¹⁵⁴ Big data historia cronológica. Consultada 11 de enero, 2015. <http://www.winshuttle.es/big-data-historia-cronologica/>

¹⁵⁵ Forbes. "A very short History of big data." Consultada 11 de mayo, 2009. <http://www.forbes.com/sites/gilpress/2013/05/09/a-very-short-history-of-big-data/#6ec1d8ff55da>

*meaning of the patterns. Such machines may eventually be fast enough to deal with large data streams in real time... With these machines, we can significantly reduce the number of bits that must be saved, and we can reduce the hazard of losing latent discoveries from burial in an immense database. The same machines can also pore through existing databases looking for patterns and forming class descriptions for the bits that we've already saved*¹⁵⁶. PETER DENNING

En Agosto de 1999 aparece el término 'Big data' como una oportunidad y un reto para investigar en grandes volúmenes de información en tiempo real¹⁵⁷. 'Big Data' (o Datos masivos) es procedimientos que implican: recolección, almacenamientos, búsqueda, compartición, análisis, y visualización, normalmente enfocados al descubrimiento de patrones recursivos dentro de enormes cantidades de datos que no pueden ser procesados por software o hardware común¹⁵⁸. Es decir, el entendimiento y aprovechamiento de la información que genera la digisfera con un objetivo o propósito. El Big Data permite un entendimiento mejor de la humanidad, la sociedad de masas y sus comportamientos, pero ha despertado también el monstruo de la privacidad, agravado por los problemas de seguridad frente a atentados terroristas¹⁵⁹.

Resulta evidente que el arquitecto tiene a su disposición una ingente cantidad de información y las herramientas adecuadas para su interpretación, y que es su responsabilidad hacer uso de ella con su consecuente potencial. La filosofía de 'open data' persigue que la información sea accesible para todo el mundo de forma libre, sin restricciones de derechos de autor, patentes, o cualquier mecanismo de restricción. El software libre o el código abierto son frutos de esta filosofía. Por ejemplo, la propia ciudad de Barcelona pone a disposición este tipo de información en la web del ayuntamiento^{160/161} donde se puede acceder a información sobre territorio, población, economía y empresa, administración, y ciudad y servicios.

Para más inri, la manera de representar grandes cantidades de datos puede alterar notablemente su interpretación. Presentar implica condicionar y destacar. Nuestro entendimiento y conclusiones se ven afectadas por el diseño

¹⁵⁶ Denning, Peter. "Saving All the Bits." *American Scientist*. Consultada 31 de julio, 1986. <http://denninginstitute.com/pjd/PUBS/AmSci-1990-5-savingbits.pdf>

¹⁵⁷ Digital Library. "Visually exploring gigabyte data sets in real time." Consultada 31 de agosto, 1999. <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=310930.310977&coll=DL&dl=GUIDE>

¹⁵⁸ López, Jose Carlos. "La moda del Big Data." *el Economista*. Consultada 28 de febrero, 2014. <http://www.economista.es/tecnologia/noticias/5578707/02/14/La-moda-del-Big-Data-En-que-consiste-en-realidad.html>

¹⁵⁹ Andrades, Fran. "Big data y la privacidad. Cuando el negocio eres tú." *El Diario*. Consultada 30 de abril, 2013. http://www.eldiario.es/turing/BigData_0_120038458.html

¹⁶⁰ Ajuntament de Barcelona. "Open Data." Consultada 28 de julio, 2016. <http://opendata.bcn.cat/opendata/ca>

¹⁶¹ Ajuntament de Barcelona. "Visualitzacions de dades del portal." Consultada 28 de julio, 2016. http://opendata.bcn.cat/opendata/ca/visualizations/?utm_source=Twitter&utm_medium=Promoted+tweet+02&utm_campaign=Smart+City

de la gráfica en cuestión y tienen una repercusión directa sobre el proyecto¹⁶². Es relevante pues alimentar el discurso a través de narrativas visuales que sean capaces de mantener la complejidad y hacerla accesible y entendible¹⁶³, la era de la información no deja ningún ámbito inalterado ('data visualization' y diseño gráfico). Y si el sector arquitectónico no está reparando en esto, otros sí lo están haciendo por nosotros:

*When architects design buildings, they will have to consider to what degree those buildings function as information carriers (if they neglect this, they run the risk of LED screens being attached to the buildings in due course)*¹⁶⁴. KOERT VAN MENSVOORT.

La información está cada vez más presente y la manera de representarla crece en posibilidades (iluminación, colores, vibraciones, sonidos...) ¿Debe el arquitecto incorporar los valores de la domótica con una actitud más propositiva? El arquitecto, como lector del paisaje y la cultura ha de ser consciente de esos valores abstraídos, de esas capas de información que pueden representar complejidades materiales o intangibles, cuantificables o subjetivas. La tesis hará buena cuenta de esa lectura virtual y analizará filosofías como la de Patrick Schumacher, arquitecto en Zaha Hadid Architects, cuya estrategia proyectual se centra en gestionar la complejidad de esas capas simultáneas. También se tendrá en cuenta que posteriores experimentos, por su variedad y multitud de partes, generarán un espacio de información cuyos elementos relacionados responden a valores arquitectónicos como área, soleamiento, o densidad poblacional. Es decir, se alimentan de la necesidad funcional a través de la esfera digital y contribuyen a ella, generando un paisaje que no tiene necesidad de simplificarse.

Estado actual y adopción

En el documental 'Memory & Imagination: New Pathways to the Library of Congress'¹⁶⁵, entre otros ilustres invitados, Steve Jobs alude a la importancia de las herramientas como impulsores de las habilidades humanas y pone como ejemplo un análisis sobre la capacidad locomotora de las especies. En él, los humanos aparecen en el tercio inferior mientras que el animal más eficiente de la tabla es el cóndor. Con todo, cuando se considera al tándem ser humano-en-bicicleta los parámetros que lo definen se salen de las gráficas debido a su eficacia.

¹⁶² Provingground. "Using Data in Your Design Process." Consultada 29 de Agosto, 2015. <http://provingground.io/2015/08/27/using-data-in-your-design-process/>

¹⁶³ Lupi, giorgia. "The architecture of a data visualization." Febrero, 2015. <https://medium.com/accurat-studio/the-architecture-of-a-data-visualization-470b807799b4#xo5t32x48>

¹⁶⁴ Mensvoort, Koert van. "Our Environment as an Information Carrier." Gerritzen, Mieke, y Laura Martz. *Artvertising: *aka the Million Dollar Building*. Amsterdam: All Media Foundation, 2007. p. 86.

¹⁶⁵ Krainin, Julian. *Memory & Imagination: New Pathways to the Library of Congress*. Michael Lawrence Fims, 1990. Película. http://www.mlfilms.com/productions/m_and_i

*That's what a computer is to me: the computer is the most remarkable tool that we've ever come up with. It's the equivalent of a bicycle for our minds*¹⁶⁶. STEVE JOBS.

¿Qué maravillas oculta esta nueva esfera digital? El potencial es enorme: comunicación instantánea visual y de audio, transferencias a la velocidad de la luz, educación universal, etc. Al finales de 2013, el 6% de la población tiene un tablet, el 20% un ordenador y el 22% un smart-phone¹⁶⁷. Mientras que el ordenador crece lentamente pero imparabile, 'tablets' y 'smart-phones' (no nos engañemos, son ordenadores en miniatura con mejores capacidades para relacionarse con su entorno: conexión telefónica y datos, GPS, NFC, acelerómetros, bluetooth, Infrarrojos...) han iniciado un crecimiento exponencial sin precedentes en la historia de la tecnología. Se suman además a la fiesta los 'wearables', las SmartTVs y los "Navegadores" de los coches. En Octubre de 2015 el número de búsquedas en el buscador Google era superior en 'smart-phones' que en PCs. Los PCs llevaban implementados más de 30 años, los 'smart-phones' menos de 10. Estos dispositivos conforman un auténtico ecosistema entre ellos, se reproducen aquellos que se adaptan mejor al mercado y se extinguen aquellos que pierden la utilidad o son depredados por mejores 'gadgets'. Todos estos elementos de hardware, interconectados, presentes allí donde estemos bajo un mismo paraguas: la computación. ¿Cómo afronta la sociedad la convivencia con un ámbito que ha inundado todos los aspectos de nuestra vida?

La manifestación más tangible de la esfera digital es el software. Sin él, todo los aparatos electrónicos no serían más que cajas vacías, esqueletos de alguna especie inimaginable. En poco tiempo (siempre cabe la posibilidad de que alguna de estas suposiciones no se cumpla) el software se convertirá en un estandar para abrir la puerta de tu casa¹⁶⁸, recibir paquetes a través de drones¹⁶⁹, hacerse cargo de la limpieza¹⁷⁰, optar a una vida alternativa¹⁷¹, pagar con tu móvil¹⁷², o conducir los coches de manera autónoma¹⁷³... Estas no son ni de lejos, las posibilidades más extravagantes a las que nos abocamos. Y la posibilidad de crear nuestros propios equipos tecnológicos mediante Arduino¹⁷⁴ e impresión 3d¹⁷⁵ no hará sino multiplicar exponencialmente su

¹⁶⁶ Idem.

¹⁶⁷ Heggstuen, John. "One In Every 5 People In The World Own A Smartphone, One In Every 17 Own A Tablet." *Business Insider*. Consultada 29 de diciembre, 2013. <http://www.businessinsider.com/smartphone-and-tablet-penetration-2013-10>

¹⁶⁸ Lockitron. Consultada 11 de enero, 2015. <https://lockitron.com/>

¹⁶⁹ Amazon. "Amazon Prime Air." Consultada 11 de enero, 2015. <http://www.amazon.com/b?node=8037720011>

¹⁷⁰ Irobot. Consultada 11 de enero, 2015. <http://www.irobot.es/>

¹⁷¹ Oculues. Consultada 11 de enero, 2015. <https://www.oculus.com/en-us/>

¹⁷² Muñoz, Ramón. "Apple Pay llegará a España en 2016." *El País*. Consultada 29 de octubre, 2015. http://economia.elpais.com/economia/2015/10/29/actualidad/1446119500_035355.html

¹⁷³ Rosenblatt, Seth. "Google's self-driving car turns out to be a smart ride." *Road Show*. <http://www.cnet.com/roadshow/news/googles-self-driving-car-turns-out-to-be-a-very-smart-ride/>

¹⁷⁴ Arduino. Consultada 11 de enero, 2015. <https://www.arduino.cc/>

¹⁷⁵ Felixprinters. Consultada 11 de enero, 2015. <http://www.felixprinters.com/>

presencia.

En toda esta voragine de innovación, cientos de ideas pueblan diferentes puntos de aceptación y algunas de ellas fallan miserablemente, bien porque la tecnología o la sociedad no están preparadas para ellas (Apple Newton, 1993). La historia del mundo digital¹⁷⁶ está repleta de experimentos aparentemente poco ingeniosos o difícilmente aplicables que con el tiempo resultan ser auténticamente visionarios. De esta forma siempre hay un retraso entre lo descubierto -como capacidad para hacer algo nuevo-, el encontrar un uso o utilidad para ello y, finalmente, que sea viable aplicarlo. Únicamente la viabilidad es la que convierte la ciencia-ficción en ciencia, la que arroja la idea al mundo para que crezca en todo su esplendor.

*You can't think about thinking unless you think about thinking about something*¹⁷⁷. SAYMOUR PAPER

A pesar de esos periodos de adaptación, sigue siendo crítico que nuestras tecnologías se desarrollan más rápido que nuestra capacidad cultural para entenderlas. Puede verse esta controversia entre la piratería y la posibilidad de compartir archivos: si compras y dejas un libro después de haberlo leído es compartir, pero si escuchas un disco y se lo copias a un amigo es un acto de piratería. Hay evidentes diferencias y argumentos en esta comparación, pero el error más común es tratar de la misma manera el formato físico que el digital. Ello provoca situaciones que sufren para desarrollar protocolos legales y culturales, los cuales tratan de adaptarse constantemente con una tasa de éxito poco evidente hasta la fecha¹⁷⁸. Únicamente las nuevas soluciones impactan positivamente en la reducción de la piratería (Steam, Netflix, y otras plataformas) demostrando que “forzar” el modelo antiguo no hace sino agravar la situación. En el s. XX el coche moldeó la topología del mundo, de nuestras ciudades y calles. En la actualidad el impacto de la pantalla (el monitor) también tiene una considerable repercusión: los comedores se diseñan entorno al televisor; los escritorios alrededor de portátiles, las mesitas de noche están pobladas de cargadores con ‘smart-phones’ y ‘smart-watches’... No se ha desarrollado un entendimiento cultural de lo que significan muchas de estas cosas pero las compañías de tecnología ya lo están produciendo. No esperan a que los abogados averigüen cómo regularlas, simplemente hacen las herramientas y las lanzan al mundo. Para más inri, la velocidad a la que se desarrolla la tecnología crece cada día más, y no parece haber una certeza de cuál es el camino correcto. Por este motivo el proyecto especulativo es tan importante. Prototipar una idea rápidamente y lanzarla a una ficción lo suficiente real como para que encuentre un lugar donde agarrarse, donde contrastarse. Se puede experimentar con las tecnologías que quizás

¹⁷⁶ Negroponete, Nicholas. “A 30-Year history of the future.” *TED Talks*, 2014. Consultada 11 de enero, 2015. http://www.ted.com/talks/nicholas_negroponete_a_30_year_history_of_the_future#t-112234

¹⁷⁷ Papert, Seymour. “You can't think about thinking without thinking about thinking about something”. *Contemporary Issues in Technology and Teacher Education*, n.º 5(3/4). s.e., 2005. pp. 366-367.

¹⁷⁸ Fenlon, Wes. *PCGamer*. Consultada 30 de agosto, 2016. <http://www.pcgamer.com/pc-piracy-survey-results-35-percent-of-pc-gamers-pirate/>

queramos y con aquellas de las que quizás deberíamos estar asustados¹⁷⁹. Es el deber del arquitecto desarrollar los nuevos modelos arquitectónicos y sus repercusiones: simular el proyecto arquitectónico.

La teoría de la difusión de innovaciones ayuda a entender la adaptación de una nueva innovación (herramienta) para un grupo de individuos, de igual forma que se explica el proceso de cambio social¹⁸⁰. De esta teoría se destacan cuatro valores a contemplar que son: categorías de adopción, canales de comunicación, el tiempo y el sistema social. Esta teoría de Everett Rogers escrita en 1983 hace hincapié que la adopción de la innovación es un proceso de reducción de incertidumbre. La campana de adopción de Rogers divide la sociedad en los siguientes tramos: Innovadores (2,5%), adoptantes tempranos (13,5%), mayoría temprana (34%), mayoría tardía (34%) y rezagados (16%). En esta curva, se considera que la barrera entre los adoptantes tempranos y la mayoría temprana marca la línea de la población con un interés intrínseco por la tecnología.

La división de grupos de Rogers puede resumirse brevemente de la siguiente manera:

- Innovadores: Emprendedores, acostumbrados al principio de incertidumbre, baja relación o comprensión con el resto de la sociedad.
- Adoptantes tempranos: Relación de respeto y liderazgo para el resto del sistema. Capacidad para discernir de forma mesurada las nuevas herramientas.
- Mayoría temprana: Alta interacción que permite el valor crítico de difusión para un crecimiento que se asiente de manera estable y fiable. Sus decisiones afectan al sistema de manera global.
- Mayoría tardía: Escepticismo acompañado de falta de recursos. Requieren de aceptación social y moral.
- Rezagados: Tradicionalismo con adopción únicamente cuando se vuelve una necesidad dentro del sistema.

Si bien sería absurdo analizar la posición de los ordenadores¹⁸¹, o la adopción de internet¹⁸² en la comunidad global por la obviedad de su éxito y bienestar, se considera oportuno poner en perspectiva la adopción de las herramientas computacionales ligadas al proceso arquitectónico -algunas de ellas no son exclusivas de la propia arquitectura-.

¹⁷⁹ Young, Liam. "On speculative architecture and engineering the future." *Next Nature*. Consultada 30 de marzo, 2015. <http://www.nextnature.net/2015/03/interview-liam-young-on-speculative-architecture-and-engineering-the-future/>

¹⁸⁰ Singhal, Arvind, y James W. Dearing. *Communication of Innovations: A Journey with Eva Rogers*. New Delhi: SAGE Publications, 2006.

¹⁸¹ Los países de la OECD (Organization for Economic Co-operation and Development). Los primeros 10 países del mundo en lo que se refiere a ordenadores por persona ya han superado la barrera del 74% entrando en la última sección de adopción: los rezagados. Consultada 11 de enero, 2015. <http://www.nationsencyclopedia.com/WorldStats/Edu-other-personal-computers.html>

¹⁸² En noviembre de 2015 la penetración de Internet a escala mundial es del 46% (entrando en la zona de adopción tardía) siendo Europa y Norte América 73.5% y 87.9% respectivamente las más avanzadas. Consultada 11 de enero, 2016. <http://www.internetworldstats.com/stats.htm>

Otro factor a considerar es la vida tecnológica que pasa a su vez por una serie de pasos asociados a la Curva S de Richard N. Foster¹⁸³:

- Emergencia: gran potencial de desarrollo, alto nivel de incertidumbre. Periodo de inversión clave.
- Crecimiento: nuevos atributos que atraen clientes. Requiere de gran inversión y promoción para conservar o aumentar el posicionamiento.
- Madurez: ecosistema de empresas que compiten a un mismo nivel. Periodo más rentable y estabilización del mercado.
- Saturación. Obsolescencia del producto debido a nuevas opciones que la reemplazan.

A la luz de esto veremos que Grasshopper, el ecosistema paramétrico que se considera en esta tesis se encuentra en una fase de crecimiento, en un punto muy cercano a la barrera de los adaptadores tempranos y la mayoría temprana, cuando las cualidades del software dejan de ser meramente tecnológicamente sorprendentes y la comunidad empieza apreciar cualidades prácticas. Grasshopper ha sido en su mayor parte WIP ('work in progress') y gratuito por lo que no se han obtenido beneficios directos -aunque se sospecha que su existencia puede haber favorecido considerablemente las ventas de Rhinoceros, programa sobre el cual funciona y del cual depende-. El resto de add-ons que funcionan sobre Grasshopper se encuentran en la primera fase (emergencia: gran potencial de desarrollo, alto nivel de incertidumbre, periodo de inversión clave). Estas valoraciones no hacen sino ratificar la validez de la tesis, su carácter experimental y su posible repercusión en el futuro arquitectónico.

Sin duda el modelado paramétrico es novedoso y todo software relacionado queda muy lejano en la pirámide de adaptación tecnológica¹⁸⁴. El tiempo y otros avances tecnológicos marcarán si las herramientas digitales -la informática es considerada como vital- se convierten en una tecnología tan estandarizada y aceptada en nuestras vidas como lo son el dinero, la escritura, los relojes, la ropa, las casas... El nivel 6 -invisible- reconoce tecnologías que no se consideran como tal. A pesar de que tuvieron un momento de invención y un proceso de mejora como cualquier otra, a día de hoy tejen nuestro día a día sin que reparemos en ellas. La escritura, a pesar de requerir un esfuerzo de aprendizaje en nuestra infancia, se convierte en un lenguaje que forma parte del subconsciente. ¿Puede considerarse lo paramétrico como tal? No es presuntuoso, las reglas paramétricas no son sino descripciones geométricas en clave matemática que reconocen la posibilidad de cambio. Las proporciones llevan años de historia humana conviviendo con el arte, la arquitectura, y la ingeniería, reconocen un crecimiento coherente y participan de un crecimiento "natural". ¿Es posible que llegue el momento en el que tanto el lenguaje computacional como las relaciones paramétricas alcancen dicho estatus?

¹⁸³ Foster, Richard N. *Innovation: The Attacker's Advantage*. Nueva York: Summit Books, 1986.

¹⁸⁴ Mensvoort, Koert. "Pyramid of technology." *Next Nature*. Consultada 2 de agosto, 2014. <https://www.nextnature.net/2014/08/pyramid-of-technology/>

010. /// Hendrik-Jan Grievink, *Pyramid of technology*, 2014. Ilustración. Extraído del blog Next-Nature en "Pyramid of technology" por Mensvoort, Koert. Esquema de las fases de adopción por las que se mueven las diferentes tecnologías.

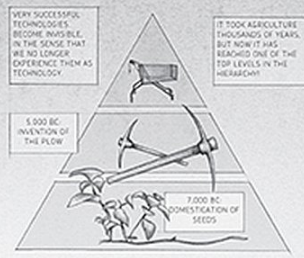
NATURALIZATION



AT THE TOP LEVEL OF THE HIERARCHY A TECHNOLOGY IS COMPLETELY INTEGRATED INTO OUR BODIES AND MINDS. THE WAY WE INTERACT WITH OUR ENVIRONMENT AND OUR PHYSICAL STATUS IS BASED ON THE DEVELOPMENT OF THIS TECHNOLOGY.

THE INVENTION OF THE CLOCK ALLOWED THE MEASUREMENT OF TIME INTERVALS SHORTER THAN THE NATURAL UNITS OF DAY, MONTH AND YEAR. THIS ALLOWED US TO SCHEDULE WITH GREAT PRECISION, HOWEVER IT ALSO CONDITIONED US TO LIVE BY THE CLOCK.

DISAPPEARANCE



VERY SUCCESSFUL TECHNOLOGIES BECOME INVISIBLE, IN THE SENSE THAT WE NO LONGER EXPERIENCE THEM AS TECHNOLOGY.

5,000 BC INVENTION OF THE PLOW

7,000 BC DOMESTICATION OF SEEDS

DISTRIBUTION



FIRE PROVIDED PRIMITIVE MAN WITH A POWERFUL WEAPON AGAINST THE COLD AND DARKNESS, AS WELL AS WILD ANIMALS AND RAW FOOD.

TODAY, WE HAVE OUTFORMED THESE FORMERLY COMBINED FUNCTIONS INTO TECHNOLOGIES SPECIFICALLY SUITED FOR THAT PURPOSE.

COMBINATION



MULTIFUNCTIONAL AND COMPLEX NEW TECHNOLOGIES RENDER NONFUNCTIONAL AND SIMPLER TECHNOLOGIES OBSOLETE.

YOUR SMARTPHONE TAKES OVER THE FUNCTIONS OF YOUR AGENDA, CAMERA AND CD PLAYER, AMONGST NUMEROUS OTHER FUNCTIONALITIES.

IMITATION



NEW TECHNOLOGIES COPY OLDER TECHNOLOGIES THAT PEOPLE ARE FAMILIAR WITH.

USUALLY, THESE OLDER TECHNOLOGIES ARE A LITTLE SLOWER IN THE HIERARCHY.

THEY FULFILL A VITAL ROLE IN OUR DAILY LIVES AND ARE CONSIDERED AUTHENTIC.

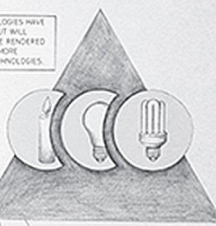
THE RATIONAL BEHIND THIS IS THAT PEOPLE WILL BE MORE COMFORTABLE WITH TECHNOLOGICAL CHANGES WHEN THEY ARE WRAPPED IN RECOGNIZABLE PACKAGING.

COMPETITION



TECHNOLOGIES DON'T CLIMB THE PYRAMID IN ISOLATION, BUT WITHIN A CONTEXT OF COMPETING TECHNOLOGIES. OIL, SOLAR AND NUCLEAR ENERGY ALL STRIVE TO FULFILL OUR ENERGY DEMAND, WHO WILL WIN?

REPLACEMENT



MANY TECHNOLOGIES REACH THEIR PEAK, BUT WILL EVENTUALLY BE RENDERED OBSOLETE BY MORE ADVANCED TECHNOLOGIES.



RISE AND FALL



MOST TECHNOLOGIES CLIMB NO HIGHER THAN HALF-WAY THE PYRAMID BEFORE THEY STABILIZE OR ARE PUGHED BACK TO LOWER LEVELS. EXPECTATIONS OF THE SPACE SHUTTLE WERE HIGH, BUT AFTER BEING APPLIED FOR 20 YEARS IT RETIRED.

PYRAMID OF TECHNOLOGY
HOW TECHNOLOGY BECOMES NATURE IN SEVEN STEPS

2.2.2. Máquinas computadoras

Por supuesto nada de lo descrito previamente sería posible sin la computación, la disciplina que ha propiciado la tercera revolución industrial. Por su relativa juventud, a pesar de su increíble velocidad de desarrollo, la historia de la computación impacta y explica en gran parte la situación actual. Las bases teóricas que la definen son cercanas todavía y aquellos que han vivido su progreso con curiosidad, entenderán con mayor claridad los sucesivos avances y descubrimientos. Debido a su cercanía y estrecha relación, el arquitecto -o el diseñador- actual puede y debe esforzarse en comprender el reino de la computación, ya que no hacerlo implicaría una reprochable desconexión del mundo que le rodea y el desconocimiento de los procesos de esta tesis.

Este capítulo pone de en relevancia el entendimiento de la tecnología frente a su uso. Usar un ordenador o una 'app' es relativamente sencillo y las barreras de aprendizaje disminuyen constantemente, a medida que las interfaces y dispositivos mejoran, entender por qué el ordenador funciona no lo es tanto. Igualmente ocurre en otros campos como la física: entender que un objeto cae cuando lo soltamos es fácil, pero entender por qué cae no lo es. Una tecnología sencilla e intuitiva conlleva el peligro de la magia: al no estar en contacto con los procesos internos que realmente rigen la tecnología el usuario acepta que las cosas "simplemente funcionan", abocándose a un pozo de desconocimiento mientras ignora la realidad que le rodea.

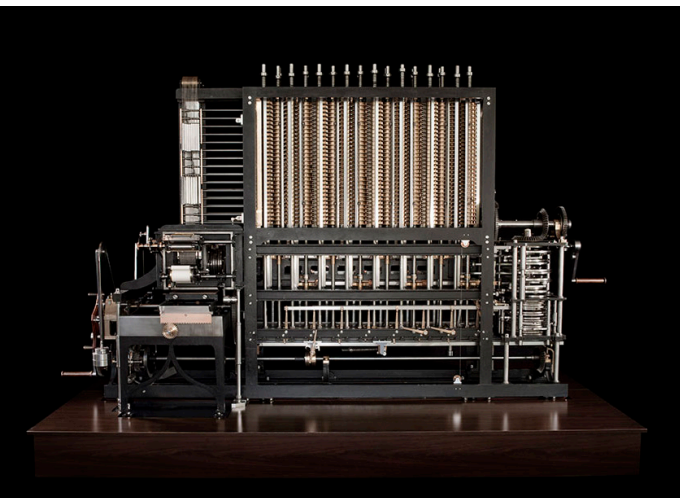
Los 'computers' o computadores, eran originalmente empleados humanos que llevaban a cabo determinadas tareas de cálculo. De ahí el término 'computing machine', que hace referencia a una máquina que realiza el trabajo de los computadores y que aparece en los años 20. A finales de los 40, con la aparición de las primeras computadoras electrónicas (las primeras eran mecánicas) el término 'machine' irá desapareciendo y solo quedará 'computer', que durante un breve periodo de tiempo dispondrá del prefijo 'electronic' o 'digital'. Esta evolución lingüística que puede parecer anecdótica, deja entrever cómo la ciencia de la computación tiene más relación con la lógica y las matemáticas que con los máquinas en sí. El verdadero origen, es desarrollar cálculos -incluso cuando los hace un ser humano- a través de una serie de operaciones.

Charles Babbage fue uno de los primeros en proponer una máquina mecánica -en absoluto digital- compuesta de piñones, varillas, trinquetes y engranajes. que nombraría 'Difference Engine' y que automatizara hojas de cálculo de varios tipos. En 1822 exhibió una parte de la máquina que nunca llegó a terminar, pero que sería completada en 1990 y expuesta en el Londres Science Museum. Babbage también propuso el 'Analytical Engine', una idea mucho más ambiciosa que incluía memoria y condicionales, y que no llegó a terminarse después de su muerte, en 1871¹⁸⁵. Las primeras máquinas que se usaron de manera extendida eran analógicas (las propiedades de los elementos representativos reflejan las mismas propiedades que los elementos representados). James Thompson inventó el 'Differential Analyser' (Analizador

¹⁸⁵ Babbage, Charles, y Martin Campbell-Kelly. *Passages from the Life of a Philosopher*. New Brunswick: Rutgers University Press, 1994. p.97.

Diferencial) que permitía resolver ecuaciones diferenciales por integración a través de un sistema de 'wheel-and-disc' (rueda/bola y disco), sistema que supondría las bases de la computación analógica¹⁸⁶. Este tipo de máquinas servirían para cálculo de artillería durante la Primera Guerra Mundial. Vannevar Bush perfeccionará esta máquina en un modelo semi-automático en 1931, en el MIT -que requería de un habilidoso mecánico y un martillo de plomo para ser puesta a punto-. Por aquel entonces, las computadoras tenían más en común con una bicicleta que con los ordenadores actuales. El mismo Bush sustituiría en los sucesivos años los componentes de 'wheel-and-disc' por sistemas eléctricos.

011. /// Charles Bagage, 'Difference Engine', 1822. Foto de la primera replica completa acabada en 1990, Museo de Ciencia de Londres.



El analizador diferencial puede ser abstraído como una serie de cajas negras que desempeñaban diferentes funciones, su orden y situación debían ser las correctas dependiendo el problema a resolver. Por primigenio que parezca, la manera de proceder no es tan diferente a la organización de componentes dentro de Grasshopper. Quizá esta comparación pueda aportar luz sobre futuras maneras de aproximar el modelado paramétrico.

En 1935, Alan Turing concibió los principios del ordenador moderno, en la Universidad de Cambridge. Turing describía una máquina teórica que consistía en una memoria ilimitada con un escáner que podría moverse adelante y atrás a través de esa memoria, leyendo y escribiendo símbolos¹⁸⁷. Las acciones del escáner estarían en la memoria de la misma máquina en forma de símbolos, lo cual permitiría a la máquina modificar su propio programa. Hoy en día se conoce esa máquina teórica como la Máquina Universal de Turing.

Durante los años de la Segunda Guerra Mundial, en los que trabajó como criptógrafo, Turing demostró su preocupación por las máquinas inteligentes, de la posibilidad de crear computadoras que aprendiesen de la experiencia y que solventasen problemas a través de la búsqueda en el espacio de las posibles soluciones. En la actualidad este término se acuña como búsqueda heurística, y supone uno de los principios básicos para el desarrollo de los algoritmos evolutivos -y de muchos otros-.

La introducción de la computación eléctrica supuso en primera instancia un salto enorme en lo que se refiere a velocidad. A partir de ese momento las únicas piezas "móviles" de la computadora son los electrones. Estas primeras

¹⁸⁶ Thomson, James, y John Tyndall. *On an Integrating Machine Having a New Kinematic Principle*. Londres: S.n., 1876.

¹⁸⁷ Turing, Alan. "On Computable Numbers, with an Application to the Entscheidungsproblem." *Annual Review in Automatic Programming*. 1960. pp. 230-64.

piezas electrónicas consistían en tubos de vacío y fueron desarrolladas por personajes como Thomas Flowers o John Atanasoff en los primeros años de la Segunda Guerra Mundial. Diversos encuentros entre estos personajes y el equipo de criptología (Turing, Gordon Welchman y Max Newman), encargado de descifrar los mensajes secretos de los nazis -encriptados por las máquinas Enigma y Fish-, darán a luz el Colossus I el 18 de Junio de 1944, la primera computadora electrónica digital. Colossus (PL!) contenía aproximadamente 1600 tubos de vacío y sirvió para descifrar los mensajes de la máquina alemana Lorenz. A pesar de que en 1983 el Gobierno Británico dio permiso para difundir la información sobre Colossus y se desclasificaron documentos en 1996, aún hoy en día algunos de ellos son secretos¹⁸⁸.

Turing también planteó la primera especificación completa de un programa almacenado electrónicamente en una computadora digital, llamada 'Proposal for Development in the Mathematics Division of an Automatic Computing Engine (ACE)' a finales de 1945¹⁸⁹. En 1947 William Shockley, John Bardeen y Houser Brattain mejoran y re-aplican el transistor, proyecto que les otorgará el Premio Nobel (1956) y dará el pistoletazo de salida para la creación de computadoras de la manera que hoy las entendemos. El primer cálculo llevado a cabo por una computadora estándar (sin un propósito concreto) con un programa almacenado electrónicamente fue diseñada por los ingenieros F.C. Williams y Tom Kilburn en la 'Royal Society Computing Machine Laboratory at Manchester University'. Fue apodada como 'Baby'. Una versión más grande con un sistema programado por Turing sería la primera computadora comercializada en el mundo. La primera de ellas fue instalada en Febrero de 1951 en la universidad de Manchester.¹⁹⁰

Se omiten en este texto los sucesos cuasi paralelos en Estados Unidos a raíz de los descubrimientos de Turing. Personajes como Claude Elwood Shannon¹⁹¹ sentaron las bases de los circuitos y su uso para la lógica y el álgebra booleana, que más tarde derivaron en los ordenadores ENIAC (Electronic Numerical Integrator and Computer), el cual cuenta con el título oficial de primer ordenador completamente electrónico porque 'Baby' se considera un test experimental no funcional¹⁹². Durante su primera década, el ENIAC realizó más cálculos que toda la humanidad hasta ese momento, las cuales permitirán las primeras predicciones meteorológicas gracias a John Mauchly.

A lo largo de los años que se ha desarrollado esta tesis (2012-2016), la figura de Alan Turing sigue vigente, tanto por sus hipótesis demostradas recientemente,

¹⁸⁸ Alanturing.net. Consultada 31 de enero, 2016. <http://www.alanturing.net/index.htm>

¹⁸⁹ Carpenter, B. E., R. W. Doran, Alan Mathison Turing, Alan Mathison Turing, y Michael Woodger. *A.M. Turing's ACE Report of 1946 and Other Papers*. Cambridge, MA: MIT Press, 1986.

¹⁹⁰ Zientara, Marguerite. *The History of Computing: A Biographical Portrait of the Visionaries Who Shaped the Destiny of the Computer Industry*. Framingham: CW Communications, 1981.

¹⁹¹ Shannon, Claude Elwood, y Warren Weaver. *The Mathematical Theory of Communication*. Urbana: University of Illinois Press, 1949.

¹⁹² Stern, Nancy B. *From ENIAC to UNIVAC: An Appraisal of the Eckert-Mauchly Computers*. Bedford, MA: Digital Press, 1981. pp 181-246.

como por su trágica vida. La influencia del genio continúa presente en pleno siglo XXI:

- 24 de Diciembre de 2013, la Reina de Inglaterra emitió el Indulto Real a Turing¹⁹³.
- 16 de Marzo de 2014, científicos estadounidenses validan la teoría de la morfogénesis de Turing¹⁹⁴.
- 10 de Junio de 2014, un ordenador pasa por primera vez el test de Turing¹⁹⁵.
- 29 de Agosto de 2014, se estrena la película biográfica ‘The Imitation Game’¹⁹⁶.
- 25 de Agosto de 2015, aparecen cartas inéditas de su lucha contra la homosexualidad¹⁹⁷.
- 9 de Diciembre de 2015, se corrobora la teoría de que los problemas cuánticos no pueden ser demostrados como verdaderos o falsos¹⁹⁸.
- 15 de Marzo de 2016, se descubren mecanismos de autoorganización propuestos por Turing en 1952¹⁹⁹.

Son de especial interés para esta tesis las teorías de Turing sobre la morfogénesis (cap. 3.1.1), estudios que se tratarán en los capítulos de carácter biológico. Así como las comparaciones entre Charles Darwin y el mismo Alan Turing, en relación a la comprensión de un sistema emergente capaz de autoreplicarse (evolución y la máquina universal)²⁰⁰.

2.2.3. Diseño por computación

La historia de la computación va intrínsecamente ligada a la historia de los grafismos, a la manera de representar y mostrar a través de la pantalla los procesos computacionales. La industria relacionada con el diseño industrial o el diseño gráfico contiene sus propios avances e implicaciones en el

¹⁹³ Zas, Mónica. “Alan Turing recibe el indulto póstumo.” *eldiario.es*. Consultada 25 de diciembre, 2013. http://www.eldiario.es/turing/Alan-Turing-indulto-homosexualidad_0_210678993.html

¹⁹⁴ J. de J. “Validan una teoría de Alan Turing 60 años después de su muerte.” *ABC*. Consultada 28 de marzo, 2014. <http://www.abc.es/ciencia/20140311/abci-validan-teoria-turing-anos-201403101617.html>

¹⁹⁵ Nieves, José Manuel. “Un ordenador pasa por primera vez el test de Turing y convence a los jueces de que es humano.” *ABC*. Consultada 30 de junio, 2014. <http://www.abc.es/ciencia/20140609/abci-superordenador-supera-primera-test-201406091139.html>

¹⁹⁶ Tyldum, Morten. *The Imitation game*. Reino Unido: The Weinstein Company / Black Bear Pictures / Ampersand Pictures, 2014. Película.

¹⁹⁷ S.a. “Nuevas cartas revelan la lucha de Alan Turing con su sexualidad.” *El País*. Agosto, 2015. http://elpais.com/elpais/2015/08/25/ciencia/1440514825_762019.html

¹⁹⁸ Cubitt, Toby, Perez-Garcia David, y Wolf, Michael. “Undecidability of the spectral gap.” *Nature*. n°528. Consultada 28 de diciembre, 2015. <http://www.nature.com/nature/journal/v528/n7581/full/nature16059.html>

¹⁹⁹ Criado, Miguel Ángel. “Los misteriosos círculos de hadas’ confirman las teorías de Alan Turing.” *El País*. Consultada 29 de marzo, 2016. http://elpais.com/elpais/2016/03/14/ciencia/1457973640_961331.html

²⁰⁰ Cooper, S. B., y J. Van Leeuwen. *Alan Turing: His Work and Impact*. Waltham, MA: Elsevier, 2013.

desarrollo de la arquitectura. Con ello, no pretende presentarse una mera exposición de lo computacionalmente gráfico, sino sus implicaciones en la lógica y el pensamiento conceptual. Las herramientas siguen influenciando a sus usuarios y los movimientos intelectuales: en el simposio ‘Is Darwin Dead?’²⁰¹, el artista y arquitecto teórico Greg Lynn defiende una anticipación de la ideología computacional-arquitectónica previa a la aparición de los propios ordenadores mientras enseña sus esbozos proto-digitales.

Architects do not make buildings, they make drawings of buildings.
ROBIN EVANS

Los arquitectos siempre han dibujado antes de construir, un acto más que diferencia la arquitectura de la construcción. El dibujo representa la facultad del arquitecto para predecir posibles diseños. Nuevos métodos de representación dan lugar a nuevos estilos. La perspectiva del Renacimiento o la “geometría proyectiva” del Modernismo han marcado pasos importantes en el diseño.

El dibujo tradicional es un proceso aditivo en el cual sus partes no garantizan asociaciones relativas y donde su consistencia interna es confiada al dibujante. El papel, el lápiz, el compás... herramientas centenarias que se basan en un código y convenciones pero que no interactúan en manera alguna entre sí o el medio. Sus detractores argumentarán que el proceso de dibujo es distinto al mecanicismo cognitivo de creación, que relaciona ideas; que al dibujo no pueden aplicarse fuerzas (como la gravedad) u otras variables que condicionen el diseño. Igualmente cierto es que la conexión directa entre mano y cerebro es irremplazable, que su flexibilidad, rapidez e intuición son difícilmente replicables²⁰². Sin embargo, son sus carencias -y no sus virtudes- las que brindan una gran oportunidad al dibujo asistido por computación.

El antiguo “arte” del dibujo técnico de planos arquitectónicos²⁰³, será sustituido por la tecnología CAD (Computer Aided Design) fomentados principalmente a través de las industrias militares, automovilística y aeroespacial. Durante los años 60 -publicadas por primera vez en 1962-, Pierre Bezier (arts et Metiers PareisTech, Renault) popularizará el uso de las curvas Bezier –mejorando su comportamiento a través de ‘handlers’-, un elemento geométrico que permite el trazado de líneas curvas desarrollado en 1959 por Paul de Casteljaou. Pierre Bézier incorporará dichas curvas a la industria automovilística para describir las superficies de los automóviles. Pocos años más tarde, entre 1966 y 1968 desarrollará el programa de modelado para automóviles UNISIRF, que servirá de base para las futuras generación de CAD. Las curvas Bezier se convertirán en el estándar para programas de diseño gráfico como el

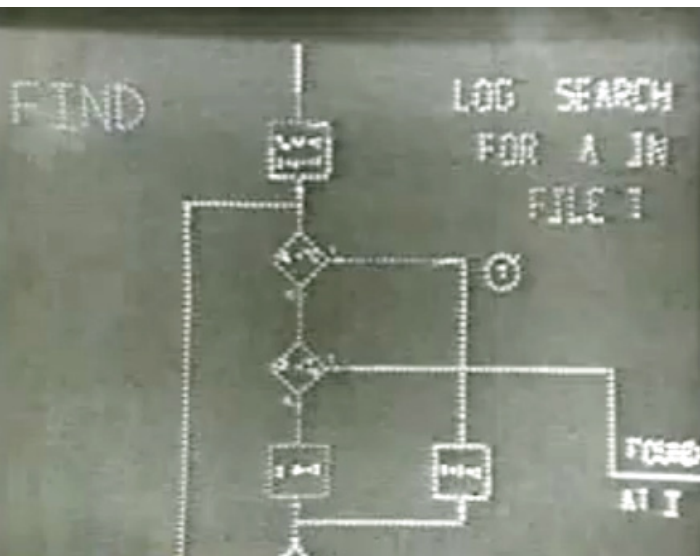
²⁰¹ Architizer. “Is Drawing Dead?” Yale Symposium, 2012. <http://architizer.com/blog/a-history-of-technology-in-the-architecture-office/>

²⁰² El uso de tabletas gráficas con bolis electrónicos capaz de captar inclinación y presión, así como algoritmos que simulan las imperfecciones del dibujo a mano, contribuyen a desdibujar la frontera entre el dibujo manual tradicional y el digital por ordenador.

²⁰³ Little, Charles. *The Universal Drafting Machine*. Cleveland: Universal Drafting Machine, 1902.

Adobe Illustrator o el Corel Draw y son las antecesoras de las NURBS²⁰⁴, curva esencial en el ecosistema de Rhinoceros y de otros programas como Illustrator o CATIA. El CAD permitirá por primera vez a los diseñadores -los arquitectos- introducirse en el mundo de la computación, es la promesa de que los ordenadores no son solo herramientas para los informáticos. En 1977 Dassault programa CATIA, la primera aplicación de CAD comercializada (orientada a la ingeniería principalmente). Diseñado por Samel Geisberg en 1988, Pro/ENGINEER se convierte en el primer software “CAD-paramétrico” con capacidades tridimensionales, las cuales heredará más tarde CATIA, en 1993.

012. /// Captura de pantalla del Sketchpad mostrando un esquema de flujos.



Con todo, el “programa” que ostenta el título de primer ‘software CAD’ es el Sketchpad²⁰⁵, programado en 1963 por Ivan Sutherland. El Sketchpad permitirá a los diseñadores dibujar en los monitores usando “bolis de luz”, gracias al cual se podrán crear y modificar objetos gráficos (puntos, líneas, arcos...), y hacer copias ilimitadas del dibujo. Sutherland anticipa con este proyecto conceptos tan relevantes como el CAD (Computer Aided Design) o las interfaces (también conocidas como GUI, ‘graphical user interface’). Más relevante aun, incorporaba relaciones entre la geometría que se dibujaba, hecho que tardaría décadas en adquirirse desde los programas comerciales. Por ejemplo, si se movía uno de los puntos asociados a un vector, también se

movía el otro punto y, consecuentemen, el vector en sí. Esta lógica asociativa se llamaba ‘atomic constraint’ y era representada de manera visual a través de un esquema, sin duda alguna, de una manera muy similar a los programas actuales de programación visual. Por todas estas razones, el Sketchpad merece especial reconocimiento, ya no por ser el primer programa de dibujo CAD, sino por plantear las bases de lo que son hoy los programas paramétricos.



La representación digital de la geometría fue y sigue siendo un campo de gran interés y conflicto. Con la progresiva evolución del software, la demanda por la visualización realista se vuelve más apremiante, obligando al desarrollo de mejor hardware dedicado a reproducir y optimizar los gráficos para el ordenador que se enfocaran principalmente a simulación, animación (cine) y videojuegos. Esta vertiente, comúnmente llamada CGI (‘computers graphics imagery’) tiene especial interés para el arquitecto ya que trasciende el mero

²⁰⁴ NURBS: Non-uniform rational B-spline. A su vez, una Spline es una curva compleja definida por una geometría más simple: una sucesión de puntos (o polinomios de grado bajo).

²⁰⁵ Sutherland, Ivan Edward. *Sketchpad: A Man-machine Graphical Communication System*. Nueva York: Garland Pub., 1980.

dibujo representativo para hablar de procesos que simulen comportamientos varios. Maximizar esos procesos permite alcanzar nuevas cotas de complejidad y velocidad que afectan directamente a la capacidad de simular en tiempo real. Durante los primeros años de historia, las técnicas de CG (computer graphics) se aplicaban casi exclusivamente en el ámbito de los videojuegos²⁰⁶. El primero de ellos²⁰⁷, el Spacewar!²⁰⁸, marcó un hito histórico en lo que se refiere a la interacción máquina-humano. El primer programa de modelado 3D (sólido) salió a la luz en 1972, MAGI SythaVision, que fue usado para la película de Tron (1982), la primera película con efectos creados por ordenador.

La visualización (o renderizado) en computación se dividía en técnicas de rasterizado²⁰⁹ y técnicas vectoriales²¹⁰. Las líneas vectoriales son más limpias y exactas, pero menos versátiles. Mientras que el sistema de pixels por rasterización no puede reproducir semejante definición, sí que es capaz de producir escenas más complejas y figuras opacas. El uso de 'sprites' y fondos pre-renderizados también eran aspectos positivos de la tecnología de pixels. Estas virtudes llevarían al sistema de pixels a imponerse en el mundo de los videojuegos. Durante la segunda mitad de la década la adopción de los gráficos 3D plantea la disyuntiva entre el sistema de polígonos y el de voxels. En este caso, los voxels eran pixels tridimensionales²¹¹ (volumétricos, de ahí la palabra), una tecnología que quedaría obsoleta pero que más tarde cobraría importancia²¹². Por el contrario, los polígonos permitían aplicar texturas (imágenes, materiales...) a cada una de sus caras, falseando así el resultado final. A partir de ese punto, la industria se concentra en conseguir mayor número de polígonos y texturas de mayor resolución, pero también aparecen efectos superpuestos que acercan visualmente al fotorrealismo y el correcto tratamiento de la luz como desenfokes, destellos, partículas (niebla y otras atmosferas), iluminación global, filtros de color, etc.²¹³ Sin embargo, algunas técnicas están rescatando y mejorando la tecnología de voxels, permitiendo sustituir el mapeado de texturas -la capa de relieve (bump o normal) por

²⁰⁶ Brown, Stuart. "Pixel Pioneers: A Brief History of Graphics, Part One." *Youtube*. Consultada 11 de enero, 2015. <https://www.youtube.com/watch?t=26&v=dzN2pgL0zeg>

²⁰⁷ Anteriormente ya se había desarrollado otro tipo de software lúdico, generalmente entorno a juegos de mesa como el Nimrod o el OXO, así como el 'Tennis for two' que utilizaba una computadora que calcula la trayectoria de los misiles balísticos. Velasco, *Tennis for Two, uno de los primeros videojuegos de la historia*. Julio de 2011. <http://hipertextual.com/2011/07/tennis-for-two-uno-de-los-primeros-videojuegos-de-la-historia>

²⁰⁸ Desarrollado por Steve Russell en un ordenador PDP-1 (MIT) en 1962

²⁰⁹ *Star Cruiser*, Ramtek, 1977. Videojuego.

²¹⁰ *Space Wars*, Cinematronics, 1977 (versus *Star Cruiser*, Ramtek, 1977, usando rasterizado). Videojuego.

²¹¹ *Delta Force*, Novalogic, 1998. Videojuego. *Outcast*, Appeal, 1999. Videojuego.

²¹² Brown, Stuart. "Polygon Realm: A Brief History of Graphics, Part Three." *Youtube*. Consultada 11 de enero, 2015. <https://www.youtube.com/watch?v=qxM9pMEJQ0>

²¹³ Actualmente, tanto la industria del cine como la de los videojuegos continúan usando la tecnología de polígonos (de hecho, la mayoría de nuestros programas de modelado 3D también) y las tarjetas gráficas, que permiten acelerar la representación de estos polígonos, se consideran básicas en cualquier equipo de hardware.

ejemplo-, por otra verdaderamente tridimensional llamada ‘displacement’²¹⁴. El caso más sobrecogedor es el proyecto Euclidean, donde comienza a plantearse un paralelismo entre pixels digitales y partículas reales²¹⁵ y que actualmente se está redirigiendo a tecnología de escaneo y holografía²¹⁶. Probablemente, este tipo de tecnologías basado en partículas unidas al modelado algorítmico de tipo procedural, definirán los nuevos estándares de modelado y representación 3D.

En computación se considera ‘procedural generation’ la creación de datos (información o geometría) que se crea de manera automática gracias a un algoritmo. Este algoritmo dicta los pasos “en tiempo real”, decidiendo los resultados en base a la situación actual. Comúnmente se usa para crear texturas infinitas (porque el patrón crece a partir del estado actual) o modelos 3D. Gracias a este tipo de modelado pueden generarse grandes cantidades de contenido con poca información y los resultados pueden ser aleatorios y poco predecibles (positivamente, si así se desea): desde variaciones de una especie animal²¹⁷ hasta un universo con trillones de planetas²¹⁸. Una de las claves que permite la ligereza en el modelado de lo procedural es la inexistencia de toda la geometría. Al igual que el ADN -que los genotipos y los fenotipos-, lo procedural tiene las fórmulas matemáticas para crear un universo pero ningún ordenador podría soportar esta tarea. Por ello, el algoritmo solo modela, solo muestra, aquello que está al alcance de nuestra vista. En los videojuegos por ejemplo, a medida que caminamos los algoritmos construyen la geometría que necesitamos y desechan la que queda detrás. Este proceso es el que permite la eficiencia computacional. Como el algoritmo es el mismo y se basa en la posición, volver atrás significa volver a introducir los mismos valores y por lo tanto el resultado será el mismo también. David Rutten (desarrollador del plug-in Grasshopper) especula con una idea similar en uno de sus posts²¹⁹, abordando la gestión del límite visual -y por tanto la cantidad de geometría modelada- de una manera diferente a la usual: mediante la generación de un planeta esférico de tamaño reducido que se reconstruye constantemente aprovechando la cercanía del horizonte que aporta las características del planeta. Sin duda, son procesos realmente interesantes para el “arquitecto programador” que frecuentemente se ve limitado por la capacidad computacional de los ordenadores.

²¹⁴ La tecnología displacement también puede usarse con carácter poligonal y en este caso solo hace referencia a la creación de una textura verdaderamente tridimensional que arroja sombras y recibe luz de su entorno.

²¹⁵ Youtube. “Unlimited Detail Real-Time Rendering Technology Preview 2011 [HD].” Consultada 18 de enero, 2015. <https://www.youtube.com/watch?v=00gAbgBu8R4>

²¹⁶ Dell, Bruce. “Euclidean Holoverse virtual reality games revealed.” Youtube. Consultada 18 de enero, 2015. <https://www.youtube.com/watch?v=4pFAgf3PUK8>

²¹⁷ Chaotic Atmospheres. *Biotop from polygonia*. 2013. Consultada 11 de enero, 2015. <http://chaoticatmospheres.com/biotop-from-polygonia>. <http://www.thisiscolossal.com/2014/12/randomly-generated-polygonal-insects-by-istvan-giordano-for-neonmob/>

²¹⁸ *No Man's Sky*. Hello games, 2016.

²¹⁹ Rutten, David. “A half-arsed idea for a computer game.” *I Eat Bugs For Breakfast*. Septiembre, 2012. <http://ieatbugsforbreakfast.wordpress.com/2012/09/30/a-half-arsed-idea-for-a-computer-game/>



013. /// Chaotic Atmospheres, *Biotop from polygonia*, 2013. Imagen de la web del autor: <http://chaoticatmospheres.com/biotop-from-polygonia>. Varios insectos procedurales generados por ordenador.

Al contrario que otros campos puramente audiovisuales, el diseño técnico requiere de una precisión y exactitud que el modelo poligonal (o mesh) no puede alcanzar. Esto es, salvando la obviedad, porque elementos como las esferas son representados mediante polígonos, y en elementos bidimensionales como una curva por polilíneas. Por su condición de poligonal, todas las geometrías están formadas por matrices de puntos (vértices) que forman superficies planas (caras) al unirse entre ellos mediante líneas (aristas). A raíz de esta matriz de puntos reciben el nombre de ‘meshes’, mallas. Cualquier elemento tiene un número limitado y determinado de caras cuando se crea, por ejemplo una esfera de 100 caras. Probablemente 100 caras son suficientes para que el ojo humano entienda todos esos polígonos como una superficie curva, pero si nos aproximamos mucho a ella, buscando el detalle, descubriremos que su superficie no es realmente curva, sino poligonal. Las meshes son, en cierto modo, aproximaciones facetadas de la geometría a la que referencian.

Por el contrario, el dibujo vectorial ofrece una exactitud sin precedentes, cuya geometría se basa en ecuaciones y las geometrías simples que las generan. En el caso de la esfera, puede ser creada entre otras muchas posibilidades a través de un centro y un radio. Esos son los valores exactos para dibujar una esfera perfecta. No importa cuánto nos acerquemos o cambiemos de tamaño la esfera, siempre será perfecta porque se basa en parámetros numéricos en base a la función de la esfera. Cabe mencionar, que cuando estas geometrías se nos muestran en nuestras pantallas lo hacen todavía en forma de polígonos, meshes, porque es la manera más eficiente de hacerlo. Por estos motivos, el dibujo vectorial se impondrá en el diseño industrial y técnico.

Por supuesto, durante los primeros años de desarrollo de CAD y CGI, la idea de diseñadores autónomos que trabajaban desde sus casas en los PCs aún estaba lejos y solamente las grandes compañías como IBM podían permitirse esta clase de avances. Los diseñadores llevaban sus trabajos al “departamento de CAD”, el cual se encargaba de transformar sus dibujos en información digital susceptible de ser reproducida a través de ‘Minicomputers’²²⁰.



²²⁰ A pesar de su nombre, las minicomputers podían llegar a pesar varias toneladas. Una de las primeras, la Digital Equipment Corporation (DEC) 12-bit PDP-8, lanzada en 1964 con un valor de 16.000\$.

Los años 80 traerán los ordenadores personales, primeramente de mano de Apple y poco más tarde y de manera más exitosa, por Windows. CATIA, producido por Dassault Systems en 1982, fue del primer software plenamente funcional y comercial en desarrollar modelos 3D. En 1989 Frank Gehry usará el CATIA -una versión modificada orientada a la arquitectura (o mejor dicho, a la construcción)- para diseñar el ‘Disney Concert Hall’²²¹. Pocos años más tarde el mismo arquitecto diseñará la escultura el ‘Peix’ del puerto olímpico de Barcelona (1989-1992). En 1997 (adelantando así al ‘Disney Concert Hall que no se terminará hasta 2003) se inaugurará el archiconocido Museo Guggenheim Bilbao, demostrando no solo la importancia del CAD para con el dibujo sino también su repercusión con la fabricación (CAM: computer aided manufacturing) y construcción de elementos complejos. El proyecto ‘Fish Dance Restaurante’ (1986-1987) del mismo autor es contemporáneo de esos años pero no han podido encontrarse evidencias del uso de CATIA. Junto al CATIA, merece reconocimiento el software Pro/ENGINEER, un programa de ingeniería que introdujo por primera vez relaciones entre geometrías tridimensionales 1987, actualizando las piezas interconectadas y la representación 2D de las mismas, de una manera muy parecida a los programas de BIM actuales. En los 90 se da la explosión de los PCs muy de la mano de AutoCAD (Autodesk) cuya primera versión también vio la luz en Noviembre de 1982. En lo sucesivo llegarán entre los más importantes TopSolid, Microstation y SolidWorks para “CAD puro, vectorial”; Maya y 3Dstudio (Autodesk), para modelado poligonal; ArchiCAD (Graphosoft), Allplan (Nemetschek) y Revit (Revit Technology)²²² para BIM.

La exhibición “Archeology of the Digital”²²³ mostró alguno de los primeros ejemplos de arquitectura digitalizada: incluyendo la residencia Lewis, por Frank Gehry (1985–1995); el proyecto no construido Biozentrum de Peter Eisenman (1987); la ‘Expanding Sphere’ de Chuck Hoberman (1992), y las estructuras de la cubierta del gimnasio de Odawara, por Shoen Yoh (1991) y el Galaxy Toyama Hall (1992). El CAD sin embargo es acusado de servir a los mismos propósitos del movimiento moderno, sin incorporar las nuevas filosofías intrínsecas de la computación. En los años 60, la arquitectura de vanguardia trata de forzar los límites del dibujo tratando de representar fuerzas y metodologías que lleven a un proceso generativo²²⁴, pero estas no se verán respaldadas por la industria del software y tardarán en ser incorporadas al modelo computacional.

La tipología arquitectónica, basada en la variación de la forma (form-making) dentro de un grupo específico de soluciones, es atacada a finales del siglo XX por una nueva manera de crear forma (form-finding) basada en relaciones complejas y asociativas que dependen de materiales, forma y estructura. Gaudí, Isler, Otto, y Musmeci, rechazaron la tipología en pos de la forma

²²¹ El edificio se termina en 2003, seis años más tarde que el Museo Guggenheim de Bilbao.

²²² En la actualidad Revit pertenece a Autodesk desde 2002 y es uno de los principales buques insignia del BIM.

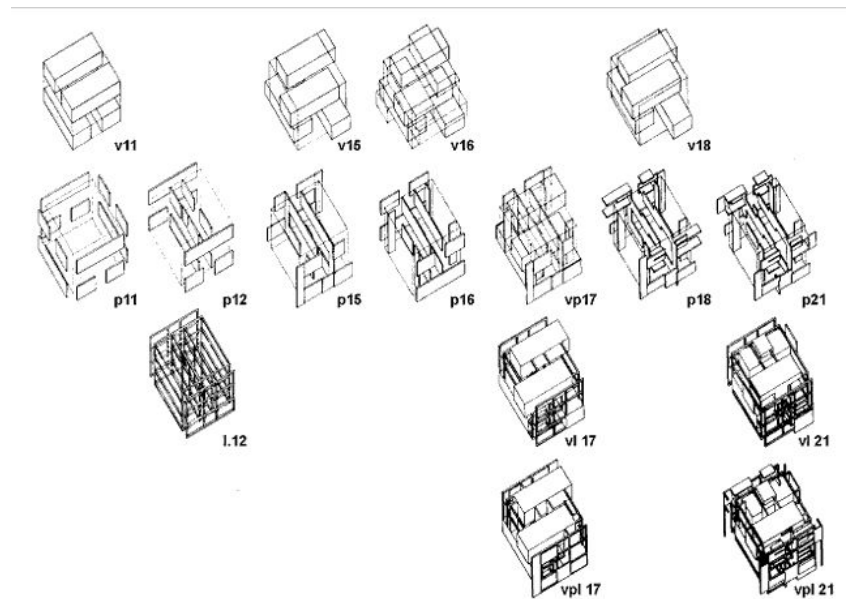
²²³ Greg Lynn (comisario). *Archeology of the Digital*, Canadian Centre for Architecture (CCA), 2013.

²²⁴ Peter Eisenman, *Eisenman’s diagram for House IV*, 1971.

propia²²⁵. Como sus diseños no partían de ideas preconcebidas, el dibujo tradicional no podía predecir el resultado final. Dependían de modelos físicos basados en telas, burbujas, cables, ramificaciones...²²⁶

014. /// Peter Eisenman, *Eisenman's diagram for House IV, 1971.*

Más recientemente, Patrick Schumacher hace referencia a esta nueva manera de diseñar cuando habla de aproximar la arquitectura computacionalmente, pero también Neri Oxman cuando busca software capaz de gestionar la organización de la materia, diseñar el interior de un material geoméricamente de la misma manera que lo hace la naturaleza. Incluso aquellos programas que han expandido los horizontes de la geometría en cuanto a CAD y CAM se refiere, han provocado una saturación de expresión formal excesiva, aun dominada por diseños top-down favoreciendo forma sobre proceso en la materia y sus subsecuentes implicaciones. Esta tesis y muchos de los plug-ins mencionados demuestran la tendencia y necesidad hacia software que replique nuevos conceptos en lugar de asistir -o potenciar- las viejas ideologías²²⁷.



2.2.4. El lenguaje de la lógica

Continuando con el discurso sobre la computación y las herramientas que han surgido de ella, es menester recoger aquí la universalidad de un lenguaje lógico, matemático, que no depende necesariamente de la computación, pero cuya manera de pensar repercutirá en los sucesivos conceptos. A tratar: primero, la conceptualización de los algoritmos con una mirada -o forma de pensar- computacional. Segundo, los lenguajes de programación digital y su repercusión en el proceso de diseño, haciendo especial hincapié en el dilema sobre su aprendizaje en disciplinas externas.

El presente capítulo sirve como prefacio a posteriores apartados que

²²⁵ Gaudí, Antoni. *Iglesia de la Colonia Güell*. Barcelona, 1980. Isler, Heinz, *Service Station*, Solothurn, Suiza, 1968. Otto, Frei. *Pabellón Alemán*, Expo del 67, Quebec, 1967. Musmeci, Sergio. *Bridge over the Basento River*, Potenza, 1974.

²²⁶ Tedeschi, Arturo, Fulvio Wirz, y Stefano Andreani. *AAD, Algorithms-aided Design: Parametric Strategies Using Grasshopper*. Brienza, Italy: Le Penseur Publisher, 2014.

²²⁷ Oxman, Neri. *Material-based design computation*, Massachusetts Institute of Technology. 2010, p.168.

profundizarán en detalle sobre determinados programas (Grasshopper y plug-ins, cap. 2.2.5) y en las implicaciones de lo paramétrico en el software, el diseño y la arquitectura (meta-diseño y parametricismo, cap. 2.3).

Ecuaciones y algoritmos

A pesar de su apariencia compleja, los algoritmos se encuentran a día de hoy en las cosas más comunes y cercanas. La lista de amigos de una red social, enseñar a los robots a aprender e imaginar, situar una página web en un buscador, la comprensión o encriptación de datos... Los algoritmos han logrado que los desarrolladores de software sean los constructores del mundo moderno²²⁸,

La definición habitual por la RAE del término es “Conjunto ordenado y finito de operaciones que permite hallar la solución de un problema”. Originalmente, el término algoritmo deriva de Al-Khwarizmi/Al-Juarismi, un matemático persa que vivió entre 780 y 850 d.C., aunque se han encontrado trazas del uso de resolución de factorización y raíces cuadradas en Babilonia. Los comienzos de lo que hoy consideramos un algoritmo moderno puede rastrearse en los años 30 a través de una serie de hitos teórico/matemáticos: las funciones recursivas de Godel-Herbrand-Kleene, los cálculos lambda de Alonzo Church, formulaciones de Emil Post, y las máquinas teóricas de Alan Turing. Sin embargo, la actualidad entiende una concepción más amplia del algoritmo capaz de manejar diferentes estructuras de datos más allá de las numéricas/simbólicas²²⁹.

Según Donald Knuth un algoritmo informático ha de caracterizarse por estas propiedades:

- **Finitud:** siempre ha de tener un fin, ya sea automático determinado por un valor de tiempo alcance de un resultado o no²³⁰.
- **Definitud:** Cada línea debe estar claramente definida (debe tener instrucciones bien definidas con pasos específicos, marcados por un tiempo secuencial).
- **Entradas:** Los ‘inputs’ han de darse antes de que se inicie el algoritmo.
- **Salidas:** Los ‘outputs’ estarán relacionados con los inputs.
- **Efectividad:** Debe ser efectivo en resolver el problema para el que fue diseñado y ha de poder reproducir el mismo algoritmo con papel y lápiz.

²²⁸ Futurism. “What are algorithms.” <http://futurism.com/images/what-are-algorithms/>

²²⁹ Cormen, Thomas H., Charles Eric. Leiserson, y Ronald L. Rivest. *Introduction to Algorithms*. Cambridge, MA: MIT Press, 1990.

²³⁰ En algunos casos el objetivo del algoritmo puede ser infinito o simplemente continuo/repetitivo, en cuyo caso el algoritmo nunca llegará a detenerse. Dicho de otra forma, sí que se detiene pero algunas de sus partes se repiten por no haber hallado una solución o porque están programadas para iniciarse de nuevo al término del mismo. Por ejemplo, un algoritmo que ejecuta la lógica de la serie de Fibonacci nunca terminará debido a la infinidad de la misma.

...y constará de las siguientes partes:

- Argumentos
- Variables
- Procedimientos
- Condicionales estructurales
- Retornos

Los algoritmos por definición también constan de un estado abstracto. Cada algoritmo es independiente de su implementación, son estructuras de primer orden que no se ven modificadas por el contexto o situación y por tanto, aplicable en infinidad de situaciones siempre y cuando los datos de entrada (inputs) sean válidos.

Para el arquitecto es de interés comprender que el algoritmo no necesariamente está relacionado con la computación, sino con la lógica, con la matemática, con un proceso de acciones. El arquitecto en su proyectar frecuentemente hila un número de decisiones donde cada cual repercute en la siguiente: me separo X de los límites, trazo un círculo en el centro de mis nuevos límites, divido el círculo, elevo una parte a X metros y la otra a X/2, sobresale de las piezas resultantes un alero de Y cm. y así sucesivamente. Estas decisiones conforman el algoritmo del proyecto, que debería ser susceptible de ser aplicado en diferentes contextos cuando las necesidades del proyecto sean las mismas.

Los casos de algoritmo más simples, como las instrucciones para construir un objeto, normalmente constan de valores fijos que no cambian: las instrucciones propias de un mueble específico cuyas medidas siempre son las mismas. Pero si las condiciones que determinan los 'inputs' (información de entrada) son cambiantes por el paso en el tiempo o su entorno, esos valores han de considerarse como variables. Ya de por sí, la descripción abstracta del algoritmo implica la identificación de variables (valores que pueden cambiar durante el proceso o que pueden ser diferentes en el momento de introducirlos en el algoritmo por su expresión como contexto cambiante). Las variables representan el aspecto más paramétrico de los algoritmos, su parte más flexible y adaptativa.

Los algoritmos pueden concebirse como una función que transforma los datos de un problema en los datos de una solución. Dependiendo de la escala que se considere, este entendimiento es más próximo a la manera de entender el software paramétrico usado en la tesis, Grasshopper (GH). Como se verá, los archivos de Grasshopper suponen un algoritmo de por sí: en base a unos 'inputs' se extrae unos 'outputs', normalmente en forma de geometría. Sin embargo, esa es la concepción más abstracta de cara al usuario, pues cada una de las piezas que componen esos archivos -llamadas componentes- son pequeñas funciones que transforman los datos de entrada en salida, ejemplificados por Grasshopper como pilas con puntos de entrada y salida. Los algoritmos pueden ejecutarse a través de diferentes técnicas. Grasshopper es por definición un algoritmo determinístico (el comportamiento del algoritmo es lineal: cada paso del algoritmo tiene únicamente un paso

sucesor y otro antecesor). No obstante, algunas de sus partes pueden incluir diferentes técnicas que permitan mejor resolución de problemas. En esta tesis se nombran entre otros, los plug-ins de Galápagos, Goat u Octopus.

Considerar y entender las diferentes técnicas en el diseño de algoritmos puede favorecer la resolución de problemas lógicos y su entendimiento más allá de la explícita aplicación para con la computación²³¹.

- Algoritmos voraces (greedy): seleccionan los elementos más prometedores del conjunto de candidatos hasta encontrar una solución. En la mayoría de los casos la solución no es óptima.
- Algoritmos paralelos: permiten la división de un problema en subproblemas de forma que se puedan ejecutar de forma simultánea en varios procesadores.
- Algoritmos probabilísticos: algunos de los pasos de este tipo de algoritmos están en función de valores pseudoaleatorios.
- Algoritmos determinísticos: el comportamiento del algoritmo es lineal: cada paso del algoritmo tiene únicamente un paso sucesor y otro antecesor.
- Algoritmos no determinísticos: el comportamiento del algoritmo tiene forma de árbol y a cada paso del algoritmo puede bifurcarse a cualquier número de pasos inmediatamente posteriores, además todas las ramas se ejecutan simultáneamente.
- Divide y vencerás: dividen el problema en subconjuntos disjuntos obteniendo una solución de cada uno de ellos para después unirlos, logrando así la solución al problema completo.
- Metaheurísticas: encuentran soluciones aproximadas (no óptimas) a problemas basándose en un conocimiento anterior (a veces llamado experiencia) de los mismos.
- Programación dinámica: intenta resolver problemas disminuyendo su coste computacional aumentando el coste espacial.
- Ramificación y acotación: se basa en la construcción de las soluciones al problema mediante un árbol implícito que se recorre de forma controlada encontrando las mejores soluciones.
- Vuelta atrás (backtracking): se construye el espacio de soluciones del problema en un árbol que se examina completamente, almacenando las soluciones menos costosas.

Código y programación

*Ninety-eight percent of the thrill comes from knowing that the thing you designed works, and works almost the way you expected it would. If that happens, part of you is in that machine*²³². TRACY KIDDER

Un lenguaje de programación es un lenguaje formal diseñado para expresar procesos que pueden ser llevados a cabo por máquinas como las computadoras.

²³¹ Brassard, Gilles, y Paul Bratley. *Fundamentos De Algoritmia*. Madrid: Prentice Hall, 1997.

²³² Kidder, Tracy. *The Soul of a New Machine*. Nueva York: Modern Library, 1997.

El código, es la manera de expresar los algoritmos en computación.

*One of the most marketable skills in the digital world: the ability to code. How necessary is it, really? and is that even the right question?*²³³.
JOHN PAVLUS

La pregunta es recurrente y con frecuencia los arquitectos que acuden al máster de Arquitectura Biodigital, ya sean jóvenes candidatos o alguien dispuesto a reciclarse/actualizarse, suelen preguntar lo mismo tarde o temprano: ¿deberían los arquitectos aprender a programar²³⁴? El arquitecto tiene a su alcance por primera vez en su historia la herramienta para generar y construir su propia naturaleza, un proyecto que emerja por sí solo como resultado de sus variables. La manera de acceder a ella sin embargo, ha despertado cierta inquietud. ¿Cómo ha de reformularse el arquitecto para llevar a cabo semejante cambio?

El impacto de la computación es sin duda un valor que difícilmente puede ser obviado o descartado. ¿Dónde quedarían el resto de ciencias sin el potencial de la informática? La computación es la ciencia de la simulación, quizás la que tiene más probabilidades de aunar las demás bajo un mismo paraguas, la única con potencial suficiente para replicar todo aquello que nos rodea. A falta de comprender y dominar lo real, lo virtual es nuestra herramienta más capacitada. A medida que esa parte digital se torna más compleja y capaz, también se inserta de manera paulatina -o no tanto- en la vida cotidiana. Los algoritmos digitales (las líneas de código) están presentes en gran parte de ámbitos que nunca habríamos sospechado. El algoritmo de búsqueda del cuasi todopoderoso Google, su sistema de valoración de webs (Pagerank)²³⁵, tiene un impacto abrumador sobre qué vemos y qué no. Facebook no te muestra una gran parte de cosas que “deberías” ver, y las selecciona mediante un algoritmo²³⁶. El 75% de la actividad de los mercados globales la ejecutan unos algoritmos llamados “caja negra”, no un lobo de Wall Street²³⁷. Compresión y encriptación de datos, como en archivos .rar o mensajes de Telegram o Whatsapp. Los algoritmos digitales se adentran también en campos más humanos y sentimentales, escriben poesía²³⁸ o pintan²³⁹, te buscan pareja on-

²³³ Pavlus, John. “Should you learn to code?” *Co-design*. Consultada 29 de junio, 2014. <http://www.fastcodesign.com/3031413/design-for-living/should-you-learn-to-code>

²³⁴ Nate. “Should Architects Learn to Code?” *Proving Ground*. Consultada 30 de septiembre, 2015. <http://provingground.io/2015/09/03/should-architects-learn-to-code/>

²³⁵ Google. “Method for node ranking in a linked database.” Consultada 18 de enero, 2015. <http://www.google.com/patents/US6285999?hl=es>

²³⁶ Facebook. “¿Cómo se deciden las historias que se mostrarán en la sección de noticias?” Consultada 18 de enero, 2015. <https://www.facebook.com/help/327131014036297/>

²³⁷ Desjardins, Jeff. “How algorithms have changed the face of wal Street.” *Visual Capitalist*. Consultada 27 de junio, 2014. <http://www.visualcapitalist.com/algorithms-changing-wall-street/>

²³⁸ Popescu, Adam. “Why write your own book when an algorithm can do it for you?” *readwrite*. Consultada 31 de enero, 2013. <http://readwrite.com/2013/01/15/why-write-your-own-book-when-an-algorithm-can-do-it-for-you>

²³⁹ Vimeo. “e-David Robot Painting.” 2013. Consultada 25 de enero, 2015. <https://vimeo.com/68859229>

line, o incluso deciden qué debe tener el nuevo show televisivo de impacto mundial²⁴⁰. Componen canciones o alargan infinitamente las que ya existen²⁴¹. Escriben noticias de actualidad en tiempo record²⁴² o descubren relaciones históricas que habíamos pasado por alto²⁴³.

Los algoritmos están presentes en nuestra vida, nosotros los creamos y ellos nos crean a nosotros.

Enrique Dans recoge en su blog la actividad relacionada con las múltiples facetas de la tecnología, su divulgación y sus efectos en personas, empresas, o la sociedad en su conjunto. Uno de los temas recurrentes es el aprendizaje de las Ciencias de la Computación. El 19 de Mayo de 2014, la facultad de Computer Science and Engineering de la Washington University presenta una serie de datos y gráficas que evidencian un nuevo boom en la era de la computación²⁴⁴, algunos de los cuales se han mencionado en capítulos anteriores. Países como Reino Unido²⁴⁵, Nueva Zelanda, Alemania, Dinamarca o Australia añaden Ciencias de la Computación a la lista obligatoria de asignaturas en primaria²⁴⁶ (dónde Israel fue pionera, instaurándola hace una década ya). En Estados Unidos, más de 20.000 profesores que abarcan desde jardín de infancia a decimosegundo curso han introducido lecciones de código gracias a Code.org²⁴⁷, y 30 distritos de Nueva York y Chicago han acordado iniciar clases de código en escuelas de primaria y secundaria²⁴⁸. Inequívocamente, el sistema de enseñar el paquete ofimático de Microsoft en las asignaturas optativas de informática es erróneo²⁴⁹.

Los alumnos deben entender cómo funcionan los ordenadores, qué hace que los objetos “mágicos” que los rodean funcionen. Integrar la lógica

²⁴⁰ Leber, Jessica. “House of Cards and our future of algorithmic programming.” *MIT Technology Review*. Consultada 28 de febrero, 2013. <http://www.technologyreview.com/view/511771/house-of-cards-and-our-future-of-algorithmic-programming/>

²⁴¹ Paul Lamere. The Infinite Jukebox. MIT. Consultada 4 de febrero, 2015. <http://labs.echonest.com/Uploader/index.html?trid=TRDYOZR1546C898E6C>

²⁴² BBC News technology. “Robot writes LA Times earthquake breaking news article.” Consultada 30 de marzo, 2014. <http://www.bbc.com/news/technology-26614051>

²⁴³ Medium. “When a machine learning algorithm studied fine art paintings, it saw things historians had never noticed.” Consultada 31 de agosto, 2014. <https://medium.com/the-physics-arxiv-blog/when-a-machine-learning-algorithm-studied-fine-art-paintings-it-saw-things-art-historians-had-never-b8e4e7bf7d3e>

²⁴⁴ UW CSE News. “Responding to the explosion of student interest in computer science.” Consultada 31 de mayo, 2014 <https://news.cs.washington.edu/2014/05/19/responding-to-the-explosion-of-student-interest-in-computer-science/>

²⁴⁵ El 11 de Septiembre de 2013 se acordó que en 2014, la asignatura de computing sería obligatoria para todos los colegios de UK iniciándose en primaria.

²⁴⁶ The economist. “A is for algorithm.” Consultada 30 de abril, 2014. <http://www.economist.com/news/international/21601250-global-push-more-computer-science-classrooms-starting-bear-fruit>

²⁴⁷ En Code.org participan celebridades como Bill Gates, Mark Zuckerberg y Chris Bosh.

²⁴⁸ Richtel, Matt. “Reading Writing, arithmetic and lately coding.” *The Nueva York Times*. Consultada 31 de mayo, 2014. http://www.nytimes.com/2014/05/11/us/reading-writing-arithmetic-and-lately-coding.html?_r=0

²⁴⁹ “it focuses on teaching how to use software, but gives no insight into how it’s made, that is just throwing away [England’s] great computing heritage.” Schmidt, Eric. Google’s chairman, 2011.

computacional de manera que resulte útil para todos, incluso aquellos que no serán Ingenieros Informáticos, es el desafío de la educación actual: establecer unas bases útiles sobre computación de la misma manera que lo hacen las matemáticas, la física, la química, la biología... La educación ha de introducir la tecnología como una parte natural del aprendizaje y como un objetivo más de adaptación del alumno al entorno en el que va a vivir, y extender esos cambios a todas las asignaturas que no son tecnología²⁵⁰.

Paralelamente a estas iniciativas educativas, también se advierte un despertar de webs para cursos o auto-aprendizaje: páginas como Scratch²⁵¹, Code.org²⁵² o Codecademy²⁵³, permiten aprender código de manera gratuita y online desde los niveles más básicos. Y estos son solo algunos de los más divulgados entre decenas de nuevas iniciativas: Apps for Good, Greenfoot, Naace, Raspberry Pi, cs4fn, Code Club, NextGen skills, Behind the screen, Young Rewired State, Hack to the future, Girls Who Code, Computing at School, CoderDojo's, Khan Academy, Treehouse, Teach yourself to Code... Cursos abiertos on-line de universidades: Coursera²⁵⁴, Udacity²⁵⁵, MIT OpenCourseWare²⁵⁶, Stanford Engineering Everywhere²⁵⁷, Academic Earth²⁵⁸.

Ahora bien, la programación tiene muchos matices y recovecos. Aprender a programar no es un idioma universal, sino un ecosistema de lenguajes, cada uno especializado en ciertos ámbitos, que mueren y nacen cambiando constantemente para mejorar. Una rápida búsqueda revelará al lector más de un millar de lenguajes. Obviamente, muchos en desuso o muy específicos, reduciendo la lista de los vigentes o de mayor impacto a algo más de una decena.

No pienses que los cursos en Codecademy te convertirán en el programador estrella capaz de sacar tu idea adelante por tu cuenta, pero sí te podrán dar nociones muy interesantes para tomar decisiones al respecto, entender qué es lo que buscas o qué problemas plantea, convertir ideas sencillas en código ejecutable o contribuir a dar forma a determinados temas. O, sobre todo, para dejar de ver la programación como una serie de arcanos indescifrables únicamente al alcance de personas con las que eres incapaz de relacionarte. Aprendizaje simple y atractivo, al alcance de cualquiera, de una

²⁵⁰ Dans, Enrique. "El cambio en la educación: mucho más que ordenadores." *El Blog de Enrique Dans*. Consultada 30 de mayo, 2014. <http://www.enriquedans.com/2014/05/el-cambio-en-la-educacion-mucho-mas-que-ordenadores.html>

²⁵¹ MIT introduce Scratch en 2007.

²⁵² 82.172.178 personas se han registrado en Code.org el 22 de Diciembre de 2014

²⁵³ Dans, Enrique. "Codecademy aprendiendo a programar." *El Blog de Enrique Dans*. Consultada 28 de abril, 2014. <http://www.enriquedans.com/2012/01/codecademy-aprendiendo-a-programar.html>

²⁵⁴ Coursera. Consultada 4 de febrero, 2015. <https://www.coursera.org/>

²⁵⁵ Udacity. Consultada 4 de febrero, 2015. <https://www.udacity.com/>

²⁵⁶ MIT. Consultada 4 de febrero, 2015. <http://ocw.mit.edu/index.htm>

²⁵⁷ Stanford university. Consultada 4 de febrero, 2015. <https://see.stanford.edu/see/courses.aspx>

²⁵⁸ Academicearth. Consultada 4 de febrero, 2015. <http://academicearth.org/computer-science/>

actividad que va a cambiar radicalmente su consideración en los próximos años. No pierdas el tema de vista²⁵⁹. ENRIQUE DANS

La polémica de decidir si se ha de aprender o no a programar no queda resuelta ni mucho menos con la decisión, pues la elección de qué código/s aprender tampoco tiene respuesta entre el gremio informático. Descartando en base al oficio o ámbito la decisión puede quedar reducida a menos de cinco opciones. La lógica que los rige a todos sin embargo, es muy similar. A pesar de que esta tesis trata por todos los medios de evitar el uso de programación en sus experimentos, decisión que se verá justificada a lo largo de la tesis, se mencionarán levemente algunos de estos lenguajes y su implicación en el ámbito que nos ocupa. Los lenguajes por sus características son propios de diferentes áreas de aplicación como desarrollo web, desarrollo de videojuegos, desarrollo de aplicaciones móviles, análisis de datos, programación de sistemas... Algunos de los más importantes son Ruby, Matlab, Python, Java, C++, Javascript, C, R, C#, PHP, y HTML²⁶⁰.

HTML(5), en su quinta versión sigue renovándose con lo que parece tener la batalla ganada frente a las páginas web Flash, una guerra que Apple decantó al no permitir el último en sus dispositivos móviles^{261 262}; Swift, un lenguaje de programación presentado por Apple (en la actualidad una de las empresas con mayor repercusión ligadas al mundo del software y el hardware) durante el desarrollo de la tesis^{263 264}; Python, que ha ganado presencia en varios programas de modelado 3D como Rhinoceros (McNeel)²⁶⁵, 3Ds Max (Autodesk) o Maya (Autodesk). Aunque de incorporación tardía, la primera versión de Python apareció en 1994. Desde la versión 5 de Rhinoceros el apoyo a Python parece evidente y probablemente, un arquitecto interesado en adquirir estas habilidades debería aprender este lenguaje y no otro si quiere mantenerse dentro del ecosistema Rhinoceros-Grasshopper. Python ha sustituido al lenguaje Rhinoscript (a su vez basado en VBScript) que antes se usaba dentro del plug-in Monkey²⁶⁶ para Rhinoceros3D; y en las primeras versiones de Grasshopper al C# y al mencionado VBScript, permitiendo introducir líneas

²⁵⁹ Dans, Enrique. "Cadeacademy, aprendiendo a programar." Consultada 31 de enero, 2012. <http://www.enriquedans.com/2012/01/codecademy-aprendiendo-a-programar.html>

²⁶⁰ Diakopoulos, Nick. "Interactive: the top programming languages 2016." *IEEE Spectrum*. Consultada 28 de julio, 2016. <http://spectrum.ieee.org/static/interactive-the-top-programming-languages-2016>

²⁶¹ López, Miguel. "Steve Jobs vuelve a atacar a Adobe Flash en una reunión con Wall Street Journal." *Applesfera*. Consultada 27 de febrero, 2010. <http://www.applesfera.com/apple/steve-jobs-vuelve-a-atacar-a-adobe-flash-en-una-reunion-con-wall-street-journal>

²⁶² Carbajo, Aitor. "Guerra entre Apple y Adobe, ¿Mito o realidad?" *Applesfera*. Consultada 31 de abril, 2010. <http://www.applesfera.com/apple/guerra-entre-apple-y-adobe-mito-o-realidad>

²⁶³ Presentado en Apple Worldwide Developers Conference, 6-4 de Junio de 2014, San Francisco.

²⁶⁴ Apple. "Swift." Consultada 4 de febrero, 2015. <http://www.apple.com/swift/>

²⁶⁵ McNeel Wiki. Consultada 4 de febrero, 2015. "Python." <http://wiki.mcneel.com/developer/python>

²⁶⁶ McNeel Wiki. "Monkey." Consultada 4 de febrero, 2015. <http://wiki.mcneel.com/developer/monkeyforrhino4>

de código en un archivo de GH²⁶⁷ y crear componentes personalizados²⁶⁸. Merece especial mención por su recurrente aparición en workshops del ámbito digital-arquitectónico la plataforma Processing²⁶⁹, un entorno de desarrollo de código abierto basado en Java que hace hincapié en la visualización de datos multimedia e interacción de diseño digital. Otros, como el GCode son lenguajes de transición. El GCode es el código más extendido para transmitir las órdenes a cualquier máquina de fabricación digital (ya sean CNC de fresadora o laser, impresoras 3D por extrusión o por capas). Pero no es común escribir en GCode, aunque este puede escribirse o tan solo modificarse manualmente. Lo más usual es que programas de CAM (Computer Aided Manufacturing) con una interfaz gráfica para usuario escriban el código a raíz de nuestros inputs para que las máquinas lo entiendan. Es lo que ocurre en realidad siempre que usamos software: un programa hace de puente visual para transmitir nuestras órdenes al ordenador, solo que en el caso del GCode y el CAM es más explícito y aparente -por el momento-.

Por otro lado, no es necesario saber programar para aprovecharse de ellos. Páginas web como RhinoScript.org tienen bibliotecas de líneas de código listas para usar que cumplen tareas muy concretas. Copiar y pegar, el usuario no tiene porqué saber qué ocurre. O descargar componentes personalizados para Grasshopper desde los foros de su web sin siquiera ver una línea de código.

Los artículos de opinión no parecen diferir unos de otros: aprender a programar no es para todos. La mera idea de que parezca útil o prometedor no basta. Requiere de dedicación -hasta vocación- y tener en cuenta que todo ese esfuerzo no se podrá dedicar a otros aspectos de la profesión. La ausencia de fascinación convertirá la tarea en algo frustrante y lento. En cualquier caso, el aprendizaje de 'scripting' para alterar unas pocas geometrías en algún proyecto para un concurso de arquitectura implica desaprovechar tanto las aptitudes como el tiempo. No obstante su creciente demanda no puede ser desestimada, y todos deberían tener en cuenta su existencia, comprender su funcionamiento y utilidad y valorar su incorporación tal vez, a través de terceros. No solo eso, aprender a programar, aunque sea mínimamente, permitirá al usuario comprender cómo funcionan los ordenadores y abrirá su mente a una nueva manera de abordar problemas. El Código es hoy en día la habilidad más de moda en el mercado laboral, y el lenguaje más moderno tanto para creatividad como para economía.

En contra del estallido político de "todos los niños deberían aprender código" algunas voces de expertos en la materia han expresado su escepticismo: el artículo 'Should everybody learn to code?'²⁷⁰ es escrito completamente a través

²⁶⁷ Food4Rhino. "GH python." Consultada 4 de febrero, 2015. <http://www.food4rhino.com/project/ghpython?etx>

²⁶⁸ Desarrollando en el sistema Rhinoceros. Consultada 4 de febrero, 2015. <http://developer.rhino3d.com/>

²⁶⁹ Processing. Consultada 4 de febrero, 2015. <https://processing.org/>

²⁷⁰ Penenberg, Adam. "Should everybody learn to code?" *Pando*. Consultada 29 de mayo, 2013. <https://pando.com/2013/05/07/should-everybody-learn-to-code-a-pandodaily-meta-media-mashup-of-opinion/>

de oraciones de otros artículos que hablan sobre la cuestión (30 artículos). A continuación se destacan los puntos más relevantes de esos y otros artículos:

Chase Felker, ingeniero programador, manifiesta la peligrosidad entre los programadores expertos y los autodidactas. Una preocupante cantidad de programadores que buscan un trabajo no saben programar²⁷¹. De cómo la informática es abordable por cualquiera y como las soluciones pueden encontrarse a tu disposición, usarlas sin entenderlas.

*And without knowing more of the bigger picture, you're forced to hack away at a problem, which can take you pretty far until you run into one that is better solved by more careful design*²⁷². CHASE FELKER

Probablemente muchos arquitectos se sientan aludidos en parte, pues es una figura que tiende a enfrentarse a situaciones nuevas que requieren de aprendizaje y aplicación. Problema a problema, el arquitecto resuelve e investiga mientras se adentra en campos ajenos. Siendo esta tesis un ejemplo de ello.

Kate Ray (programador en Wordpress) bromea con el proceso de aprendizaje²⁷³: “Programming is the literacy! Kids are doing it! Everyone’s doing it! Hey, I’m smart. Why don’t I learn to program???” Y advierte que lo más peligroso es decir que programar es fácil para la gente que está comenzando.

“People said it would be easy... Maybe I don’t have the mind for it. Maybe I’m just dumb.”

“And they don’t let you in on a big secret: that there is no mastery, there is no final level. The anxiety of feeling lost and stupid is not something you learn to conquer, but something you learn to live with.”

“What I forgot is that the most common state for a programmer is a sense of inadequacy. As a programmer, there is a limitless amount of stuff to learn. You can become a specialist in one language or framework, but if your job is to build things efficiently, you will constantly need to be learning new tools and constantly feel out of your depth. It helps to be mentally prepared for feeling stupid”.

La frustración es pues, una constante en el ámbito de la programación. Una disciplina que ejemplifica mejor que nunca el diagrama del psicólogo Mihaly

²⁷¹ Atwood, Jeff. “The non-programming programmer.” *Coding Horror*. Febrero, 2010. Consultada 4 de febrero, 2015. <http://blog.codinghorror.com/the-nonprogramming-programmer/>

²⁷² Felker, Chase. “Maybe Not Everybody Should Learn to Code.” *Slate*. Agosto, 2013. Consultada 4 de febrero, 2015. http://www.slate.com/articles/technology/future_tense/2013/08/everybody_does_not_need_to_learn_to_code.html

²⁷³ Ray, Kate. “Don’t believe anyone who tells you learning to code is easy.” *Techcrunch*. Consultada 30 de mayo, 2014. http://techcrunch.com/2014/05/24/dont-believe-anyone-who-tells-you-learning-to-code-is-easy/?ncid=fb&utm_source=feedburner&utm_medium=feed&utm_campaign=fb&utm_content=FaceBook

Csikszentmihalyi²⁷⁴ dónde explica el proceso de aprendizaje en algún lugar entre la ansiedad del desconocimiento y el aburrimiento de la repetición. Programar requiere aprender desde cero las cosas que consideramos más básicas, las que nos resultan obvias y fáciles de pensar pero que requerirán todo nuestro esfuerzo para ejecutar.

Parte del problema estriba en la ignorancia, en todo lo que no se conoce, y no en la capacidad de desarrollar pequeñas partes -copiadas de otro sitio probablemente-. El mundo laboral parece separarse poco a poco en “programar o ser programado” y es lógico entender que hacen falta pocos de los primeros para crear muchos de los segundos, tendencia que parece consolidarse. ¿Es posible que la situación cultural en la que los ordenadores son considerados por la gente como cajas negras empuje a aprender código? Muchísima gente no se siente cómoda con los ordenadores “¡Windows se ha roto otra vez! llamar al técnico, no sé qué le pasa, yo no he hecho nada...” ¿quizás piensen que si sus hijos aprenden a programar esa situación se resolverá en un futuro? Y es que aprender de manera “segmentada” a programar no servirá de nada, sino para alimentar el mito de todo lo que no se sabe o conoce.

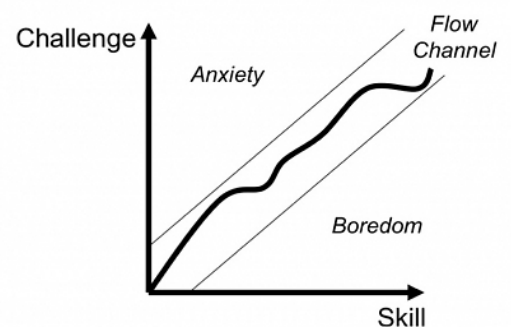
015. /// Diagrama de Mihaly Csikszentmihalyi. Muestra los sentimientos durante el periodo de aprendizaje.

We don't need everyone to code—we need everyone to think. and unfortunately, it is very easy to code without thinking. CHASE FELKER

La arquitecta Ana Cocho²⁷⁵, puntualiza también la necesidad colaborativa de juntarse con verdaderos expertos que afronten de manera seria lo que el arquitecto pretende, la imposibilidad de convertirse en arquitecto, ingeniero y biólogo al mismo tiempo. La seriedad de los proyectos requerirá irremisiblemente de grupos de trabajo con expertos en cada campo, haciendo innecesario ser totalmente independiente. Únicamente hacen falta unas bases que permitan a las diferentes partes comunicarse.

L. Jeffrey Zeldman pone de manifiesto la muerte de la programación de páginas webs. Cada vez son más los servicios que permiten construir una página sin la necesidad de una sola línea de código. ¿No es el trabajo de los programadores desarrollar herramientas para el resto de la gente para que estos puedan desarrollar sus trabajos sin la necesidad de entender los entresijos de un ‘script’?

What we may not have realized is that once the browsers don't suck, being an HTML and CSS “guru” isn't really a very marketable skillset. 80% of what made us useful was the way we knew all the quirks and intricacies of the browsers. Guess what? Those are all gone. and if



²⁷⁴ Csikszentmihalyi, Mihaly, y Isabella Selega Csikszentmihalyi. *Experiencia óptima: Estudios psicológicos Del Flujo En La Conciencia*. Bilbao: Desclee de Brouwer, 1998.

²⁷⁵ Cocho-Bermejo, Ana. *HOP and Dynamic Adaptability Logics*. Genetic Architectures Seminar, Biodigital Architecture Master, Mayo 2016.

they're not, they will be in the very near future. Then what? JEFF CROFT

Jeff Atwood²⁷⁶ hace hincapié en los siguientes puntos en contra del aprendizaje universal:

- Escribir código no es algo deseable. El código no es poesía, cuanto menos mejor.
- El objetivo no es escribir código, sino solucionar problemas.
- Sitúa el método ante el problema (de hecho, plantea un nuevo problema antes del original).
- Promueve la existencia de programadores noveles, poco profesionales.
- Difumina la delgada línea entre aprender a programar y ser un programador profesional.

Yevgeniy Brikma, ingeniero programador en webs de alto impacto como LinkedIn o TripAdvisor, advierte del error de convertir a todo el mundo en programador. El verdadero objetivo debería ser que la gente se familiarizara con el código y con una forma de pensar computacional.

In other words, we should be trying to teach computer science and not just coding²⁷⁷. YEVGENIY BRIKMA

No obstante, que sea casi omnipresente no quiere decir que haya que saberlo usar. Todos viajamos en aviones y sin embargo no sabemos pilotarlos. Sí que entendemos cómo funciona: la física te enseña sobre la gravedad, la fricción, la velocidad; la biología lo que le ocurre a un cuerpo con falta de oxígeno o frío extremo; la historia como se inventaron los aviones y como se desarrollaron para transporte o guerras. Todo el mundo entiende cómo funciona pero no es necesario que en la escuela se enseñe “una herramienta específica” para volar un tipo de avión en concreto. Por ello, el valor educacional se encuentra en las Ciencias de la Computación, no en aprender código per se.

Computer science is the study of computation: that is, how to represent and process information²⁷⁸. EDWIN REILLY

Y es que la tercera ley de Clarke's²⁷⁹, “Any sufficiently advanced technology is indistinguishable from magic”²⁸⁰, puede ser algo negativo en la educación y preparación de las próximas generaciones. Si la gente cree que es magia es debido a una falta de conocimiento y comprensión.

²⁷⁶ Artwood, Jeff. “Please Don't Learn to Code” *Coding Horror*. Mayo, 2012. <http://blog.codinghorror.com/please-dont-learn-to-code/>

²⁷⁷ Brikman, Yevgeniy. “Don't learn to code. Learn to think.” *Yevgeniy Brikman*. Mayo, 2014. Consultada 4 de febrero, 2015. <http://www.ybrikman.com/writing/2014/05/19/dont-learn-to-code-learn-to-think/>

²⁷⁸ Reilly, Edwin D., Anthony Ralston, y David Hemmendinger. *Encyclopedia of Computer Science*. Londres: Nature Pub. Group, 2000.

²⁷⁹ Novelista británico de ciencia ficción autor de la archiconocida 2001: Odisea en el espacio

²⁸⁰ Clarke, Arthur C. *Profiles of the Future; an Inquiry into the Limits of the Possible*. Nueva York: Harper & Row, 1962.

El arquitecto curioso, entusiasta de las matemáticas y la geometría, amante de entender los procesos que le rodean (biológicos, físicos, sociales...) hallará una gran satisfacción en esta materia.

Here are just a few of the concepts you might study:

- 1. Problem solving: you'll learn algorithms - that is, general strategies, such as divide and conquer, recursion, heuristics, greedy search, and randomized algorithms - that help you model, decompose, and solve any kind of problem.*
- 2. Logic: you will start to use precise and formal methods of thinking, including abstraction, boolean logic, number theory, and set theory, so you can solve problems in an airtight manner.*
- 3. Data: you will touch information theory and start asking questions like what is information? How do you represent it? How do you model the real world?*
- 4. Systems: how do you design and build complex systems that satisfy a set of requirements and constraints? Systems engineering is an essential topic in almost every business.*
- 5. Thinking: one of the best ways to understand the human mind is to try to replicate it. Topics like artificial intelligence, machine learning, computer vision, and natural language processing are at the forefront of not only computer science, but also biology, psychology, philosophy, and mathematics.*

Como se puede apreciar, de la lista anterior no se hace una sola mención sobre el código o la programación, y es que estas son solo herramientas que sirven para llevar a cabo la computación: no son, por sí mismas, Ciencia de la Computación. Confundir estos dos conceptos está causando problemas en el movimiento 'learn-to-code'.

Computer science is no more about computers than astronomy is about telescopes, biology about microscopes, or chemistry about beakers and test tubes. Science is not about tools. MICHAEL FELLOWS y IAN PARBERRY

El Dr. Soloway, en referencia a la herramienta Scratch del MIT, recalca que el objetivo de la herramienta no es tanto aprender a programar sino a entender la lógica que hay detrás de la programación. El uso de "bloques interconectarles" -como si de piezas de puzle se tratase- para simplificar las lógicas de la programación es la clave de su carácter didáctico. En cierta forma Grasshopper es eso, un Scratch para niños mayores que son arquitectos.

Como se comentará en más detalle, Grasshopper permite masa crítica. Si obviamos la premisa extendida de la multidisciplinariedad y nos centramos en el conocimiento mixto que permite desarrollar nuevos conceptos -a través del pensamiento de un único individuo- veremos que hay un problema

en el aprendizaje, un límite en el tiempo y el conocimiento. La figura del hombre renacentista que era filósofo, matemático, artista... ha quedado totalmente desmantelada debido a la profundización y especialización de las áreas. ¿Puede un programador excelente ser un arquitecto excelente? ¿Es posible desarrollar las dos aptitudes paralelamente, con igual intensidad, y mantenerse al filo de la vanguardia simultáneamente? ¿Cuándo terminaría este arquitecto-programador de formarse? En la mayoría de los casos los excelentes programadores serán pésimos arquitectos y viceversa, a medida que uno de los mundos le absorbe se abandona al otro.

No hay que llevarse al engaño, programas como Grasshopper exigen un alto grado de especialización y aprendizaje. Pero proporcionalmente, están más cercanos al modelado de interfaz que a la programación. Facilitar el potencial que ofrece Grasshopper lleva a que más arquitectos entren en el mundo de lo digital y, consecuentemente más probabilidades hay de que surjan arquitecturas que supongan un hito histórico, un cambio en el panorama arquitectónico.

La era de la computación debería poner en común arquitectos, estructuristas, constructores... (BIM) JAN KNIPPERS

¿Por qué se incita entonces al “arquitecto biodigital novel” a programar? Puede que la primera respuesta sea histórica: el modelado algorítmico -tema que se tratará en el capítulo sobre software- acaba de aparecer, hasta hace pocos años era inviable diseñar nada que no fuese a través de la programación. Solo ahora empieza a aparecer software paramétrico con interfaz gráfica.

La segunda razón es el potencial: sabemos que la máxima libertad de creación viene a través de la programación. La mayoría de los casos novedosos o solucionadores para problemas complejos probablemente nacen a través del código. ¿Por qué? Porque son capaces de resolver cosas para las que el modelado algorítmico (por ejemplo Grasshopper) aún no está preparado. Cierran huecos que un software de interfaz, a base de herramientas prediseñadas, no puede cubrir. Su relación con el ordenador es casi directa y por tanto, si se describe adecuadamente puede llevarse a cabo cualquier tarea computable. No es solo cuestión de libertad, sino de rendimiento: las tareas más complejas (altamente repetitivas y analíticas) son varias veces más rápidas en código que en un software de modelado estándar que tiene que interactuar y transformar la información entre persona y ordenador, y que ha de mostrar gráficamente todo lo que sucede.

Entonces, aunque sus implicaciones son muy potentes y necesarias, ¿en qué porcentaje de los casos se aplica? Para resolver problemas puntuales (asociados probablemente a investigación y vanguardia) y para ofrecer una herramienta más madura (que rinde y se procesa mejor) a usuarios de nivel inferior. En ambos casos no es necesario que el resto de usuarios dominen la programación para aprovecharse de ellos, el primero porque es de uso individual (privado), el segundo porque está enfocado a funcionar de fondo de manera automatizada.

A detallar posteriormente, el ecosistema de programas como Grasshopper permite la incorporación de “código” dentro de los archivos. Esto habilita a usuarios sin conocimientos a utilizar líneas de programación muy específicas. Ese código puede incorporarse de las siguientes maneras:

- Líneas de código per se, copiadas dentro de un componente que funciona como contenedor. Una especie de interfaz de programación dentro del propio programa.
- Como clústeres o componentes personalizados: “piezas” de Grasshopper que simulan sus componentes habituales pero que contienen código propio.
- Como add-ons: mediante la instalación de pequeños programas que añaden funcionalidades a Grasshopper.

Así pues, si se pone al alcance de la gente, los progresos en modelado algorítmico son accesibles sin la necesidad de programación. Efectivamente, unos pocos pueden alimentar a muchos tal y como sucede en la mayoría de los campos donde se utiliza software: las empresas grandes con buenos programadores desarrollan herramientas para los usuarios. Además, a medida que el tiempo transcurre, más y más soluciones se integran en Grasshopper, convirtiéndolo en un proceso acumulativo donde cada vez quedan menos incógnitas por resolver.

Concluyendo, tal y como se ha argumentado en este capítulo el arquitecto debería centrar su atención en la lógica que compone el proyecto digital-arquitectónico: profundizar en sus bases geométricas o matemáticas le llevará a resultados mejores y más originales que invertir cuantiosas horas en habilidades que otros pueden desarrollar por él. **

2.2.5. Grasshopper, software para una tesis

Los experimentos de esta tesis se aplican a través del plug-in Grasshopper para Rhinoceros3D, de la compañía McNeel & Associates, así como en otros add-ons desarrollados para funcionar sobre el mismo Grasshopper (a partir de ahora abreviado como GH). Los siguientes capítulos describen: el software y su recorrido a través del periodo de WIP ('work in progress'), el contexto -que ha supuesto uno de los motivos de justificación- en relación a su ecosistema y comunidad, un listado de add-ons clasificados en categorías para ampliar sus capacidades, y la recopilación de los artículos en relación a futuros puntos de su desarrollo.

Grasshopper, modelado algorítmico

David Rutten²⁸¹ comienza a programar Grasshopper (GH) en 2007²⁸² por iniciativa propia, sin el conocimiento de sus jefes (Robert McNeel & Associates). Las primeras pruebas y versiones recibirán el nombre de Explicit History (Septiembre de 2007)²⁸³. Se presenta públicamente por primera vez en Marzo de 2008 bajo el nombre de Grasshopper. En la actualidad Rutten continúa trabajando solo en el proyecto. La metodología relacional de Grasshopper también influyó la aparición del modo "Record History" dentro de la Rhinoceros 4.0²⁸⁴.

Como se ha descrito en los capítulos de "El lenguaje de la lógica" (cap. 2.2.4) en esta misma tesis, Grasshopper es un programa de 'visual programming language' o 'visual algorithmic modeling'. En su propia web se puede leer como subtítulo 'algorithmic modeling for Rhino', haciendo referencia al AAD ('Algorithmic Aided Design'). Podemos encontrar sinónimos de estos conceptos que tratan de definir parcialmente las características de este tipo de software y las geometrías que producen:

- visual algorithmic interface
- generative design

²⁸¹ Arquitecto por la Universidad de TU Delft Architecture and Urbanism. Rutten, David. "My life from before the wave function collapse." / *eat bugs for breakfast*. Consultada 18 de febrero, 2013. <https://ieatbugsforbreakfast.wordpress.com/2013/02/18/my-life-from-before-the-wave-function-collapse/>

²⁸² Rutten, David. *Computing Architectural Concepts*. Architectural Association, Londres, 2010. Consultada 8 de febrero, 2015. <http://www.aaschool.ac.uk/VIDEO/lecture.php?ID=1212>

²⁸³ El doctorando atendió en Abril de 2007 a una demo en vivo de Explicit History durante el ciclo de conferencias Sim-Ae, en la ESARQ, Universitat Internacional de Catalunya.

²⁸⁴ Record History permite que las geometrías se actualicen si sus formas predecesoras lo hacen (ya sea mediante puntos de control, moviéndolas, girándolas...). Los archivos aumentan considerablemente de tamaño y las relaciones geométricas son guardadas pero no es posible editar dichas relaciones.

- node-base design
- parametric design
- visual programming
- programmatic modeling
- algorithmic design
- spaghetti wiring
- logical modeling

Como plug-in, Grasshopper ha permanecido gratuito para Rhino (al ser un plug-in, no puede funcionar en solitario). A fecha de 6 de Julio de 2016 la versión actual de GH es 0.9.0076, y se especula que Rhino 6 incorporará por primera vez GH de serie.

¿Qué es realmente GH? ¿Cuáles son sus implicaciones? ¿Y qué virtudes tiene? Explicado de manera sencilla, GH es el despiece de Rhino, es la separación de cada una de sus partes para que el usuario pueda recombinarlas a placer. Para potenciar aún más su capacidad, se añaden partes que representan conceptos matemáticos, geométricos y computacionales (dominios, matrices, operadores, trigonometría, secuencias, textos, grupos, listas, estructuras, vectores, campos, planos, puntos, curvas, superficies, sólidos, mallas, etc.)²⁸⁵. Como GH se sustenta en Rhino, sus comandos, sus operaciones computacionales, están basadas en RhinoCommon²⁸⁶, la librería de Rhino. Todas estas “partes” son presentadas al usuario para que las combine a placer -siempre y cuando la combinación funcione- mediante una interfaz de “pilas y cables”. Esta interfaz es lo que permite el modelado algorítmico sin necesidad de saber programar (‘visual algorithmic modeling’). La información entra a través de los cables en las pilas, es modificada, y sale de nuevo a través de más cables. Input/output. Información que entra, es procesada, y sale, de la misma forma que se describe en los algoritmos. De hecho, cada una de esas pilas es un pequeño algoritmo.

A priori, puede parecer que la programación visual solamente facilita lo que ya se podía hacer con líneas de código, y de hecho así es. A lamentar, que siempre se pierde cierto grado de libertad, reduciendo su potencial en comparación con el ‘scripting’. Con todo, esta facilidad la que desemboca en sus mayor potencial.

- A nivel docente, convierte en asequible ejercicios que habrían requerido meses de aprendizaje. Un workshop de unos pocos días puede llevarse a cabo con la seguridad de que en pocas horas los alumnos estarán familiarizados con el funcionamiento de GH. Puede que no tengan la capacidad de crear aun, pero les será fácil modificar. Incluso aunque se tratase de un pequeño ejercicio de pocas horas, los alumnos pueden modificar los ‘sliders’ (deslizadores) de manera intuitiva, generando variaciones de una misma familia proyectual.

²⁸⁵ Davis, Daniel. “Dissecting Grasshopper.” Consultada 30 de agosto, 2010. <http://www.danieldavis.com/dissecting-Grasshopper/>

²⁸⁶ Rhinocommon. Consultada 8 de febrero, 2015. <http://4.rhino3d.com/5/rhinocommon/>

- Por otro lado, al no requerir programación, queda al alcance de una cantidad de público considerablemente mayor. Este hecho, este factor, es el que posibilita la emergencia de la arquitectura digital. No es que la arquitectura digital sea nueva, ¡para nada! es que no estaba al alcance de todos. Grasshopper ha contribuido en buena parte a provocar la emergencia de la arquitectura paramétrica. Quizá posibilite esa masa crítica a la que hacía referencia Richard Sennet.**

El arquitecto que se adentre en estos caminos advertirá que las exigencias de GH están más relacionadas con la lógica, las matemáticas, la geometría... Más que en las capacidades de GH, la limitación frecuentemente se encuentra en el conocimiento que posee el diseñador de las áreas mencionadas, incapacitándolo para articular un discurso relacional que no es capaz de describir.

Cabe mencionar en este aspecto el esfuerzo de GH por simplificar -o más bien organizar- todos los tipos de información en una única tipología: listas. Mientras que otros programas pueden plantear dificultades por el tratamiento y combinación de diferentes tipologías de datos (List, arrays, variables, text, hash tables, linked list, queues,...) en Grasshopper solo hay una cosa: listas²⁸⁷. Estas listas organizan el flujo de información y se anidan o agrupan en diferentes niveles jerárquicos para habilitar el potencial paramétrico en múltiples niveles de la definición. Dominar las estructuras de las listas (los 'data trees') es dominar las relaciones entre los elementos de diseño, su topología relacional, sus niveles funcionales y de influencia; probablemente el aspecto más difícil en el aprendizaje de GH, pero también el que le otorga más potencial. Paradójicamente, este sistema para estructurar la información guarda ciertas relaciones con los sistemas jerárquicos de las especies animales, y el mismo David Rutten en sus explicaciones usa esos ejemplos para definir los subgrupos (ramas dentro de ramas, listas dentro de listas): {Animalia;Mammalia;Hominidea;Homo}.

Comunidad de Grasshopper

Cómo se ha investigado con anterioridad, el debate sobre aprender a programar o no está más vivo que nunca. GH es una de las soluciones para aquellos que deciden no aprenderlo o, al menos, no profundizar en él como para convertirlo en su herramienta primaria. Que sea gratuito y que no requiera programar es uno de los puntos fuertes que explican el éxito de GH. Dicho éxito se ha retroalimentado en una gran comunidad, otra de las claves de la importancia de GH: una comunidad amplia, dinámica y creciente. Además del software, GH incluye una red de usuarios que comparte trabajo, conocimiento, que pregunta y discute.

²⁸⁷ Rutten, David. "The Why and How of data Trees." *Grasshopper*. Consultada 30 de enero, 2015. <http://www.Grasshopper3d.com/forum/topics/the-why-and-how-of-data-trees>

A continuación, se listan alguno de sus miembros más notables, no solo por su ayuda en la resolución de problemas, sino por sus aportaciones al ecosistema de GH y el diseño de add-ons:

- David Rutten (desarrollador de GH)
- Michael Pryor <http://formularch.blogspot.com.es/>
- Daniel Stasiuk (exoskeleton) <http://www.Grasshopper3d.com/profile/DavidStasiuk>
- Nick Tyrer (mesh+) http://www.Grasshopper3d.com/profile/tyrertecture?xg_source=activity
- Daniel Piker (kangaroo) <http://www.Grasshopper3d.com/forum/topics/skeletal-mesh>
- Danny Boyes <http://www.Grasshopper3d.com/forum/topic/listForContributor?user=26akte8ct4pqs> <http://www.Grasshopper3d.com/forum/topics/path-mapper-help-1>

Como incentivo, el proyecto ganador del Hackaton²⁸⁸ celebrado en el congreso ACADIA 2015 fue desarrollado con GH, una muestra más de la importancia de la comunidad de GH y su libertad. Por supuesto, este experimento fue publicado en los foros de la web²⁸⁹. El proyecto permitía la sincronización y envío de datos entre diferentes ordenadores abriendo la posibilidad de procesado remoto o en red.

Ecosistema de Grasshopper

Igual de vibrante que su comunidad, es todo lo que rodea a GH. Por sí mismo, GH cambia y mejora con frecuencia, muchas de las corrección de errores ('bugfixing') y nuevas características ('features') surgen a raíz de los usuarios. Tanto cambio también causa inestabilidad, sin duda, pero es algo aceptable teniendo en cuenta que nos encontramos ante un software experimental (aún no ha alcanzado su versión 1.0) y que gracias a ello aporta notables mejoras. La más importante de ellas probablemente, sea la inclusión de estructuras de datos que se incorporó en GH 0.6²⁹⁰ y que puede ser rastreada hasta este post del 30 de Julio de 2009²⁹¹.

Antes de hablar de add-ons (pequeñas piezas de software que añaden funcionalidad a GH) es interesante ver el proceso natural al que son sometidos

²⁸⁸ Un hackathon o hackatón (hack and marathon), es un término usado en las comunidades hacker para referirse a un encuentro de programadores cuyo objetivo es el desarrollo colaborativo de software, aunque en ocasiones puede haber también un componente de hardware. Por supuesto, en los casos referidos aquí no se pretende ningún acto ilegal, sino más bien la creación de sistemas que el sistema o el contexto aún no permiten o contemplan.

²⁸⁹ Siroky, Dan. "ACADIA 2015 Hackathon - Sending Snippets via Flux." *Grasshopper*. Consultada 30 de octubre, 2015. <http://www.Grasshopper3d.com/profiles/blogs/acadia-2015-hackathon-sending-snippets-via-flux>

²⁹⁰ Boyes, Danny. "Path Mapper Help." *Grasshopper*. Consultada 27 de abril, 2011. <http://www.Grasshopper3d.com/forum/topics/path-mapper-help>

²⁹¹ "0.60015 prerelease." *Grasshopper*. Consultada 4 de febrero, 2015. <http://www.Grasshopper3d.com/forum/topics/Grasshopper-060015-prerelease>

normalmente las nuevas ideas en GH. Es posible deducir este proceder si se analizan los temas de manera cronológica en los foros de GH:

1. Alguien intenta replicar determinado proceso que se da en otros entornos o trata de poner en práctica una nueva idea.
2. La comunidad se vuelca en su resolución, ya sea vía trozos de código -porque aún no es posible resolverlo con componentes estándar- o montando definiciones.
3. Si la idea es lo suficientemente relevante, se producirá un movimiento en replicar (o copiar) esa estrategia. En este caso el creador puede haber compartido la solución de manera abierta o no.
4. En lo sucesivo, se optimizará el proceso desde diferentes frentes con el fin de hallar la mejor respuesta posible en términos de carga computacional o flexibilidad.
5. Si pasa el tiempo y la estética geométrica que produce esa definición se consolida en workshops, escuelas, proyectos... probablemente se tome la iniciativa de (con conocimientos de programación) desarrollar un paquete más sólido y de fácil uso: se construirá un add-on o un cluster para Grasshopper.
6. Llegados a ese punto hay dos vías posibles: monetizar o no dicho producto. Aunque en esta tesis no entraremos a valorar los posibles efectos económicos de una comunidad que comparte de manera gratuita herramientas de trabajo o el hecho de capitalizar dichas herramientas a cambio de una mayor estabilidad, si se valorará otro tipo de implicaciones, pues en ello reside una de las claves para resolver su validez.

Como se ha mencionado en el punto 5, Grasshopper permite la incorporación de add-ons²⁹² en su interior que permiten la inclusión de nuevas habilidades dentro del software paramétrico. Estos add-ons pueden ser pequeñas piezas de líneas de código -ya sea Visual o Python- que se formalizan en un nuevo componente (pila) o una familia entera de herramientas que incluyen su propia biblioteca digital. Grasshopper se beneficia del potencial más allá de su propio software. Estos add-ons de terceros (cualquier programador independiente puede crearlos²⁹³) permiten no solo extienden las capacidades de GH sino que extienden su ámbito de influencia a otros programas y formatos. Más allá de meras exportaciones, Grasshopper puede trabajar con otros programas en tiempo real (Excel, Photoshop, Revit, Ecotec, etc.). Algunos de los plug-ins incluso permiten la interacción y flujo de información (input/output) con todo tipo de hardware (Arduino, Kinect, etc.).

A principios de 2011, McNeel & Associates lanza de forma oficial la web Food4rhino (www.food4rhino) que trata de unificar la sorprendente cantidad de plug-ins y add-ons que se están creando alrededor de Rhino y GH²⁹⁴.

²⁹² Si bien la frontera entre plug-in y add-on no está definida, normalmente los primeros implican el funcionamiento de programas de terceros dentro de un software base; mientras que los segundos -de menor tamaño- añaden funcionalidades puntuales al software preexistente. En este caso, los add-ons mejoran (y se ejecutan dentro de) las capacidades de Grasshopper añadiendo nuevos componentes.

²⁹³ Sitler, Ben. "Guide to creating custom Grasshopper 0.6.X components." *Grasshopper*. Consultada 28 de marzo, 2010. <http://www.Grasshopper3d.com/forum/topics/guide-to-creating-custom>

²⁹⁴ Food4rhino. "wishlist." Consultada 28 de marzo, 2015. <http://www.food4rhino.com/wishlist>



Seguirán habiendo piezas de software al margen de esta página oficial, pero en su mayoría cualquier pieza puede ser encontrada en esta web. El día 13 de Junio de 2014²⁹⁵, el blog oficial de Rhinoceros3d anuncia mejoras en la web www.food4rhino.com. En él se menciona la existencia de más de 150 apps (add-on/plug-ins) y 37.000 descargas en el último mes. La mayoría de las mejoras se enfocan a mejorar la experiencia del usuario: subidas de archivos, servicios de localización, fórums para terceros, tags... una muestra de que se trabaja para crear un entorno donde la comunidad pueda alimentar y aportar, en lugar de concentrar los esfuerzos en la mejora de un producto final.

And of course there are many new and updated add-ons for Architectural Design, Urban Planning, GIS, Structural Engineering, Robot controlling, BIM, Environmental Analysis, Physics, Visualization, Landscape, Jewelry, Advanced Modeling and much more!

Lamentablemente este ecosistema a veces también es volátil. La falta de unidad y las constantes actualizaciones han dejado a muchos programas en el camino. Si el desarrollador en cuestión deja de actualizar el plug-in, este deja de funcionar y con él desaparece dicha funcionalidad si nadie la reemplaza, los plug-ins son abandonados²⁹⁶. Es en estos casos donde se echa de menos un sistema más protector y centralizado. De forma similar, algunas de las condiciones de los add-ons han cambiado a lo largo del desarrollo de la tesis, por ejemplo, el plug-in armadillo para Rhino, que originalmente era gratuito, actualmente (julio de 2016) tiene un precio cercano a 170€²⁹⁷. Por estas razones siempre ha sido recomendable guardar versiones antiguas tanto de GH como de los plug-ins, para garantizar la réplica de un proceso determinado en un momento de necesidad.

Uno de los comentarios de David Rutten sobre la incorporación de GH2 trata sobre resolver este ecosistema tan rico como incontrolable:

The trouble with finding out about plugins; what exists? what doesn't exist? is this under development? etc. are questions that I feel should be answerable through Grasshopper itself. In fact Will Pearson is working on a system which should make it a lot easier to upload, update, find, download and track paraphernalia for Grasshopper and Rhino²⁹⁸. DAVID RUTTEN.

²⁹⁵ Rhino News. "food4rhino news: a new store and more!" Consultada 29 de junio, 2014. http://blog.rhino3d.com/2014/06/food4rhino-news-new-store-and-more.html?utm_source=twitterfeed&utm_medium=twitter

²⁹⁶ Jacobs, Hiroshi. "New chameleon available." *Grasshopper*. Consultada 29 de junio, 2014. <http://www.Grasshopper3d.com/group/chameleon/forum/topics/new-chameleon-available?commentId=2985220%3AComment%3A1207340&groupId=2985220%3AGroup%3A584389>

²⁹⁷ Food4rhino. "Armadillo." Consultada 29 de junio, 2014. <http://www.food4rhino.com/project/armadillo?etx>

²⁹⁸ Edgemon, Christopher. "What is Grasshopper 2 development status?" *Grasshopper*. Consultada 28 de enero, 2016. <http://www.grasshopper3d.com/forum/topics/what-is-grasshopper-2-development-status>

Listado de plug-ins/add-ons

Esta tesis recopila, clasifica y describe brevemente más de 100 plug-ins/add-ons que puedan tener especial interés para el desarrollo de la temática de la tesis o la arquitectura en general. El listado incluye links de descarga y webs oficiales del software así como otros links de interés relacionados con tutoriales. Estos plug-ins, por su especificidad y experimentación son de gran ayuda en la buena praxis y ejecución de la arquitectura inspirada en la naturaleza. Sus características tanto estratégicas como formales pueden desembocar en múltiples tipologías arquitectónicas. Los plug-ins pueden requerir de programas de terceros para su aplicación.

A parte de la web food4rhino.com (foco actual de la recopilación de plug-ins) Pueden consultarse más extensiones en relación a sus ámbitos de aplicaciones en las siguientes web de Rhinoceros.

- <http://www.rhino3d.com/resources/>
- <http://wiki.daap.uc.edu/groups/infocenter/revisions/eabc6/5/>
- <http://wiki.mcneel.com/labs/home>

Algunos plug-ins para Rhino3D

Esta breve lista hace referencia a los plug-ins para Rhino más significativos y que cualquier usuario debería de tener en cuenta. Algunos de ellos pueden a su vez, tener add-ons para GH. Unos pocos han sido discontinuados desde la versión 4 de Rhino, pero siguen operativos en la versión 5.

- Rhino Remote, gestor de plug-ins
- Jamparc. Gestión de capas y otras utilidades. <http://jamparc.blogspot.com.es/p/jamparc-v5.html>
- Math: generación de curvas y superficies basadas en ecuaciones paramétricas. <https://www.rhino3d.com/resources/585> http://www.rhino3d.com/_develop/_v3_plugins/math/
- RhinoPolyhedra: más de 360 geometrías poliédricas. <http://www.food4rhino.com/project/rhinopolyhedra?etx>
- Bongo: animaciones para Rhino. <http://bongo.rhino3d.com/>
- Penguin: renderizado no fotorrealista. <http://wiki.mcneel.com/penguin/home>
- Flamingo: renderizado fotorrealista. <http://wiki.mcneel.com/flamingo/home>
- SectionTools: herramientas para secciones y otras utilidades para arquitectura. <http://wiki.mcneel.com/labs/sectiontools>
- RhinoBIM: Herramientas para arquitectura y construcción. <http://www.food4rhino.com/project/rhinobim?etx>
- Visual ARQ: Herramientas para arquitectura y construcción. Visualarq introduce componentes para su uso en Grasshopper en este webinar del 8 de Julio de 2015. <http://www.visualarq.com/support/visualarq-video-tutorial/>
- Pachiderm acoustical simulation: simulación Acústica. <http://www.>

food4rhino.com/project/pachyderm?etx

- RhinoLands: paisajismo. <http://rhinolands.com/>
- RhinoTerrain: importación de ciudades y terrenos. <http://www.rhinoterrain.com/fr/accueil.html#.V5cuqvmLSUk>
- Rhino Gold: diseño de joyería. <https://www.tdmsolutions.com/es/rhinogold/>
- Clayoo: modelado orgánico. webinar <http://www.novedge.com/webinar/61>
- T-Splines: modelado orgánico

Urbanismo/ecología

- Diva: optimización de energía y asoleamiento. <http://www.food4rhino.com/project/diva-rhino-0> <http://diva4rhino.com/>
- Urban daylight: optimización de energía y asoleamiento. <http://archsim.com/>
- Heron: análisis de ciudades. <http://www.food4rhino.com/project/heron> <https://www.youtube.com/watch?v=Wy3xKMjfJKw>
- Cheetah: diseño y planeamiento urbano. <https://www.youtube.com/watch?v=5ejhOcyFsMI>
- Volvox: gestión de volumen de datos <http://www.food4rhino.com/project/volvox?ufh>
- Ladybug+Honeybee: diseño de edificios medioambientales. <http://www.Grasshopper3d.com/group/ladybug>
- Geco: sostenibilidad y ecología para Ecotect. <http://www.food4rhino.com/project/geco?etx>
- Urban Network Analysis toolbox: análisis de redes urbanas. <http://www.food4rhino.com/project/una-toolbox?etx&ufh%253Fq=project%252Funa-toolbox&ufh>
- Elk: generación de mapas y topografías. https://www.youtube.com/watch?v=8_uQj_Rr8eA
- Mr.Comfy: optimización de energía y asoleamiento. <http://www.food4rhino.com/project/mrcomfy>
- UMI: optimización de energía y asoleamiento. <http://blog.es.rhino3d.com/2014/11/umi-modelado-urbano-en-rhino.html>

Mallas/Topológico

El uso de mallas de puntos ('meshes') o modelado poligonal se encuentra relacionado frecuentemente con los atributos orgánicos o la continuidad topológica de las geometrías. Su arquitectura es una de las más extendidas y por eso estos plug-ins resultan frecuentes en el ecosistema digital. Aunque son "aparentemente sencillos" y de fácil aplicación pueden resultar interesantes para automatizar patrones de cierta complejidad. Como se indicará a posteriori, resultan de gran ayuda a la hora de trasladar las propiedades embriológicas de la naturaleza a patrones digitales.

- Aether: isosuperficies y células. <http://www.Grasshopper3d.com/>

profiles/blogs/aether-simple-speedy-spatial-fields-for-Grasshopper?xg_source=activity <http://www.Grasshopper3d.com/video/isosurfacing-constraints>

- Cocoon: isosuperficies /marching cubes <http://www.bespokegeometry.com/2015/07/22/cocoon/>
- Eve / Voronox: relajación de voronoi (vorlax). <http://www.food4rhino.com/project/evevoronax?etx>
- EvoletTools T.MAP: remapeado de meshes <http://www.food4rhino.com/project/tmap?ufh>
- Evolutetools: panelación y optimizador de mallas. <http://www.food4rhino.com/project/evolutetools-lite?etx> Subdivisión con pliegues.
- Exoskeleton: mallas a partir de estructuras. <http://www.Grasshopper3d.com/group/exoskeleton> <http://www.bespokegeometry.com/2014/05/17/exoskeleton/>
- Ivy: desplegado y análisis de meshes. <http://www.food4rhino.com/project/ivy?etx> <https://vimeo.com/1540155481>
- Mesh machine remeshing (Plankton-componente dentro de Kangaroo): 'remeshing'. <http://www.food4rhino.com/project/kangaroo?etx>
- Mesh+: controles avanzados para mallas. <http://www.food4rhino.com/project/mesh?etx> <http://www.neoarchaic.net/mesh/>
- Meshedit: herramientas adicionales para mallas. <http://www.food4rhino.com/project/meshedittools?ufh>
- Meshflow: malla a partir de nube de puntos. <http://melonsoft.blog.com/meshflow/pointcloud2mesh/>
- Meshtools: herramientas adicionales para mallas. <http://www.Grasshopper3d.com/forum/topics/mesh-pipe>
- Monolith: modelado por voxels. <http://www.food4rhino.com/project/monolith?etx>
- Planar remeshing: creación de polígonos planos. <http://www.Grasshopper3d.com/profiles/blogs/planar-remeshing>
- Sandbox Topology: gestión de topología de mallas. <http://www.food4rhino.com/project/sandboxtopo?q=project/sandboxtopo>
- Subdivisión de mallas con pliegues. <http://www.bespokegeometry.com/2015/01/29/mesh-subdivision-loop-and-catmull-clark/>
- Triangle mesh completer: reparación de mallas. <http://blog.rhino3d.com/2013/11/triangle-mesh-completer-now-for-rhino-5.html>
- Weaverbird: modelado topológico. <http://www.giuliopiacentino.com/weaverbird/>
- Starfish: creación de patrones. <http://www.food4rhino.com/project/starfish?etx>

Reiterativos

Los siguientes plug-ins permiten la inserción de bucles ('loops') en las definiciones de GH, rompiendo así su linealidad de proceso y permitiendo construir sobre información generada por la misma definición.

- Anemone. <http://vimeo.com/83417807> <http://www.food4rhino.com/project/anemone> <http://www.designcoding.net/leaves-of-a-loop/>

- OctopusLoop. <http://www.food4rhino.com/project/octopusloop?etx>
- Hoopsnake. <https://wooj.files.wordpress.com/2011/11/vb-workshop-harvard-gsd-woosung-com1.pdf>
- Generator 2. <http://www.food4rhino.com/project/generator-2?ufh>
- Loop. <http://www.food4rhino.com/project/loop?etx>
- Colibri. Generación de combinatorias parametricas. Análisis on-line para archivos parametricos/evolutivos. <http://core.thorntontomasetti.com/colibri-release/>

Dinámico/Genético

Centrados en sistemas de agentes, estos plug-ins resultan en una variedad de sistemas dinámicos, patrones, o sistemas generativos...

- Heteroptera: agentes y otras herramientas. <http://www.food4rhino.com/project/heteroptera?etx>
- BOID library: swarm (inteligencia enjambre). <http://www.food4rhino.com/project/boid?etx>
- Quelea: swarm (inteligencia enjambre). <http://www.food4rhino.com/project/quelea?etx>
- FlowL: campos electromagnéticos. <http://www.food4rhino.com/project/flowl>
- Shortest walk: algoritmo de búsqueda. <http://www.food4rhino.com/project/shortestwalkgh>
- Rabbit: celular automata y L-systems. <http://morphocode.com/rabbit/>
- Ants automata: swarm (inteligencia enjambre). <http://www.food4rhino.com/project/ants-automata>
- Nudity branch: swarm (inteligencia enjambre) <http://www.Grasshopper3d.com/group/nudibranch> (necesario para ants automata)
- Phyllomachine: plantas algorítmicas. <http://www.Grasshopper3d.com/profiles/blogs/phyllomachine-modeling-plants-with-gh>
- Waterman Polyhedra. Polígonos basados en CCP ('cubic close packing') <http://www.food4rhino.com/project/waterman?etx>

Herramientas

La siguiente lista recopila plug-ins con comandos neutros que son de una utilidad innegable, cubriendo huecos y necesidades para los usuarios de GH.

Toolbox es uno de esos plug-ins que aúna varios de los problemas frecuentes que pueden aparecer en el proceso de trabajo de cualquier proyecto. Cabe destacar sus capacidades de exportación a otros formatos o el dialogo con tablas de Excel, eliminación de duplicados, desplegado de geometrías, etc. Además, y de especial interés para la tesis cuenta con un componente que graba todos los procesos y configuraciones de Galápagos. También cuenta

con su propio solucionador de fuerza bruta²⁹⁹ para ordenar y optimizar todas las posibilidades que una combinación de sliders puede generar. Sin embargo, la última actualización de este add-on data de Julio de 2014. Se considerará que el add-on Lunchbox suple la mayoría de las capacidades de Toolbox y añade de nuevas y mejores. La última fecha de actualización de Lunchbox es de 22 de Marzo de 2016.

- Toolbox: <http://www.food4rhino.com/project/tttoolbox?ufh>
- Lunchbox: (Proving Ground) <http://provingground.io/tools/lunchbox/>
- EdiTree: mejora la gestión de las listas <http://www.food4rhino.com/project/editree?etx>
- Treesloth: aumenta las capacidades de trabajar con árboles de información en Grasshopper <http://www.bespokegeometry.com/2015/07/07/treesloth/>
- Jackalope: comandos de deformación de espacio (like Bend, Flow, Mealstrom, Splop, Splorph, Stretch, Paper, and Twist). <http://www.Grasshopper3d.com/group/jackalope>
- Panelingtools: panelación/patrones y población de los mismos. <http://v5.rhino3d.com/group/panelingtools/forum/topics/release-panelingtools-for-rhino-5-and-Grasshopper> <https://vimeo.com/41953491> <http://vimeo.com/112434511>

Fabrication tools

Plug-ins asociados a la fabricación y conversión de datos virtuales.

- Human Tools: herramientas próximas al entorno CAD-CAM. http://www.Grasshopper3d.com/group/human?commentId=2985220%3AComment%3A660406&xg_source=activity <http://www.food4rhino.com/project/human?etx>
- Bower bird: sistema de costillas. <http://www.Grasshopper3d.com/group/bowerbird>
- RhinoCAM: software para maquinas CNC (Rhino). <http://www.food4rhino.com/project/computer-aided-manufacturing-plug?etx>
- RhinoNest: creación y ordenación de piezas para fabricación. <http://www.tdmsolutions.com/es/rhionest/>
- Xylinus: creación de Gcode. <http://www.food4rhino.com/project/xylinus?etx>
- Elefront: información adicional en geometrías para su “bake”. <http://www.food4rhino.com/project/elefront?etx>
- Fabtools: información para ‘bake’ geometría, otras herramientas habituales en la fabricación. <http://www.food4rhino.com/app/fabtools>

Exportación

Exportación -e importación- de información entre programas ajenos a GH.

²⁹⁹ En este caso no hay ningún algoritmo que optimice el proceso que permita alcanzar el valor óptimo. Simplemente se prueban todas y cada una de las opciones.

- Bengesht: Interacción entre dispositivos periféricos y Grasshopper. <http://www.food4rhino.com/project/bengesht?ufh>
- Shutterbug: Photoshop. http://www.Grasshopper3d.com/group/shutterbug?xg_source=activity
- Illustrator. <https://digitalsubstance.wordpress.com/2014/11/08/automated-a-i-vector-graphics-export-from-Grasshopper3d/>
- Cricket: Revit. <https://lmnarchitects.com/tech-studio/interaction/taking-a-Grasshopper-for-a-walk-2/>
- Iris: exportación a la web. <http://www.food4rhino.com/project/iris?ufh> Explicación: <http://www.form2fab.com/rhinoceros-mesh-for-effective-data-visualisation/>
- Speckle: exportación a web. <http://www.food4rhino.com/project/speckle?ufh&etx>
- Arduino: interacción con piezas de hardware. <http://arduino.cc/>
- Mosquito: plug-in social que importar y buscar cosas de twitter, google... <http://www.studionu.net/ceed3/social-media-data-to-gh/>
<https://www.youtube.com/watch?v=CnvJ3bGuI1w>
- Mantis. Establece interacciones con Mathematica (Stephen Wolfram) <http://www.food4rhino.com/project/mantis?etx>
- Bumblebee: Excel. <http://www.Grasshopper3d.com/group/bumblebee> <http://www.Grasshopper3d.com/group/bumblebee/forum/topics/g-oo-sister-project>
- Leaf cutter: Google Sheets <http://www.food4rhino.com/project/leafcutter?ufh>
- gHowl: conexión con otras aplicaciones o dispositivos. <http://www.food4rhino.com/project/gHowl?etx>
- SlingShot!: soporte para bases de datos. <http://www.food4rhino.com/project/slingshot?etx>
- Platypus: exportación a la web y colaboración en tiempo real con otros. <http://www.food4rhino.com/project/platypus?etx>
- Hydra: permite compartir definiciones. <https://github.com/HydraShare/hydra>
- Colibri. Generación de combinatorias parametricas. Análisis on-line para archivos parametricos/evolutivos. <http://core.thorntontomasetti.com/colibri-release/>

'Algorithmic Solvers'

Plu-ins algoritmos que albergan diferentes tipos de aproximaciones (evolutivos, neuronales, enfriamiento...):

- Octopus: multi-objetivo ES ('evolutive solver') <http://www.Grasshopper3d.com/group/octopus/page/octopus-examples> <http://www.food4rhino.com/project/octopus>
- Octopus-e: Octopus desfragmentado en múltiples componentes. <http://www.food4rhino.com/project/octopusE>
- Galápagos: ES incorporado en GH. <http://ieatbugsforbreakfast.wordpress.com/tag/galapagos/>
- Goat: algoritmo de optimización. <http://www.Grasshopper3d.com/group/goat>

- Silver eye: algoritmo basado en 'Particle Swarm Optimization' (PSO) <http://www.food4rhino.com/project/silvereye?etx>
- Crow: algoritmo de conexiones basado en redes neuronales artificiales. <http://www.Grasshopper3d.com/video/crow-artificial-neural-network-component-for-Grasshopper>
- Mapas auto-organizadores basado en redes neuronales. <http://www.Grasshopper3d.com/profiles/blogs/self-organising-map>
- Annealing solver: (dentro de Galápagos) optimización global por simulado de enfriamiento. <http://www.Grasshopper3d.com/forum/topics/i-eat-bugs-for-breakfast> <http://www.Grasshopper3d.com/video/2-simulated-annealing-runs>

Físicos/Estructurales

En lo que se refiere a simulador de físicas (tensión, fuerza, colisiones...) Kangaroo es con diferencia uno de los plug-ins más desarrollados. Su cantidad de opciones -y su veteranía- lo convierte en uno de los clásicos de GH. El resto de plug-ins pueden desempeñar tareas más específicas con mayor eficiencia. Varios plug-ins de este apartado podrían considerarse propios del apartado de meshes también.

- Karamba: optimización por elementos finitos, y otras herramientas para eficiencia energética y/o constructiva. <http://www.karamba3d.com/>
- Smartform: Optimiza, crea y analiza estructuras funiculares, superficies mínimas, catenarias y otros elementos. <http://www.food4rhino.com/project/smartform?ufh>
- RhinophysX: fuerzas y colisiones. <http://meshconsultants.ca/?p=815>
- Spider4Rhino: Crea estructuras tensadas. <https://vimeo.com/56603889> (Rhino)
- Kangaroo (simulador de físicas)
 - <http://vimeo.com/88649160>
 - <http://www.Grasshopper3d.com/forum/topics/reciprocal-structures-example-definition?groupUrl=kangaroo&source=facebook>
 - <http://www.youtube.com/watch?v=MsbyfC2usUk&feature=youtu.be>
- RhinoMembrane: simulación de membranas y superficies tensada. <http://www.food4rhino.com/project/rhinomembrane64?etx> (Rhino)
- Scan&Solve: simulador de esfuerzos. <http://www.food4rhino.com/project/sns?etx>
- Millipede: análisis estructural. <http://www.Grasshopper3d.com/group/> http://issuu.com/emilylucchesi/docs/algorithmic_sketchbook (pag83)
- RhinoVault: estructuras funiculares <https://vimeo.com/116347979> <http://www.food4rhino.com/project/rhinovault?etx>
- Sonic 4 Grasshopper: simulación de líneas de máxima pendiente y el cálculo de rebote de rayos. <http://www.food4rhino.com/project/sonic?etx>
- eVe: es un grupo de programadores que cuenta a fecha de marzo de

2016 con cuatro pequeños plug-ins, casi todos destinados a simulación de fenómenos físicos: lluvia, sol, explosión, y relajación. Se consideran plug-ins de menor importancia que pueden ser imitados con otros plug-ins o definiciones de GH. <http://www.programmingarchitecture.com/>

Extras

- Grasshopper Launcher: ejecuta archivos de extensión .gh o .ghx. <http://www.Grasshopper3d.com/forum/topics/Grasshopper-launcher>
- Metahopper: gestión paramétrica de componentes en la interfaz de GH. <http://www.Grasshopper3d.com/group/metahopper>
- Custom graph mapper: personalización de gráficas. <http://www.food4rhino.com/project/custom-graph-mapper?etx>
- Axon Canvas: Extensión del menú del tercer clic del ratón. http://www.Grasshopper3d.com/video/axon-canvas-widget?xg_source=activity
- Human UI: creación de interfaces. <http://www.food4rhino.com/project/human-ui?ufh>
- Bifocals: muestra los nombres de los componentes. <http://www.Grasshopper3d.com/forum/topics/bifocals-ending-the-icons-vs-text-debate>
- Conduit (Proving Ground): Edición paramétrica de gráficos y tablas en Grasshopper. <https://www.youtube.com/watch?v=-Azu4c7LBuA>
<http://www.Grasshopper3d.com/profiles/blogs/proving-ground-conduit>
- Speckle Streams. Streaming online y modelado multiusuario en tiempo real sincronizado. <http://www.food4rhino.com/app/speckle-streams>

Grasshopper 2.0

En el momento de publicación de esta tesis han pasado 9 años desde que GH apareció, una cantidad de tiempo nada despreciable para un software que aún se considera en fase Beta. El plan inicial, es que Rhino6 incorpore Grasshopper 1.0 (una versión del software actual integrada y -teóricamente- ausente de errores). Ello implica que todas las nuevas novedades destinadas a GH se incorporarán a su versión 2.0. La última versión beta/WIP de GH se publica en Agosto de 2014³⁰⁰ (0.9.0076).

En Octubre de 2013, David Rutten anunciaba en el foro de GH³⁰¹ una reunión para discutir las características de GH2, la cual se listan más abajo.

The major topics discussed for GH2 during this period will be:

³⁰⁰ Grasshopper. <http://www.Grasshopper3d.com/forum/topics/Grasshopper-0-9-0076-available-for-download?id=2985220%3ATopic%3A1121907&page=2#comments>

³⁰¹ Rutten, David. "Partial Developer Absence." *Grasshopper*. Consultada 31 de octubre, 2011. <http://www.Grasshopper3d.com/forum/topics/partial-developer-absence>

- Documentation/Help
- GHA/Cluster/VB/C# App-Store
- Localization (i.e. languages other than English)
- Constraint Engine implementation
- Improved VB/C#/Python development tools
- Multi-threading the solver
- Building a Mac version

En esta discusión (Pain Points in Grasshopper³⁰²) del foro se especula sobre su porvenir y los cambios que podría incluir. Lejos de extraer todos sus contenidos (23 páginas de comentarios) cabe destacar de forma general la preocupación por detectar necesidades que son constantemente cubiertas por software de terceros y como agruparlas en las intenciones principales de GH, así como mantener el software libre, abstracto, ajeno a necesidades concretas que pueden ser útiles al principio pero que son susceptibles de quedar anticuadas u obsoletas.

El 26 de Junio de 2015 David publica en otra discusión el estatus de GH2³⁰³:

- Reescrito por completo en C# únicamente.
- UI ('user interface') en Eto para mejorar su conversión a OSX.
- Documentación completa: glosarios, conceptos, explicaciones...
- SDK con 'Multi-threading' (capacidad para trabajar con varios núcleos a la vez).
- Mejoras en las estructuras y la conversión de información.
- Creación de información personalizada que fluye a través de la definición.
- Mejora en las ecuaciones ('expressions').

Comentario que sigue con los planes que "espera" llevar acabo:

- Simplificado de la interfaz y eliminación de opciones.
- Más información a través del zoom.
- Mejores herramientas para manejar grandes archivos.
- Soluciones multi-threaded que funcionarán paralelamente.
- Simplificación del sistema de instalaciones de plug-ins para GH.
- Nuevos tipos de datos que aumenten la utilidad y reduzcan la información (sub-d geometry, extrusiones, polilíneas, esferas, graficas, bitmaps...)
- Mejores maneras de organizar y mostrar la información (graficas, esquemas, barras...)
- Los colores por defecto serán gris y amarillo en lugar de rojo y verde. (!)

³⁰² Syp, Marc. "Pain points in Grasshopper." *Grasshopper*. Consultada 31 de mayo, 2013. http://www.Grasshopper3d.com/forum/topics/pain-points-in-grasshopper?xg_source=msg_com_forum&id=2985220%3ATopic%3A1069769&page=2#comments

³⁰³ Edgemon, Christopher. "What is Grasshopper 2 development status?" *Grasshopper*. Consultada 30 de enero, 2016. <http://www.grasshopper3d.com/forum/topics/what-is-grasshopper-2-development-status>

Se incluyen aquí otros links y artículos que hacen menciones a la futura versión de GH2:

- Sobre información inmutable y código C# o C++³⁰⁴
- Colores³⁰⁵
- Gestión de plug-ins³⁰⁶ //imagen de la referencia
- Editor de graficas³⁰⁷
- Interfaz y colores³⁰⁸

También resulta de interés el desarrollo de Rhinoceros 6 que se lleva a cabo paralelamente y que incorporará nativamente esta primera versión 1.0 de Grasshopper. Los avances que se producen en Rhinoceros repercutirán de manera significativa en Grasshopper tarde o temprano y por lo tanto arrojan luz sobre nuevos procesos. Para esta v6 se aprecia énfasis en el modelado por malla: ngons, quadmesher, subelementos en malla, modelado subD... herramientas que Grasshopper había tenido que incorporar por cuenta propia, y que seguramente verán una mejora dramática en su rendimiento en el momento que funcionen a través de Rhinoceros. También se han añadido nuevos comandos para el Rhino History (una especie de GH simplificado incorporado en Rhino) y otras mejoras en rendimiento, renderizado y grafismos³⁰⁹.

³⁰⁴ Rutten, David. "Immutable classes, my new favourite methodology." *I Eat bugs for breakfast*. Consultada 28 de septiembre, 2014. <http://ieatbugsforbreakfast.wordpress.com/2014/09/08/immutable-classes-my-new-favourite/>

³⁰⁵ Id., "A splash of colour." *Grasshopper*. Consultada 30 de junio, 2015. <http://www.Grasshopper3d.com/photo/a-splash-of-colour?context=user>

³⁰⁶ Graziano, Andrea. "Aglomeración de add-ons para GH." Facebook. Consultada 4 de febrero, 2015. <https://www.facebook.com/photo.php?fbid=10208807290565186&set=p.10208807290565186&type=3&theater>

³⁰⁷ Rutten, David. "Grasshopper 2 function editor." *Grasshopper*. Consultada 30 de noviembre, 2015. <http://www.Grasshopper3d.com/video/Grasshopper2-function-editor>

³⁰⁸ Rutten, David. "Colour picker UI test." *Youtube*. Consultada 4 de febrero, 2015. <https://www.youtube.com/watch?v=xelsMC5LZbk>

³⁰⁹ Trofa, Francesco. "Rhino 6 - adelanto exclusivo de DDD." *Treddi.com*. Consultada 31 de mayo, 2016. <http://www.treddi.com/cms/news/rhino-6-anteprima-esclusiva-al-ddd-2016/3011/>

2.3. Lo paramétrico

*Many designers soon realized that more sophisticated programs could manage complexity beyond human capabilities by structuring routines and procedures*³¹⁰. ARTURO TEDESCHI

Pero, ¿qué es paramétrico? El término paramétrico ha sido el foco de constantes discusiones durante los últimos años. Su creciente importancia y difusión, pero también la ligereza o vaguedad con la que se usa ha generado un discurso cada vez más rico que no hace sino demostrar el valor de una tipología arquitectónica aún en auge y con mucho por clarificar. Capítulos anteriores en esta tesis han dejado entrever que supone una componente esencial en las ciencias de la computación y la lógica (cap. 2.2), representando el cambio -la adaptación- como expresión de un grupo de reglas o relaciones: ecuaciones, algoritmos, programación, modelado visual... sin duda una de las grandes características que ha introducido el CAD ha sido la capacidad de modificar en tiempo real los diseños, lo efímero y alterable de lo virtual y digital.

Durante la edición del máster en Arquitectura Biodigital del año 2010 se abrió un interesante debate iniciado por el profesor Neal Leach. En él, se buscaba la diferenciación entre paramétrico, algorítmico, código, dinámico... todo el amasijo de términos que, como se menciona anteriormente, aparecen con cierta frecuencia y con poca rigurosidad. Leach se reitera en los recelos y equivocaciones que rodean el término “paramétrico”³¹¹. El problema reside en la propia simplicidad de los conceptos, y en la complejidad del software o el propio proceso de diseño. Resulta absurdo trazar líneas que delimiten conceptos que frecuentemente se encuentran solapados y funcionando al mismo tiempo, de la misma manera que las “etiquetas” fallan normalmente en calificar la música, la arquitectura, el arte... las referencias y matices son difusos y se entremezclan, y al “etiquetarlos” no hacemos sino simplificar su identidad con la consecuente pérdida de información. Por supuesto, se entiende la utilidad de clasificar y se extiende aquí el debate inicial haciendo una comparación paralela con el software usado. En sintonía con la importancia de las herramientas mencionadas anteriormente, se tratará de clasificar ejemplos de software en los temas que giran en torno a lo paramétrico. Debido a ello, no se clasifica la arquitectura, sino el proceso de proyección, la metodología. Y es que etiquetar un resultado final (un proyecto arquitectónico acabado) aún es más irresponsable -si cabe- sin saber qué aproximación ha permitido su desarrollo.

³¹⁰ Tedeschi, Arturo, Fulvio Wirz, y Stefano Andreani. *AAD, Algorithms-aided Design: Parametric Strategies Using Grasshopper*. Brienza, Italy: Le Penseur Publisher, 2014. p.22.

³¹¹ Leach, Neil, y Patrik Schumacher. “On Parametricism: A Dialogue Between Neil Leach and Patrik Schumacher.” *Time + Architecture*. nº 2012/5: pp. 1-8. Consultada 4 de febrero, 2015. <http://www.patrikschumacher.com/Texts/On%20Parametricism%20-%20A%20Dialogue%20between%20Neil%20Leach%20and%20Patrik%20Schumacher.html>.

2.3.1. Software y su componente paramétrica

En principio “lo paramétrico” es el concepto más simple de todos. Como su nombre indica, lo paramétrico está basado en parámetros o variables, son las incógnitas a una ecuación. Entendemos por algo paramétrico aquello que permite la modificación de sus parámetros, y no lo que está compuesto por parámetros, ya que esto abarcaría la totalidad de los objetos reales. Así, un software puramente paramétrico solo debería ser capaz de cambiar los parámetros de la ecuación, pero no el orden de los mismos o la relación entre ellos. Un buen ejemplo de ello es el 3D Studio MAX donde, aun después de haber modelado un cubo, se pueden cambiar su tamaño o número de subdivisiones. No ha de confundirse esto con la capacidad de modificar un elemento acabado, como podría ser mediante el escalado del mismo o la reconstrucción. En 3DStudio las propiedades de ese cubo siempre están “en el aire” y pueden ser alteradas. En otros programas como Rhino, una vez modelado el cubo este deja de ser un cubo para convertirse en un volumen cerrado de seis caras; y si se desease cambiarlo habría que ejecutar nuevos comandos de modificación. Este último se conoce como modelado clásico.

De la misma manera pero incorporando la interacción entre relaciones (que no alterando su orden) encontramos programas como Pro/ENGINEER (1988), CATIA (1993)³¹², SolidWorks (1995) o TopSolid (1996). Software normalmente orientado al modelado de piezas mecánicas o industriales. En este modelado se compone de muchas piezas interdependientes y por tanto establecer tamaños u orientaciones respecto a las anteriores es de gran valor. Por ejemplo, si una pieza circular tiene que ser concéntrica y paralela a la base de un cilindro, rotar ese cilindro y cambiar su diámetro también cambiaría la pieza circular para mantener sus mismas relaciones. Este tipo de modelado también se conoce como “modelado por restricción”. AutoCAD comenzará a incorporar este tipo de reglas paramétricas mucho más tarde (versión 2010), 43 años después del Sketchpad y aproximadamente 15 más tarde que el mismo tipo de software orientado a la ingeniería automovilística e industrial, fechas que demuestran la tardanza de la arquitectura en adoptar el “software paramétrico”³¹³.

*The goal is to create a system that would be flexible enough to encourage the engineer to easily consider a variety of designs. and the cost of making design changes ought to be as close to zero as possible. In addition, the traditional CAD/CAM software of the time unrealistically restricted low-cost changes to only the very front end of the design-engineering process*³¹⁴. SAM GEISBERG

³¹² CATIA se presenta en 1977 pero no incorpora estas capacidades hasta 1993.

³¹³ Davis, Daniel. “A history of parametric.” Consultada 31 de agosto, 2013. <http://www.danieldavis.com/a-history-of-parametric/>

³¹⁴ Teresko, John. “Parametric Technology Corp.: Changing the way Products are Designed.” *Industry Week*. December n20. Diciembre, 1993. p. 28

Respecto al código no hay dudas aunque si matices. Las líneas de código implican la escritura y por ello el software o la acción de llevarlo a cabo toma la palabra 'scripting' (en español: escritura, guion, o letra). El scripting (programación) puede desarrollarse sobre cualquier lenguaje ya mencionado y en programas específicos para ello, como el plug-in Monkey para Rhino, Autolisp para AutoCAD, MEL en Maya, Processing, o el componente de Python dentro de Grasshopper. AutoCAD fue en este caso uno de los pioneros:

The developers of software like AutoCAD, even back in 1982 realized that including a scripting interface allowed them to “avoid lots of custom coding and application specific stuff [they would] otherwise get asked for”³¹⁵. JOHN WALKER

Ahora bien, es importante (a la vez que redundante) resaltar que todo lo que ocurre en un ordenador se ejecuta a través de líneas de código, y que el scripting al que estamos acostumbrados es ya de por si una adaptación del código más básico y en ningún momento supone una interacción 100% pura con el ordenador. Esto no es un aspecto negativo, sino el producto de la constante evolución de los lenguajes informáticos que permiten mejores resultados economizando funciones y largas líneas de código. Por supuesto, el 'scripting' supone el máximo exponente de libertad ya que carece prácticamente de las restricciones de una interfaz gráfica y el usuario es libre de combinar el lenguaje de la manera que más le plazca. En ciencia computacional, un 'script' es prácticamente lo mismo que un algoritmo. El primero es más propio del ámbito de la informática mientras que el segundo es más universal conceptualmente. Los dos implican para el propósito de la tesis un paquete de órdenes que procesa información. En 'scripting' se usan paquetes ('scripts' o 'algorithms') que desempeñan determinadas funciones que pueden ser cortadas y copiadas, evitando así reescribir tareas indefinidamente alargando tremendamente el proceso.

De la misma forma que el término 'script' parece haberse asentado mejor en el ámbito de la programación -escrita-, el de algoritmo lo ha hecho para definir el cuarto tipo de modelado: 'visual programming language' o 'visual algorithmic modeling'. El ejemplo más representativo de esta tipología es el Scratch, desarrollado en el MIT en 2007, donde mediante una interfaz gráfica "piezas de puzle" que representa algoritmos/scripts pueden ser combinadas para generar un resultado. Es decir, se agrupan líneas de código en paquetes cerrados que pueden ser unidos en cualquier orden -siempre y cuando el 'input' y el 'output' concuerden-. El software usado en los experimentos de esta tesis, Grasshopper (2007, Robert McNeel & Associates) o Generative Components (2003, Bentley Systems) son otros ejemplos de este tipo de modelado³¹⁶. En última instancia, estos programas repercutirán en lo que hoy puede considerarse como 'Algorithmic Aided Design' (AAD), como evolución

³¹⁵ Walker, John. *The Autodesk File: Bits of History, Words of Experience*. Fourth edition. Thousand Oaks (Ca): New Riders, 1989.

³¹⁶ Decenas de ejemplos de programas que hacen uso de lenguajes de programación visual: http://blog.interfacevision.com/design/design-visual-programming-languages-snapshots/?utm_source=twitter&utm_medium=social&utm_content=4046066

respecto al CAD. Otros ejemplos tempranos -década de los 90- de este tipo de software incluyen MAX/MSP y Sage (que luego se llamará Houdini).

No ha de sorprender que la programación visual se origine desde los mismísimos principios de la interfaz gráfica, pudiendo considerar el pionero SketchPad como uno de sus primeros ejemplos³¹⁷. Ha sido el crecimiento exponencial de la capacidad computacional la que ha permitido retomar esta vertiente que ahora sí, está repleta de potencial. La programación visual permite cambiar el orden de las relaciones y combinarlas a placer (con capacidad limitada por los paquetes diseñados) y modificar los parámetros a través de diferentes piezas desarrolladas para dicho propósito. Y todo ello, sin la necesidad de escribir una sola línea de código.

El discurso de “etiquetar” procesos alcanza nuevas cotas de incoherencia en el momento que se descubre que Grasshopper permite introducir paquetes de código programados por uno mismo dentro de sus archivos. ‘Scripting’ dentro de ‘visual algorithmic programming’ que, por supuesto es paramétrico intrínsecamente. Por consiguiente, acuñar los proyectos en estilos requiere un entendimiento elevado de las herramientas usadas durante su proceso así como una mirada abierta conceptualmente en su aplicación. También, la comprensión de un resultado justificado y coherente con la metodología: ¿es un cubo modelado con GH arquitectura paramétrica? La herramienta no debería bastar para acuñar la tipología, sino que también su estrategia interna debe de hacer uso de las propiedades únicas de la misma.

2.3.2. Diseño paramétrico, el Meta-Diseño

Durante este apartado, la tesis se centra en el campo del diseño gráfico, una disciplina que no es ajena al arquitecto: grafismo y geometría nunca dejan de ser la síntesis y comunicación de la arquitectura, y por ello su estudio y progresión pueden resultar valiosos para la concepción de la arquitectura. Unos requerimientos computacionales menos estrictos, su ejecución más económica, y su contexto menos vinculante, han permitido al diseño gráfico aplicar lo paramétrico con anterioridad y mayor profundidad.

Desde el discurso más primigenio, el diseño gráfico ha de iniciarse a partir del dibujo, de la línea como elemento básico que delimita y define. Debido a la influencia del arquitecto Bernard Cache en el máster de arquitectura Biodigital, se aborda lo paramétrico desde un punto de vista geométrico e histórico para reforzar el punto de vista planteado, principalmente a través de la figura de Vitruvio y Durero:

En este caso, como se decía, no es la vertiente arquitectónica la que nos interesa

³¹⁷ Boshernitsan, Marat, y Michael S. Downes. *Visual Programming Languages: A Survey*. Berkeley: Computer Science Division, University of California, 2004. <http://digitalassets.lib.berkeley.edu/techreports/ucb/text/CSD-04-1368.pdf>

de Vitruvio, sino la de ingeniero y los dibujos -casi instrucciones- para la fabricación de máquinas, especialmente las de guerra. Por sus características cambiantes (materiales a disposición, ubicación del ejército, posición de la fortaleza, sus respectivas medidas...) las máquinas para asediar ciudades se construían frecuentemente in-situ y a medida. Su descripción entonces, no eran números absolutos, sino relaciones entre sus medidas que permitían un catálogo de posibilidades gracias a los “planos paramétricos”.

Todas las proporciones o dimensiones de tales máquinas están condicionadas a la longitud que posea la flecha que deben lanzar; el tamaño del agujero, en el travesaño, medirá una novena parte de la longitud de la flecha; a través de unos agujeros se tensan las cuerdas retorcidas, que deben mantener los brazos de la catapulta. La altura y la anchura de ese travesaño depende del diámetro de los agujeros. Las piezas de madera, situadas encima y debajo del travesaño - denominadas «pentreta»- tendrán el grosor del diámetro del agujero y la anchura de un diámetro más tres cuartas partes; en sus extremos, un diámetro y medio³¹⁸. VITRUVIO

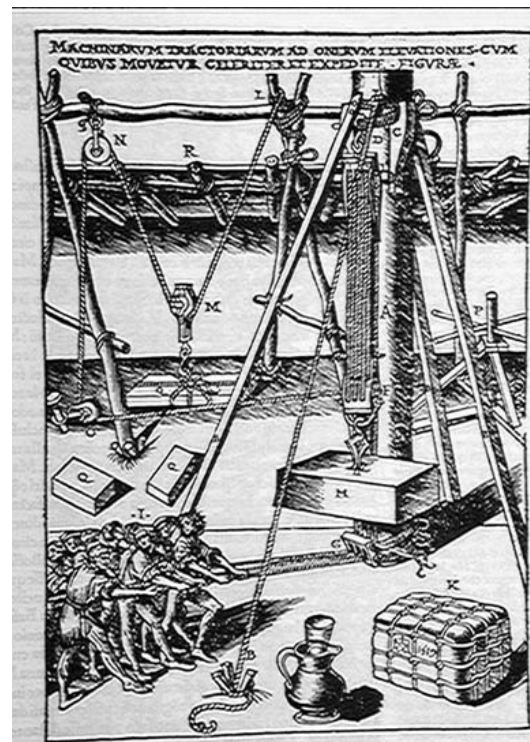
016. /// Vitruvio, Siglo I a.C. p. 268. Máquina de Vitruvio donde se muestran letras (incógnitas) para describir las piezas.

El discurso matemático y los utensilios paramétricos serán necesarios para desarrollar las teorías y el pensamiento de Alberto Durero³¹⁹ durante el s. XV. La descripción de las geometrías de manera relacional es uno de los motivos que llevará a Durero a tratar de unificar la geometría, describiendo y explicando por completo sus leyes en una obra de varios volúmenes. Sin embargo la empresa crecía sin parar sin signos de alcanzar un fin, con lo que finalmente dicho documento acabó traducándose en tres tomos más pequeños.

Underweysung de Messung: introducción a la medida³²⁰

- I Líneas
- II Superficies
- III+IV sólidos (arquitectura, relojes de sol y alfabeto)
- IV (cubo) despiece, multiplicación y representación

En ellos, Durero aboga a un nivel de matemáticas superior³²¹ que trasciende las matemáticas euclidianas y plantea con ello una serie de problemas a resolver. Estos problemas matemáticos no



³¹⁸ Polión, Vitruvio. “Libro décimo, capítulo 10, las catapultas.” *Vitruvio: Los Diez Libros De Arquitectura*. Madrid: Alianza Editorial, 1995 (original en Siglo I a.C.). p. 268.

³¹⁹ Panofsky, Erwin. *Vida Y Arte De Alberto Durero / Versión Española De María Luisa Balseiro*. Madrid: Alianza, 1982.

³²⁰ Dürer, Albrecht, Jeanne Peiffer, Jesús Espino Nuño, y Juan Calatrava Escobar. *De La Medida*. Tres Cantos, Madrid: Akal Ediciones, 2000.

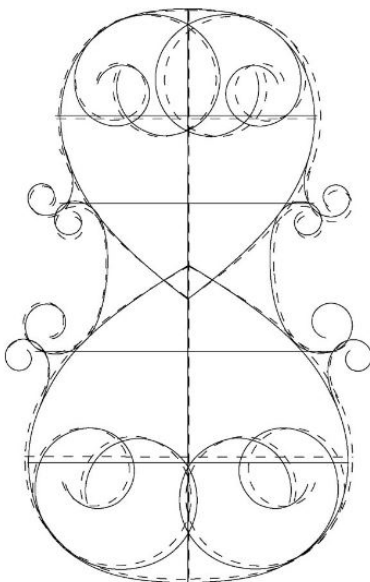
³²¹ Geometría Superior: no se puede llevarse a cabo únicamente con compás y regla.

son pura teoría, sino que suponen importantes avances para la comprensión del mundo que nos rodea apoyando un uso práctico, y un entendimiento más avanzado de la geometría, que consecuentemente repercute en la posibilidad de imitar y generar otras complejidades a voluntad. Ellos son: la duplicación del cubo, la cuadratura del círculo, y la trisección del ángulo. Para resolver estos problemas Durero ingeniará una serie de máquinas capaces de resolver y reproducir las soluciones a dichos problemas. Estas máquinas no son sino herramientas, compuestas por diferentes piezas y que se combinan en movimientos muy básicos de extrema sencillez como puede ser pivotar o deslizar. Los resultados geométricos resultantes serán los más complejos hasta el momento, reforzando la idea de que leyes o movimientos simples dan lugar a geometrías complejas (emergen, como se verá en capítulos posteriores). Durero logra construir herramientas paramétricas, utensilios cuyas proporciones cambian para producir diferentes resultados.

Bernard Cache realiza una aproximación entre los problemas y principios de la antigüedad, los descubrimientos de Durero y la importancia geométrica y conceptual asociada a nuestro presente, ejemplificándolos a través de ejercicios que se desarrollan en software paramétrico (en este caso, TopSolid). Los resultados no son descriptibles sino como una variedad de variedades. Es decir, Durero está creando un abanico de opciones que afectan a un nuevo abanico -la siguiente pieza- y así sucesivamente, creando una estructura creciente en árbol. Durero clasifica estas nuevas tipologías geométricas en los siguientes apartados y sus consecuentes relaciones con objetos o comportamientos físicos:

- snail-spiral-visuales-proporciones
- spider-excentricidad-planetas
- snake-spline y no proporcional-doble proporción

017. /// Albrecht Dürer, 2000. p.32. Dibujo de curvas tipo 'snake'.



A destacar los dibujos de las “serpientes”, que introducen por primera vez líneas curvas de curvatura no continua, es decir, que no son dibisibles en arcos -y de serlo, cada uno de esos arcos sería infinitesimalmente pequeño-. Este tipo de curvas son las antecesoras de las curvas Bezier, Nurbs o Splines, descritas en el capítulo CAD y CGI (cap. 2.2.3).

El análisis de los dilemas geométricos y como abordarlos a través de herramientas paramétricas se explica con mayor detalle en al tesina de master del doctorando³²². En ella también se aluden a algunos de los paradigmas computacionales y el problema fundamental computacional de la referencia circular (el loop).

El hecho de que las proporciones se encuentren en las herramientas, es de vital importancia para entender que el parametrismo o las relaciones entre los elementos que compongan la arquitectura no tienen el deber

³²² Navarro, Diego. *Random May Not Be Random*. Barcelona: s. e., 2011. Tesina en máster de Arquitectura Biodigital. p.57.

asociadas a través de las rectas generatrices, booleanas, o arcos catenarios³²⁸.

Las intencionalidades del dibujo paramétrico acaban contaminándose inevitablemente en un diseño que no solo adopta su utilidad, sino que hace de las propiedades paramétricas su característica más fuerte, alcanzando un nuevo nivel conceptual. El profesor Rune Madsen³²⁹, artista digital, cita a Donald Knuth en un artículo de su propio blog para reinterpretar la aparición del meta-diseño.

*Meta-design is much more difficult than design; it's easier to draw something than to explain how to draw it*³³⁰. DONALD KNUTH

En el artículo Madsen menciona las barreras entre las aproximaciones artísticas del diseño (ya sea gráfico, pictórico, escultórico...) y las vertientes técnicas más industriales, dominadas respectivamente por sus propias herramientas. Si bien la introducción de la computación en el diseño ha propiciado su unión, la ideología mediante la cual se aproximan no ha variado en su mayor parte. Sólo en los últimos años se ha visto el diseño de interfaces o páginas web progresivamente invadido por el diseño responsivo -adaptivo, paramétrico-, culminando finalmente a nivel de difusión con la aparición del 'Material Design' para Android³³¹. No obstante, Madsen predice un cambio más radical: del diseño al meta-diseño. En la aproximación tradicional, el diseñador trabaja directamente en un producto que representa un artefacto final (logo, web, poster...). El meta-diseñador trabaja en un sistema de diseño (pudiendo ser o no software) que es capaz de crear el artefacto final. Esto permite que el mismo sistema se aplique en diferentes contextos para producir un rango de productos sin mayor esfuerzo.

El software para generar infinitos logos para la Casa da música de Koolhaas³³² o la tipografía adaptable Metafont de Knuth³³³ son algunos ejemplos recientes de esta filosofía³³⁴. Tiny Artists es una obra que lleva la relación entre diseño y computación un paso más lejos: no solo utiliza los algoritmos para generar el producto, sino que lo convierte en protagonista indiscutible. El proyecto consta de una serie de pequeños programas que generan un número limitado de diseños para luego borrarse a sí mismos, eliminando la posibilidad de reproducir de nuevo los mismos resultados³³⁵. Se pretende con ello despegarse

³²⁸ Burry, Jane, y Mark Burry. *The New Mathematics of Architecture*. Londres: Thames and Hudson. 2010. pp. 35-39.

³²⁹ Runemadsen. Consultada 4 de febrero, 2015. <http://runemadsen.com/>

³³⁰ Runemadsen. "On meta design and algorithmic design systems." Consultada 4 de febrero, 2015. <http://runemadsen.com/blog/on-meta-design-and-algorithmic-design-systems/>

³³¹ Google. "Introduction to Material Design." Consultada 4 de febrero, 2015. <https://www.google.com/design/spec/material-design/introduction.html#introduction-goals>

³³² Sagmeister & Walsh. "Casa da musica." Consultada 4 de febrero, 2015. <http://www.sagmeisterwalsh.com/work/project/casa-da-musica-identity/>

³³³ Metafont. Consultada 4 de febrero, 2015. <http://metafont.tutorial.free.fr/>

³³⁴ Felsing, Ulrike. *Dynamic Identities in Cultural and Public Contexts*. Baden, Switzerland: Lars Müller, 2010.

³³⁵ Runemadsen. "Tiny artists." Consultada 4 de febrero, 2015. <http://runemadsen.com/work/tiny-artists/>

de la capacidad infinita de copiar del mundo digital, a la vez que convertir el software en un elemento único, con capacidad propositiva y un ciclo de vida limitado.

019. /// Vilmos Huzsar, portada de la revista De Stijl, 1917. Foto del curso de Rune Madsen. Las formas del logotipo de De Stijl parecen regirse por leyes intrínsecas.

El diseño pseudo-paramétrico no obstante, aparece mucho antes: los diseñadores siempre se han regido por reglas o sistemas con el fin de obtener un resultado coherente y con significado. Cualquier movimiento artístico, por muy abstracto o extraño que sea, tiene sus reglas. Aunque las reglas sean que no hay reglas. Las necesidades de uso, la funcionalidad, el contexto, marcan una serie de parámetros que acotan esas reglas en cualquiera que sea la disciplina. Como uno de los ejemplos más tempranos, el logo original de la publicación De Stijl³³⁶, donde el uso de forma y proporción es casi algorítmico, apuntando a la geometría del arte neoplasticista, abstracto o minimalista, en una especie de pensamiento proto-computacional. La arquitectura también, claro, a través de ejes, subdivisiones y proporciones, de esquemas que subordinan el resto de la geometría y que de ser cambiados alteran los parámetros resultantes. Se evidencia, tal y como demuestran los casos de Vitruvio, Durero o Dana, que no se necesita la computadora para diseñar o inventar lo paramétrico, se necesita la computación para llevarlo a buen término de manera realista, multiplicando su potencial, y ver más allá de lo que imaginable con nuestras limitaciones.

I envision a design practice that works in the intersection between art, design and computation. A company founded on the belief that the pragmatic and poetic is inseparable, and that modern design products should be dynamic, adaptable systems built in code. Most of all, it would be a company dedicated to good ideas, with the talent to implement them despite technical requirements³³⁷. MADSEN

La comprensión de las reglas que intervienen en cada ámbito es necesariamente, responsabilidad de aquellos que las usan y son sabedores de la disciplina. Poco tiene que ver el parametrismo (las relaciones) aritméticas con las de la geometría³³⁸ y, consecuentemente, también divergen de disciplinas como



³³⁶ Movimiento artístico asociado al Neoplasticismo Holandés (1917-1931).

³³⁷ Gerstner, Karl, Emilio Ambasz, and Karl Gerstner. *Think Program: Synopsis of the Exhibition "designing Programs/programming Designs" by Karl Gerstner*. New York: Museum, 1973.

³³⁸ Williams, Kim, y Lionel March. *Shape and Shape Grammars*. Basel: Birkhäuser, 2011.
<http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs00004-011-0054-8>

la arquitectura que incorpora nuevos valores y relaciones a la ya extensa biblioteca de interacciones. El arquitecto debe pues, descubrir y dominar la “gramática de la forma” (‘shape grammar’³³⁹) de la arquitectura con el fin de parametrizarla con éxito.

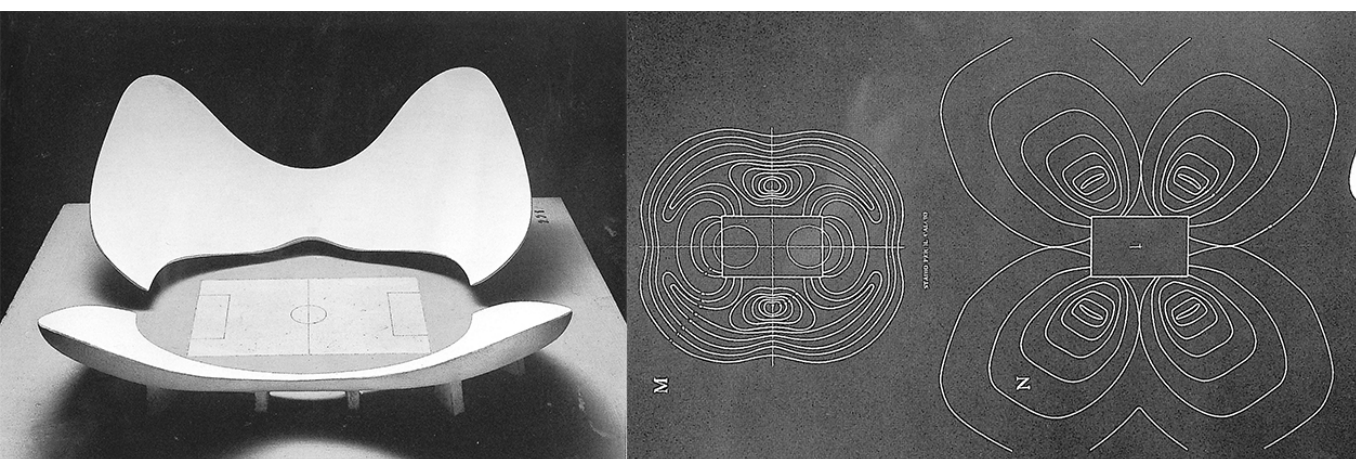
2.3.3. Repercusión estilística de lo paramétrico en la arquitectura

Doubt is an uncomfortable condition, but certainty is a ridiculous one.
VOLTAIRE.

En 1939, el arquitecto italiano Luigi Moretti “introdujo”³⁴⁰ la definición para arquitectura paramétrica durante su investigación, la cual culminó en una serie de estadios deportivos. Los parámetros de diseño estaban ligados a los ángulos de vista y su viabilidad económica. La forma final era generada a través de psuedo-isocurvas que trataban de optimizar la posición de los espectadores³⁴¹.

The parameters and their interrelationships become [...] the code of the new architectural language, the “structure” in the original sense of the word [...], The setting of parameters and their relation must be supported by the techniques and tools offered by the most current sciences, in particular by logics, mathematics [...], and computers. Computers give the possibility to express parameters and their relations through a set of (self-correcting) routines³⁴². MORETTI

020. /// Luigi Moretti, *Estadio deportivo*, 1960. Foto de Bucci y Mulazzani, 2006. pp. 204-208. Las líneas topográficas (isocurvas) se basan en los parámetros de visibilidad.



³³⁹ Stiny, George, James Gips. “The Generative Specification of Painting.” *Pictorial and Formal Aspects of Shape and Shape Grammars*. Basel: 1975. pp. 289-310.

³⁴⁰ Notéese que si bien es ulterior a los trabajos de Dana, es considerablemente anterior a la aparición de la computación moderna.

³⁴¹ Moretti, Luigi. “Architettura Parametrica” *Milan Triennale exhibition*. Milan, 1960.

³⁴² Moretti, Luigi, Federico Bucci, y Marco Mulazzani. *Luigi Moretti: Opere E Scritti*. Milano: Electa, 2001. pp. 204-208.

El dibujo por computación añade un lenguaje más a la geometría clásica, requiriendo al arquitecto hábil en la descripción de las formas de nuevos conocimientos para aplicar los clásicos³⁴³. Por tanto, problemas que ya estaban resueltos en otras disciplinas -física, matemáticas, o geometría- necesitarán ser abordados y solucionados de nuevo desde la perspectiva computacional³⁴⁴, y al hacerlo, desvelarán nuevas oportunidades que se habían mantenido inalcanzables. Este proceso de traducción, este filtro a través de lo computacional también puede -positiva o negativamente- teñir la arquitectura con un estilo definido y característico. William Mitchell argumentó en 1975 que si los ordenadores fuesen capaces de producir arquitectura, esta estaría caracterizada por unos rasgos estilísticos particulares:

*If computer systems become architects they may be academic classicists, heirs to Durand and Guadet. Sadly, I turned out to be right*³⁴⁵. WILLIAM MITCHELL

Como Jean Durand y Julien Guadet, grandes arquitectos franceses pedagogos y teóricos, sus estrategias y conocimientos serían usados durante generaciones por sus estudiantes. Su particular filosofía del uso de retículas y ejes les permitía organizar un espacio que luego era poblado por elementos establecidos del vocabulario constructivo: columnas, puertas, ventanas...³⁴⁶. Precisamente, en el congreso eCAADe 2015, la gramática de las formas ('grammar shape') es una de las temáticas clave. Entender la gramática de las formas es comprender cómo funciona la geometría que el arquitecto pretende, y entenderla permite parametrizarla, hecho que ya defendía Donald Knuth (cap. 2.3.2). El ponente invitado Athanassios Economou³⁴⁷ propone un 'framework' metodológico en el que incorporar lo computacional al esquema de diseño y lo subdivide de la siguiente forma: ALGEBRA ('design space'), DESIGN ('subjective decision'), y RULES ('making context'). Desgranar los agentes que afectan el proyecto pero que han de pronunciarse al unísono a través de una única ecuación ayudará a ordenar la prioridad del propio diseño y a identificar sus características. Estos esfuerzos resultarán en vano si el arquitecto no dispone de un buen bagaje geométrico y matemático. Bajo este paraguas de ideas platónicas que han de servir para definir infinitas variantes, se requiere el estudio profundo de cada una de las tipologías; como pudiese ser el de un objeto tan simple como la silla³⁴⁸, elemento que al mismo tiempo goza de gran cariño desde el oficio de la arquitectura.

³⁴³ Davis, Daniel. "How to draw a hyperboloid." Consultada 28 de septiembre, 2014. <http://www.danieldavis.com/how-to-draw-a-hyperboloid/>

³⁴⁴ Id., "Chapter 2 - The challenges of parametric modelling." Consultada 27 de septiembre, 2013. <http://www.danieldavis.com/thesis-ch2/>

³⁴⁵ Mitchell, William. *Vitruvius Computatus*. University of California, 1975. Consultada 27 de septiembre, 2013. <http://edra.org/sites/default/files/publications/EDRA04-Mitchell-384-386.pdf>

³⁴⁶ Mitchell, William, Antonsson, Erik K., y Jonathan Cagan. "Vitruvius redux" *Formal Engineering Design Synthesis*. Cambridge: Cambridge University Press, 2001.

³⁴⁷ Economou, Athanassios. *Fundamentals reconsidered: Facts, fictions, fabrications*, eCAADe, 2015. Conferencia.

³⁴⁸ García, Sara, y Borrás, Mario. *A Grammar-Based System for Chair Desig.* eCAADe, 2015. Conferencia.

Al igual que muchas otras tendencias, la arquitectura paramétrica induce a ciertas cualidades únicas que la hacen distintiva del resto. Teoría y tecnología definen las ideas a ensalzar, las nuevas premisas, las grandes innovaciones. Al igual que Adolf Loos, los cinco puntos de Le Corbusier y el manejo del acero y el hormigón, entre otros, definieron algunos de los estilos del movimiento moderno. Sin embargo, el estilo paramétrico aun no goza de la madurez de anteriores movimientos y, quizá, tampoco se ha iniciado con la misma contundencia y claridad. Sus axiomas parecen modificarse con el tiempo, evolucionando a medida que también lo hacen las herramientas (computacionales o de fabricación). Uno de los pioneros de esta tendencia, Greg Lynn, confiesa en una de sus conferencias³⁴⁹ como durante los primeros años los arquitectos atraídos por lo computacional, se lanzan a crear fachadas con cientos de piezas distintas ordenadas en múltiples capas. Los arquitectos se dejan deducir por la posibilidad de abandonar la construcción fordista, seriada y repetitiva.

¿Existe realmente una corriente de la arquitectura paramétrica? ¿Tiene la sociedad una imagen formulada de lo que ella significa o es una versión distorsionada de la crisis y la mala praxis?

Es cierto, en parte, que lo complejo, lo infinitamente adaptable, tiende de manera natural a lo sistemático, a la subdivisión, a la multitud de partes interrelacionadas que forman parte de un todo más grande³⁵⁰. No hay parametrismo en el individuo, en el objeto aislado, en lo homogéneo -en el sentido de continuamente igual, no el de coherente entre sus partes-. El mundo computacional puede manejar grandes cantidades con facilidad, pero sufre -o exige más de nuestra parte- cuando aparecen excepciones, situaciones particulares que requieren salirse del sistema para abordarse de otra manera. Es posible también que lo paramétrico, ese concepto tan puro, tan matemático y geométrico, simplemente sea adaptable a cualquier condición, y que en su universalidad también radique su falta de intención. Es muy probable que lo paramétrico no sea suficiente para definir un estilo arquitectónico, sino un multiplicador -un potenciador- de todos los anteriores. **

En contraposición al carácter subdivisor e interrelacional de los sistemas paramétricos, el desarrollo de las NURBS (cap. 2.2.3) y la tecnología de malla poligonal (cap. 3.4) aportarán el valor de continuidad geométrica: de lo orgánico como expresión de relaciones complejas. Su belleza no radica solamente en un resultado formal que trasciende la geometría euclidiana (ya que no son curvas divisible en arcos), sino que la manera de dibujarse es radicalmente distinta, y así el arquitecto tiene que cambiar también su forma de pensar al proyectar. Uno de los ejemplos más explícitos de esta aproximación es la Hembryological House de Greg Lynn (2002)³⁵¹: al margen de su valor como experimento generativo de arquitectura digital, los dibujos

³⁴⁹ Lynn, Greg. "Opening Lecture." Lunes 5 de Octubre, IAAC, Barcelona, 2015. Conferencia.

³⁵⁰ Lynn, Greg. Korean Presbyterian church. Nueva York, 1999. Proyecto.

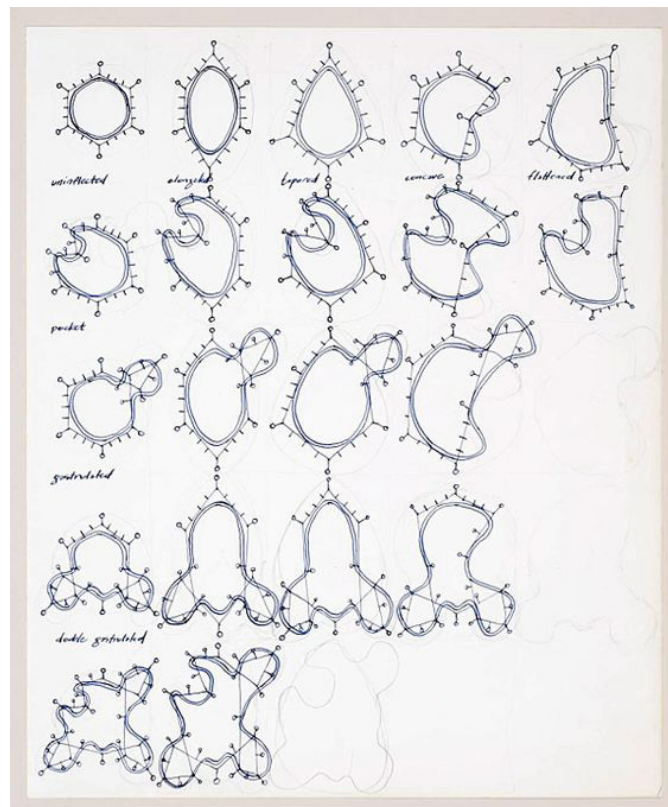
³⁵¹ Docam. "Embryological house, Greg Lynn." Consultada 30 de enero, 2015. <http://www.docam.ca/en/component/content/article/106-embryological-house-greg-lynn.html>

de su distribución son una expresión explícita del uso de puntos de control para establecer la curvatura del proyecto. Es decir, se establecen relaciones y ordenes entre puntos que generarán a posteriori un resultado continuo y coherente en su curvatura. Ello implica cambios en los procedimientos para generar la forma e, igualmente importante, para describirla. La complejidad, en lugar de representarse mediante los sistemas clásicos de acotación arquitectónica queda a merced de los sistemas que la engendran, produciendo dibujos más coherentes en su relación geometría-metodología-expresión gráfica. Ulteriormente, estas implicaciones repercutirán en el flujo de trabajo y en el dialogo entre proyección y construcción, tomando especial relevancia los programas BIM y las tecnologías CAM, ya sean a través de impresoras 3D o drones. Sobre la respresentación de lo complejo, es de obligada mención poner en valor aquí el esfuerzo del arquitecto Enric Miralles por describir a través de las metodologías habituales proyectos de considerable riqueza geométrica, y las implicaciones metodológicas y conceptuales de su artículo sobre “como acotar un croissant” junto a Eva Prats³⁵².

021. /// Docam. “Embryological house, Greg Lynn.” Imagen de la web DOCAM: <http://www.docam.ca/en/component/content/article/106-embryological-house-greg-lynn.html>. Dibujo a mano de las posibles variaciones, donde puede apreciarse que los poligonos resultantes de la unión de los puntos de control generan la forma final.

La exposición “DRAWING CODES: Experimental Protocols of Architectural Representation”³⁵³ pone de manifiesto la reaplicación de los conceptos paramétricos a la filosofía “convencional” de la arquitectura, un movimiento contrario a las “torres retorcidas y las superficies sobre-curvadas”. Sus 22 dibujos³⁵⁴ dan buena fe de una posible parametrización de la arquitectura, un re-make arquitectónico que desvanece los prejuicios sobre su uso y sus “típicos resultados”. Y al mismo tiempo ponen de manifiesto la importancia del dibujo como herramienta de proyección, la influencia de la técnica (cap. 2.2.3), o la emergencia de patrones³⁵⁵ (cap. 3.1.2).

I've actually had students say that they didn't want to learn parametric tools because they don't want to design wavy facades. Students were confusing the way that some have used parametric tools for being the only way that the tools could be used when their potential is much



³⁵² Miralles, Enric, Richard C. Levene, y Carme Pinós. “Enric Miralles y Carme Pinós. En Construcción 1988-1991.” *El Croquis*. Madrid: Editorial El Croquis, 1991. p. 252.

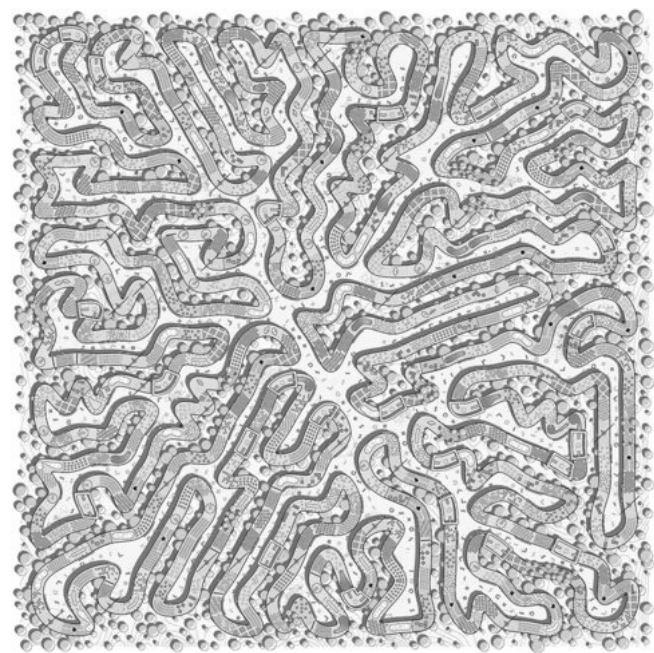
³⁵³ Kudless, Andrew, Adam Marcus, Clyton Muhleman. “DRAWING CODES: Experimental Protocols of Architectural Representation.” California College of the Arts, California, 2017. Exposición.

³⁵⁴ “Drawing codes.” Digitalcraft. Consultada 17 de febrero, 2017. <http://digitalcraft.cca.edu/research/drawing-codes>

³⁵⁵ Castle, Helen. “Editorial”. Schumacher, Patrick. *Parametricism 2.0: Rethinking Architecture's Agenda for the 21st Century*. Londres: Wiley, 2016. p. 5.

larger than any one style³⁵⁶. ANDREW KUDLESS

022. /// Andrew Kudless, *The walled City*, 2016. Imagen de la web de la exposición: <http://digitalcraft.cca.edu/research/drawing-codes>. Una única línea curva genera diferentes usos a lo largo de su recorrido gracias a un algoritmo.



Aun así, es irrefutable que la complejidad de lo paramétrico a permitido la creación de nuevas estrategias, y el marco actual presenta una vorágine de adjetivos que tratan de clasificar los resultados: 'Form Finding, Algorithmic Design, Parametric Design, Evolutionary Design, Computational Design, Procedural Design, Swarm Intelligence, Cellular Automata, Genetic Algorithms, Artificial Life, Generative Growth, Digital Morphogenesis, Emergence, Neural Networks, Autoassembling...' entre muchos otros. Algunos de ellos se solapan, otros son diametralmente opuestos. Entendemos como estrategias de diseño la teoría y proceso de desarrollo que envuelve a un proyecto. Aunque están ligadas frecuentemente a ciertas maneras o herramientas, poseen leyes intrínsecas que deberíamos de ser capaces de reproducir y sintetizar. En el libro de Spyropoulos³⁵⁷, los autores son especialmente precavidos en clasificar las diferentes estrategias,

especialmente en distinguir y clasificar sistemas 'top-down' o 'bottom-up'³⁵⁸ (de arriba hacia abajo o de abajo hacia arriba). Hecho comprensible teniendo en cuenta que las realidades -más complejas que los conceptos abstractos- suelen contener diferentes porcentajes de ambas. Sin embargo, sí que se aventuran a definir una serie de estructuras jerarquizadas en tres grupos que se asociarán posteriormente a los ejercicios presentados en el documento. Ello deja constancia de que el estilo de la arquitectura paramétrica es múltiple y no conforma sino un ecosistema de gramáticas³⁵⁹.

Estas estructuras serán retomadas en posteriores capítulos en relación al desarrollo de las formas, pues es su sistemática la que frecuentemente nombra a la tipología arquitectónico-digital:

001 Mangrove/Mangal

002 Polyp Growth/Colonial Form

³⁵⁶ Brownell, Blaine. "The intersection of Code and Architectural Drawing." *Architect Magazine*. Consultada 26 de enero, 2017. http://www.architectmagazine.com/technology/the-intersection-of-code-and-architectural-drawing_o

³⁵⁷ Spyropoulos, Theodore, Brett D. Steele, John H. Holland, Ryan Dillon, Mollie Claypool, John Frazer, Patrik Schumacher, Makoto Sei Watanabe, David Ruy, y Mark Burry. *Adaptive Ecologies: Correlated Systems of Living*. Londres: Architectural Association, 2013. p.63.

³⁵⁸ Las estructuras top-down comprenden la definición del sistema, el todo, y se aplican de lo general a lo específico. Las estrategias bottom-up comienzan con el detalle y sus propias reglas, creando sucesivamente clusters más complejos e interactuando entre ellas, sin un esquema aparente.

³⁵⁹ Stiny, George, y James Gips. "The Generative Specification of Painting." *Pictorial and Formal Aspects of Shape and Shape Grammars*. Basel: 1975. pp. 289-310.

- 003 Phyllotaxis
- 004 Seeding
- 005 Stigmergy
- 006 Hair/Optimised Detour Networks
- 007 Cellular Automata
- 008 Swarm
- 009 Cellular Automata
- 010 Surface Tension/Hele Shaw Cell
- 011 Siphonophora
- 012 Cymatics
- 013 Soft-Cast

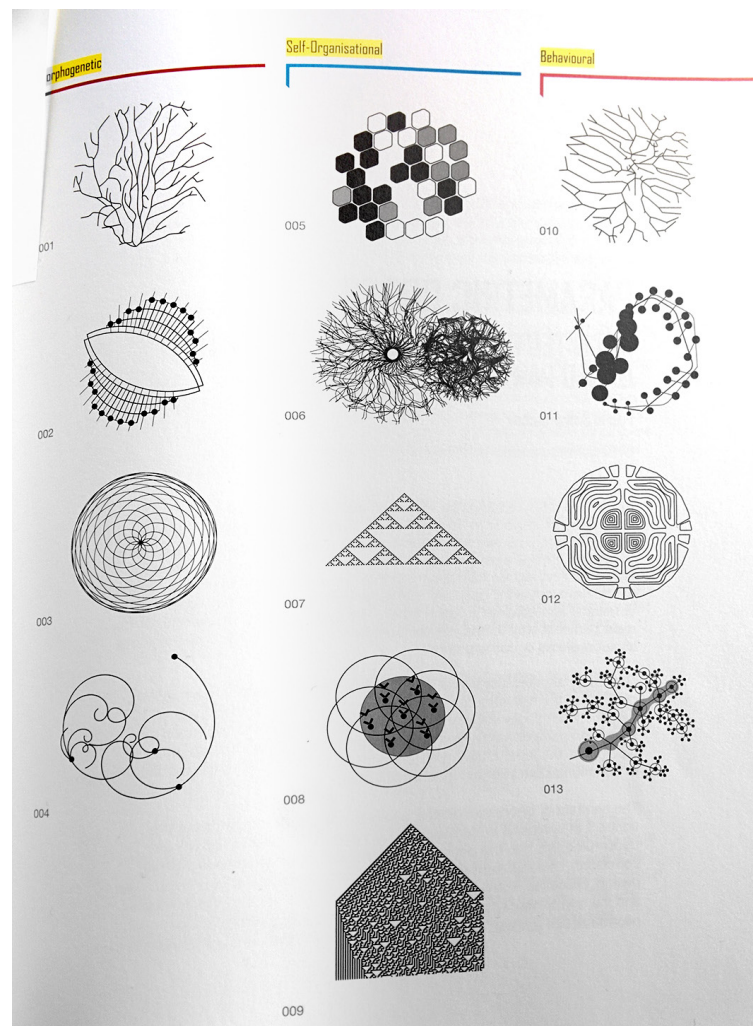
023. /// Theodore Spyropoulos, 2013. p. 63. Diferentes tipologías formales.

Igualmente, también conviene prevenir al arquitecto precavido y receptivo de emitir rápidos juicios sobre lo genético y lo dinámico, otras dos de las grandes “etiquetas” de lo paramétrico. La primera se concibe normalmente como jerarquizada, emergente, cohesiva y autoconstructiva. La segunda como algo responsivo, cambiante, contextualizador.

Toda referencia a lo genético en esta tesis (exceptuando el capítulo de ‘Synthetic biology’ dónde se si menciona la genética como disciplina científica asociada a los genes que conforman el ADN de lo vivo) pretende esbozar la idea de génesis u origen de las cosas (segunda acepción del diccionario), el aspecto más primigenio de la creación.

Se hará un análisis concienzudo de este término en el capítulo sobre “Emergencia y sistemas complejos” (cap. 3.1) escrito en esta tesis y asociado a personajes como Alan Turing o Stephen Wolfram. El estilo dinámico será estudiado de manera más superficial en sus características, aunque bien desarrollado en su relación e implicaciones para con la arquitectura, promovidas especialmente por la figura de Patrick Schumacher.

Algunos autores consideran también que las tendencias de bio-learning o biomímesis suponen una tercera rama de desarrollo (añadida a la genética y la dinámica). Se valora que esta aproximación es totalmente equivocada aunque se entienden los motivos de la misma. Según el doctorando el error se debe a diferencias visuales muy evidentes. En los estados primigenios en los que nos



encontramos, lo genético suele estar compuesto por estructura y jerarquías, lo dinámico por cientos -o miles- de agentes que atienden a fuerzas y crean nubes espaciales, y lo “bio” por superficies continuas que reflejan geometrías complejas bajo una misma topología. Una mirada más crítica advertirá que la tercera no atiende a las reglas internas, su estructura o comportamiento, sino a su último procesado y formalización. Si las primeras no tienen un aspecto más “biológico” es porque la combinación de las mismas con un ulterior acabado biológico requiere de gran capacidad computacional. Tampoco el hecho de que su esquema lógico provenga de la naturaleza debería servir para separarlas en un tercer grupo formal: un análisis exhaustivo de la fuente biológica acabará desvelando si en su síntesis es genético o dinámico³⁶⁰. Se rechaza pues en esta tesis la existencia de un sistema morfobiológico, y se trabaja sobre las variantes morfogenéticas y morfodinámicas -que como hemos dicho, pueden combinarse en diferentes proporciones- y en procesos posteriores adoptar propiedades biológicas.

El Parametricismo de Patrick Schumacher

Ciertamente definir y apropiarse el estilo paramétrico de la arquitectura es un debate vigente. En esta discusión inconclusa Patrick Schumacher es uno de los máximos defensores y teóricos de la arquitectura paramétrica, y por ello es de vital importancia comprender el porqué de esa defensa y su uso para con la arquitectura. El trabajo de Patrick es sumamente relevante dentro del despacho de Zaha Hadid Architects dónde se postula como la mano derecha de Hadid y uno de sus miembros con más visibilidad internacional. Zaha Hadid falleció durante el desarrollo de esta tesis el 31 de Marzo de 2016 en Miami a la edad de 65 años.

Uno de los argumentos más obvios que esgrime Schumacher para defender la superioridad de esta técnica es el hecho de que es el único proceso que realmente aprovecha la revolución computacional que dirige la civilización contemporánea, más específicamente sistemas estructurales en ingeniería, ingeniería medio-ambiental, técnicas de optimización y análisis computacional avanzado. El otro, es su superioridad y versatilidad para organizar y articular situaciones complejas en relación a un entorno social -a extender posteriormente-. Patrick Schumacher pone de manifiesto en su blog personal³⁶¹ la imposibilidad de unificar bajo un único movimiento la arquitectura contemporánea, acompañado de una epistemología escéptica sobre los intentos de conseguir una gran teoría que sintetice toda la complejidad que abarca la sociedad actual: igualmente, la arquitectura se ha abocado a una multitud de estilos y aproximaciones. Sin embargo, el mundo está más integrado y comunicado de lo que jamás lo ha estado, permaneciendo así la

³⁶⁰ Muiño, Alejandro. *Genetical Weapons*. Barcelona: Máster de Arquitectura Biodigital, Barcelona, 2007. Tesina de máster.

³⁶¹ Primera entrada del blog data del 9 de agosto de 2015. <http://parametricism2.org/>

posibilidad o necesidad de una teoría unificada. Schumacher se basa en la “teoría de sistemas sociales” de Niklas Luhmann (y que a su vez están basadas en la teoría de la complejidad y la autopoiesis³⁶²) para postular su nueva teoría unificada de la arquitectura. Se contraponen la creencia de la imposibilidad de generar un movimiento común y global como fue la corriente moderna, y una convergencia en lo que a la investigación de diseño se refiere, iniciada hace ya 15 años. Patrick propuso hace 5 años el nombre de “Parametricism”³⁶³, un movimiento cuya inercia se ha visto perjudicada por la crisis global de 2008 pero que la dramática expansión del despacho de Zaha Hadid parece apoyar³⁶⁴. En él, recalca que la diferenciación y la adaptación local son la esencia del parametricismo.

...my theory of architecture theorizes the discipline of architecture as an evolving system of communications (discourse) that takes universal and exclusive responsibility for the innovation of the built environment, in functional differentiation to engineering, science, art, politics, law, economy etc. The specific responsibility of architecture/design concerns the social/communicative functionality (in distinction to the technical/engineering functionality) of the built environment. Spaces are theorized as framing communications that function as invitations and premises for all the interactions that (are meant to) take place within them. Each territory/frame is embedded within a system of frames that can be understood as a system of signification.

Society can only evolve with the simultaneous ordering of space. The life process of society is a communication process that is structured by an ever more complex and richly diversified matrix of institutions and communicative situations. The built environment orders and stabilizes this matrix of institutions and makes it legible. The innovation of the built environment participates in the expansion, differentiation and integration of this network of communicative situations. The built environment with its complex matrix of territorial distinctions is a giant, navigable, information-rich interface of communication³⁶⁵. PATRICK SCHUMACHER

El arquitecto no debe permitirse aislarse de la innovación que acelera a su alrededor, es prudente recalibrarse continuamente en relación a su entorno, y mantenerse conectado, comunicado con la ciudad densa y multicapa que

³⁶² Maturana, Humberto R., y Francisco J. Varela. De Máquinas Y Seres Vivos; Una Teoría Sobre La Organización Biológica. Santiago De Chile: Editorial Universitaria, 1973. p. 73.

³⁶³ Patrik Schumacher. *The Autopoiesis of Architecture, Vol. 1: A New Framework for Architecture*. Londres: John Wiley & Sons Ltd., 2010

³⁶⁴ Zaha Hadid empezó como arquitecta independiente en 1980. Después de 20 años, en 2000, Zaha Hadid Architects había completado únicamente tres pequeños edificios y empleaba a 20 personas. Actualmente (2010) ZHA emplea a 420 personas, trabajando en cerca de 80 proyectos internacionales, de cualquier tipo de categorías, incluyendo proyectos de gran escala con más de 300.000m².

³⁶⁵ Schumacher, Patrik. “A unified agenda for architecture: the built environment as frame and interface of communication.” *Parametricism*. Agosto, 2015. <http://parametricism2.org/2015/08/09/hello-world/>

permanece siempre activa. El proyecto arquitectónico de Schumacher ha de ser un proyecto cuya visibilidad comunicativa depende de su coherencia interna, de las correlaciones de forma-función; de forma que su morfología distintiva repercuta en diferentes términos sociales (interacción y/o función). Esta arquitectura se basa en dos puntos:

1. La unidad fundamental de la arquitectura es el territorio: como cualquier tipo de comunicación puede ser aceptada o rechazada.
2. El significado de la comunicación arquitectónica (espacio, territorio, contexto) no es más que su función social.

Dicho proyecto se basa en el estudio de la semiología³⁶⁶ paramétrica, patrones que pueden ser programados mediante agentes que responden a las claves del entorno. El espacio requiere de ciertos agentes que por su función expresarán determinado comportamiento, adecuado supuestamente a las necesidades del lugar. Estos agentes a los que hace referencia son principalmente agentes dinámicos que responden a su entorno y crean flujos a través de lo morfodinámico.

...the programme is conceived in terms of dynamic, parametrically variable event scenarios that unfold and evolve across time and space, ordered and coordinated through complex, spatio-morphologically differentiated fields that allow for gradients and interpenetrations. This way of handling and modelling programme via crowds of (environmentally informed) agents also allows for the consideration of multiple audiences with different purposes and roles³⁶⁷. PATRICK SCHUMACHER

Los agentes en el mundo informático son asociados a un grupo de individuos con unas reglas de comportamiento que interaccionan entre ellos en tiempo real. Esto puede servir para simular multitud de comportamientos, entre ellos los de la gente y su flujo en masa. El interés de Schumacher está en añadir más comportamientos a esa masa (más allá del movimiento) y relacionarlo con los agentes que componen el edificio. Resumiendo, Schumacher propone el uso de comportamientos dinámicos para definir la arquitectura gracias a sus propiedades paramétricas (en relación a un contexto de gran riqueza gracias a las diferentes capas de información y comunicación) y los patrones que emergen, estudiados y analizados en la semiología paramétrica.

Continuando con la condición de mundo arquitectónico hipercomunicado, nuestro lenguaje hace uso de la palabra “estilo” (ya sea en arquitectura, diseño, literatura, música...) para designar cualquier elemento perteneciente a un grupo de características en común. El término se aplica para individuos, regiones, o incluso “estilos de época”. Schumacher considera un estilo de época aquel movimiento dominante de una civilización particular en un momento histórico concreto. Es en este último sentido en el que la

³⁶⁶ Disciplina que estudia el signo y aborda la interpretación y producción del sentido en la vida social.

³⁶⁷ Schumacher, Patrik. “A unified agenda for architecture: the built environment as frame and interface of communication.” *Parametricism*. Agosto, 2015. <http://parametricism2.org/2015/08/09/hello-world/>

arquitectura autopoietica cobra significado como estilo, mientras que los regionales y nacionales pierden todo significado debido a esa globalización comunicativa³⁶⁸. Aunque originalmente la palabra “estilo” posee carácter histórico y retrospectivo, no expresará su verdadero potencial hasta la expo mundial de Londres³⁶⁹, donde se toma conciencia de la diversidad mundial y como las condiciones culturales, artísticas, climáticas, y materiales definen dichos estilos. Gottfried Semper define estilo como:

*The conformity of an artistic phenomenon with its genealogy, with all the conditions and circumstances of its becoming*³⁷⁰. GOTTFRIED SEMPER

¿Y qué requerimientos tiene el concepto estilo en la actualidad (segunda mitad del siglo XIX en su caso)? Según Semper “necesidad natural y la expresión entendida y formalmente percibida de una idea”:

*Without a millennium of popular custom to cultivate a suitable style. It requires far greater artistic sensitivity . . . to hit upon (without the benefit of time) the right art-form for all the new things pressing themselves upon our attention. Such a form would be one in which free human work appears as a necessity of nature and becomes the generally understood and perceived formal expression of an idea*³⁷¹. GOTTFRIED SEMPER

Queda patente la preocupación por la condición de estilo, necesaria para reformular el parametrismo como tal, si fuese el caso. ‘L’architecture moderne’, ‘Neues Bauen’, el ‘International Style’, la Arquitectura Moderna (‘Modernism’), ha sido el estilo por antonomasia en el s. XX (o al menos su primera mitad), el siglo del Fordismo mecánico, la producción en masa y el consumo estandarizado a escala mundial. Sin embargo la sociedad se ha transformado en un sistema más rico y complejo, suponiendo el declive y la crisis de este movimiento desde los años 70. Eventualmente, el Parametrismo emerge como una trayectoria viable tras el Postmodernismo y el Deconstructivismo (entre muchos otros). De la misma forma, el Parametricismo es el único candidato plausible para el “epochal style” global del siglo XXI. El parametricismo responde a los desafíos y oportunidades de la era de la información, al igual que la arquitectura moderna (estándar) lo hacía respecto a la mecánica del Fordismo. Las oportunidades de este mundo digital son las metodologías de procesado de información computacional, diseño, ingeniería y fabricación... basada en las técnicas de diseño paramétrico, Schumacher define:

Parametricism implies that all architectural elements and compositions are subject to modulation via variables. This implies a fundamental (ontological) shift within the basic, constituent elements

³⁶⁸ Schumacher, Patrik. “In Which Style Should We Build?” parametricism2.org

³⁶⁹ *Great Exhibition of the Works of Industry of all Nations*, Londres, 1851

³⁷⁰ Consúltese: Semper, Gottfried, y Hans Maria Wingler. *Wissenschaft, Industrie Und Kunst, Und Andere Schriften Über Architektur, Kunsthandwerk Und Kunstunterricht*. (Mainz: Kupferberg, 1966).

³⁷¹ Ídem.

of architecture. Instead of the classical and modern reliance on ideal, inherently rigid geometrical figures like straight lines, rectangles, cubes, cylinders, pyramids (roofs), and spheres (domes), the new primitives of Parametricism are topo-logical rather than geo-metric, and thus inherently pliable: splines, nurbs, subdivs, particle-spring systems, agent based systems etc. These new 'elements' become the fundamentally new building blocks for dynamical compositions that can be made to resonate with contexts and with each other via scripts. (On the more sophisticated end of the spectrum we find multi-objective optimization with evolutionary algorithms)³⁷². In principle every property of every element or complex is subject to parametric variation and topological deformation. The key technique for handling this variability is the scripting of rules that differentiate arrays or systems of elements – often in relation to performance parameters or contextual parameters – and that establish correlations between the various differentiated arrays or subsystems³⁷³. PATRICK SCHUMACHER

Si la arquitectura es desafiada a responder a las nuevas complejidades sociales y culturales, si la demanda es una serie de sistemas dinámicos, flexibles y participativos... ¿Cuáles son los sistemas o formaciones urbanas a conectar? ¿Cuál es la manera más pertinente de analizar la ciudad, de descomponerla en subsistemas?³⁷⁴ El trabajo de descomposición/análisis es composición/síntesis. Y esa síntesis es la correlación de las cosas codificada digitalmente. Las correlaciones paramétricas son quizás, una de las nuevas bases de la arquitectura. Aludiendo a un tercer tipo de relación, obviando las dos básicas que se abordan en la actualidad y que son las relaciones espaciales y las funcionales: las de forma-función, patrones del entorno construido y los patrones de la comunicación social que se despliegan del primero.

Los procesos dinámicos computacionales permiten embeber a la arquitectura por primera vez de una capa urbana de funcionalidad. 'Agent-based models' (modelos basados en agentes o individuos) pueden predecir o reproducir patrones colectivos de movimiento. Schumacher menciona plug-ins para Maya como MiArmy o AI.implant. En el ecosistema de GH merecen mención BOID library y Quelea. Este tipo de software de simulación de multitudes -que no de partículas- tiene su origen en videojuegos, y poco a poco se va refinando para incorporar factores más humanos más allá de la simple "navegación" del espacio. Llegado el momento, estos agentes podrían reaccionar a la arquitectura cambiante, su color, su textura, su función...

En el discurso sobre la organización y jerarquización de estos fenómenos dinámicos, estructurada y detallada, se identifican tres partes: la organizadora, la fenomenológica y la semiológica.

³⁷² Tema que se trata durante la parte del desarrollo en esta Tesis.

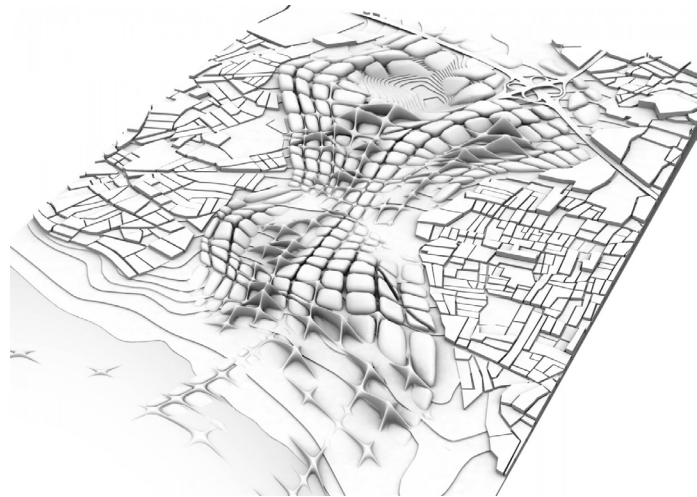
³⁷³ Schumacher, Patrik. "In Which Style Should We Build?" parametricism2.org

³⁷⁴ Id., "Parametric Order", *Adaptive Ecologies: Correlated Systems of Living*. Londres: Architectural Association, 2013. pp.151-153.

task dimension (project)	framing contribution
organizational	as physical frame
phenomenological	as perceptual frame
semiological	as communicative frame
engagement of users	solicited response
as physical bodies	passive movement
as cognitive beings	active behavior
as socialized actors	communicative action

024. /// Zaha Hadid Architects, *Kartal-Pendik Masterplan*, 2006. Render de la web de Zaha Hadid. Proyecto urbanístico paramétrico.

Arquitectónicamente sin embargo, resulta atractivo el proceso evolutivo del entendimiento de la ciudad³⁷⁵: de la división estratificada de la ciudad medieval (castillo y nobleza, iglesia y clero, burgueses dentro de la muralla, y granjeros en la periferia), a la estructuración, aun inmediata y directa, de ocupación vs movimiento, raíz de las primeras ciudades modernas y funcionales. Estas últimas Niklas Luhmann las divide en producción, administración, consumo, recreo y habitaje³⁷⁶. La Ville Radieuse de Le Corbusier (1933), es la perfecta representación de esa nueva división de zonas especializadas y repetición. Con la aparición del Deconstructivismo desaparecerá la síntesis de subsistemas separados, y la superposición de zonas y capas se convertirá en el nuevo paradigma en proyectos como el Parc de la Villette de Bernard Tschumi (1983). Con el proyecto de Ubiquitous Urbanism (1993), el estudio de Hadid/Schumacher unifica todas esas capas superpuestas en un solo sistema a través de la simulación de fluidos confrontados³⁷⁷. En los sucesivos años, una aproximación distinta basada en el software Maya (pero con los mismos principios) irá refinándose en proyectos como la propuesta de Estambul (2006)³⁷⁸.



Ya sea en la visión del urbanismo paramétrico o en la conceptualización de genes o criterios de adaptación³⁷⁹, significado y signifiante y su relación tienen un impacto brutal en el resultado. Un gradiente de “abierto a cerrado”

³⁷⁵ Patrik Schumacher, “Parametric Order”, *Adaptive Ecologies: Correlated Systems of Living*. Londres: Architectural Association, 2013. pp.157

³⁷⁶ Luhmann, Niklas. *Social Systems*. Stanford, CA: Stanford University Press, 1995.

³⁷⁷ Hadid/Schumacher. *Ubiquitous Urbanism: generic masterplan, buildup of multi-system complexity*, Columbia University. 1993.

³⁷⁸ Zaha Hadid Architects, *Kartal-Pendik Masterplan*, 2006. Istanbul.

³⁷⁹ Experimento realizado bajo la tutela de Mike Weinstock incluido en la última fase de la tesis.

en el significante puede llevar a un significado de “público a privado”. Mientras que en el lenguaje de la palabra hablada los sonidos esquematizan los conceptos y acciones, en el lenguaje de lo arquitectónico el binomio de función (significado) ha de coordinarse con él de forma (significante)³⁸⁰. Ambos lenguajes -oral o arquitectónico- requieren de la gramática que articule los elementos más simples, las letras o los valores de densidad, las palabras o los viales, las frases o los barrios... Esa gramática es la encargada de estructurar los patrones de datos, las capas homogéneas de matrices de información que la ‘big data’³⁸¹ aporta al arquitecto contemporáneo.

A pesar de que el nuevo estilo es ampliamente dependiente de las nuevas técnicas de diseño, no puede ser reducido a la introducción de nuevas herramientas. Un nuevo estilo es un nuevo paradigma, y como tal implica metodología y un marco conceptual: ambiciones y valores, estéticos y funcionales: topologías que responden a su contexto y que responden de manera simultánea a diferentes aspectos y la interrelación de los mismos. La disciplina debería direccionarse de manera coherente y unísona, en lugar de permitir miles de estilos que contradicen la ciudad. Lejos de asustarse por esa unisonía, el parametrismo ofrece innovación e impactante creatividad. Implica la mejora en el comportamiento del orden y la libertad en comparación con estilos anteriores.

The universe of possibilities and new creative opportunities it opens up are exhilarating. The apt analogy here is with the “endless forms of nature”. Here too richness evolves on the basis of rigorous laws of nature. The multi-author accumulation of an intricately layered and correlated urban order can be viewed in analogy to the evolution of a complex ecosystem. This has very little in common with marching in unison – this was modernism’s version of hegemony – but much more with an ecology of different co-evolving species and life-forms. Each architect’s new urban intervention can be compared with the evolution of a new species that finds its own way and scripts according to which it registers, adapts and resonates with the given urban ecology. Think of a certain species of moss growing over a rock formation and accentuating the rock’s shallower slopes. [...] Let an ecology of a thousand flowers bloom, but prevent the current pluralist garbage spill pollution that is choking us everywhere³⁸². PATRICK SCHUMACHER

Se considera a bien recalcar un cierto escepticismo entorno a las ideas de Schumacher, incluso de aquellos que defienden la arquitectura paramétrica y sus derivados. Sus teorías son frecuentemente origen de polémica o hasta denuncia por la agresividad de sus sentencias como se verá en referencia

³⁸⁰ Saussure, Ferdinand De. *Course in General Linguistics*. Nueva York: Philosophical Library, 1959.

³⁸¹ Big Data es en el sector de tecnologías de la información y la comunicación una referencia a los sistemas que manipulan grandes conjuntos de datos. Las dificultades más habituales en estos casos se centran en la captura, el almacenado, búsqueda, compartición, análisis, y visualización

³⁸² Schumacher, Patrick. “Gearing up to make an impact.” *Parametricism*. Consultada 6 de marzo, 2015. www.parametricism2.org

al pluralismo (se le acusa de “secuestrar” y “apropiarse” el término paramétrico)³⁸³. En esta tesis se valoran muchos de los aspectos que defiende la teoría de Schumacher, pero también se considera que peca de reduccionista a la vista de los muchos otros factores que aparecen como intersección de lo computacional y lo biológico. Se ha hecho breve mención de ellos al comienzo del capítulo “Parametrismo y su repercusión estilística en la arquitectura” y se profundizará más adelante en otros aspectos que Schumacher no contempla, alrededor de otros personajes como De Landa, John Frazer, Neri Oxman o Karl S. Chu.

Se espera en esta tesis, que lo paramétrico se convierta en la gramática uniforme y globalizadora de la arquitectura, la descripción de lo formal y lo geométrico, de las infinitas posibilidades (sencillas y complejas) que la arquitectura es capaz de expresar. Lo paramétrico es la facultad de la adaptación a los diferentes contextos, es la expresión algebraica de potenciales versiones del proyecto, y como tal, es -probablemente- susceptible de ser aplicada a cualquier estilo de arquitectura.**

Pluralismo frente a Pseudo-digital

En este apartado se reúnen los pensamientos más críticos para con la arquitectura, tanto para la corriente digital como a los detractores de la misma. El entendimiento contrario de los estilos puede arrojar luz sobre los puntos débiles de los mismos y propiciar el desarrollo apropiado de los mismos de manera crítica y periférica. El mismo Schumacher desata la polémica en numerosas ocasiones mediante un discurso anti-pluralista, el cual encabeza este capítulo:

Many critics of parametric design and Parametricism ask: What is the societal relevance of the complex geometries and intricate spatial compositions made possible by parametric design? Is this not an expensive, indulgent and self-serving narcissism on the part of designers that distracts from the social task of architecture?³⁸⁴.
PATRICK SCHUMACHER

Para Schumacher, que comprende la arquitectura y el urbanismo como ordenación espacial de los procesos sociales, entiende que la densidad incremental, diversidad e interconexión de los procesos de la vida contemporánea requieren de configuraciones espacial complejas que permitan que la diversidad de eventos se den en proximidad y conscientes de sí mismo. Las características del parametricismo: curvilinealidad, gradientes y resonancias correlativas son más efectivas para articular esos espacios con múltiples relaciones.

³⁸³ Hatherley, Owen. “Zaha Hadid Architects and the Neoliberal Avant-Garde.” *Metamute*. Consultada 28 de octubre, 2010. <http://www.metamute.org/editorial/articles/zaha-hadid-architects-and-neoliberal-avant-garde>.

³⁸⁴ Schumacher, Patrick, “Parametricism and Progress.” parametricism2.org

Without curves, smooth transitions and gradients the complex urban scene quickly degenerates into visual chaos. My dream is a built environment that is so rigorously differentiated and correlated like a natural environment. PATRICK SCHUMACHER

La defensa del Parametricismo no termina ahí. Patrick arremete con vigor en contra del Pluralismo: presenta esta corriente como un reconfortante y falso dogma que promulga que todos los estilos son igualmente válidos. Una falacia igual que el multiculturalismo, que prefiere cubrir con brillantes eufemismos la realidad en lugar de enfrentarse a ella. Un pluralismo permanente lleva a la arquitectura hacia una situación estancada de desarticulación urbana. La dificultad de analizar un mundo cada más complejo también dificulta los argumentos consistentes que tratan los méritos y los desméritos de los estilos irreconciliables catalogados como “válidos”. El Pluralismo solo tiene sentido temporalmente durante periodos de búsqueda y transición, como competición para encontrar un nuevo estilo que persevere. Los pluralistas son demasiado tolerantes en el sentido de dar carta blanca intelectual a una multitud de estilos retro, disfuncionales e intelectualmente arruinados. Esta tolerancia hacia lo retrógrado no ayuda a nadie. Especialmente a aquellas tribus arquitectónicas que se encierran a sí mismos, negando los avances de nuestra civilización computacional aumentada³⁸⁵.

Por otro lado, los resultados de la influencia del mundo computacional en la arquitectura no han quedado tampoco exentos de crítica, tanto desde sus promotores como de sus detractores. Se considera a bien reunir en este apartado una serie de consideraciones que influyen la crítica, las connotaciones, y sus repercusiones. Igual que en cualquier otro movimiento o estilo arquitectónico, la arquitectura computacional/paramétrica da lugar a grandes proyectos idealizados, pero también pseudo-digitales que deben ser advertidos y descartados.

El software convierte la arquitectura en un trazo impersonal carente de sensibilidad. El arquitecto ha de saber asimilar la herramienta digital y transmitir su sensibilidad sino quiere aislarse en un mundo anticuado cual afilador por las calles. AUTOR DESCONOCIDO

Los arquitectos, lamentablemente, beben de los informáticos que desarrollan el software y sus “comandos”. Van a rebufo de lo que la técnica es capaz en muchas ocasiones y pocos son los que verdaderamente se lanzan a innovar desde cero. Con frecuencia pues, se juega a variar y adecuar una metodología que ya se ha presentado empaquetada, cuyos resultados son inevitablemente similares, siendo este uno de los mayores contras del ‘visual algorithmic programming’.

La comunidad paramétrica aún está entrenando sus músculos antes de abordar el trabajo con un claro propósito social. Muchos de esos jóvenes estudios de arquitectura afrontan la divertida exploración de la forma arquitectónica y sus resultados no pueden soportar un escrutinio crítico que

³⁸⁵ Schumacher, Patrick. “Parametricism against pluralism.” parametricism2.org

demande relevancia social. La globalización y la facilidad de acceso a estos contenidos que tanto se valora en esta tesis y que se considera un punto de gran valor, presenta un punto negativo: rápidamente multitud de gente es capaz de desarrollar un “proyecto digital” simplemente copiando lo que otro ha imaginado anteriormente y adaptándolo a sus necesidades. Sí, la magia del parametriso es adaptabilidad. Pero la mayoría de los cosas se quedan en la capa superficial, en copia barata, en plagio. Todos comienzan aprendiendo con los mismos ejemplos, brillantes ejemplos que suelen comprender teselación, atractores, piezas que cambian con su orientación... magníficos conceptos frutos de la computación con una aplicación muy directa a la arquitectura. Por ello, cada vez son más los que se asoman a este ámbito para recoger la “definición resultona del momento” y aplicarla en su proyecto. Casi todo lo que hacen los alumnos, rezuma ese aire a ‘mesh’ y modelado orgánico por subdivisión. Todos aplican lo mismo como bandera de lo paramétrico.

Uno de los problemas es que se aplica sin criterio, por su efectismo; empeorado ante la evidencia de que no hay tantas cosas/técnicas “pintorescas” que sean fáciles de aplicar -y por ello se tiende a una imagen de semejanza-; y el mayor problema quizás sea, que se juzga desde fuera a todos por igual, cuando debería ser imposible hacerlo sin los conocimientos adecuados. La difusión del “movimiento digital” es su peor enemigo, por su baja media en calidad y alto repetivismo. ¿Es posible que la arquitectura paramétrica esté en crisis antes incluso de haber llegado a ocurrir? Urge autocrítica en las bases y la tarea clave es crucial: ordenar la complejidad de los procesos sociales a través de órdenes legibles y ricos en información. La credibilidad del parametriso depende de ello. Sin embargo, también ha de protegerse la necesidad de una exploración curiosa y desenfadada de las nuevas herramientas, técnicas y repertorios. La innovación requiere de una oscilación entre la exploración sin fin, testear, e intentos rigurosos de aplicación práctica³⁸⁶.

Con la cultura de masas y la fácil replica también se pierde el valor. Tan pronto como las herramientas digitales se vuelven populares y ordinarias, las formas complejas que lograron perderán su estatus de vanguardia investigadora a no ser que sus cualidades espaciales y estéticas se soporten sobre estrategias funcionales y significativas. Del artículo de Michael Parsons merece destacarse lo siguiente:

*The use of the Voronoi Diagram now requires a strong rational justification because its aesthetic appeal has become devalued by overuse*³⁸⁷. MICHAEL PARSONS

No son palabras visionarias, pero están cargadas con el peso de la experiencia y concuerdan con la visión de muchos otros (incluido el doctorando, que con frecuencia trata de prevenir a los alumnos del máster con respecto el uso de estructuras Voronoi).

³⁸⁶ Schumacher, Patrick, “Parametricism and Progress.” Consultada 6 de marzo, 2015. parametricism2.org

³⁸⁷ Parsons, Michael, “Tolerance and customization: A question of value”, *Australian Design Review*. Consultada 29 de abril 2014. <https://www.australiandesignreview.com/architecture/41321-tolerance-and-customisation-a-question-of-value>

Is a blue cube really different to a red cube, if you do not privilege aesthetics? This is where the true issue of digital design and fabrication lies. What distinguishes one work of digital fabrication from the rest? What gives the work significance now that complexity is no longer intrinsically valuable? Students should not hide behind captivating forms and instead require stronger and stronger justification for their work³⁸⁸. MICHAEL PARSONS.

Solamente una implementación inteligente puede justificar su uso, todo lo demás es solo una mera prueba de que el usuario en cuestión sabe cómo aplicar lo que otros han programado, hecho que no requiere habilidad en ello, “ni progreso tampoco”, añade Fulvio Wirz:

The goal, instead, must be to achieve a perfect equilibrium between complexity and coherency³⁸⁹. FULVIO WIRZ.

025. /// 'GH Voronoi Overdose Warning'. Captura de pantalla de la ventana emergente que produce GH cuando se usan “muchos” componentes relacionados con el diagrama Voronoi.



De la misma manera los corrobora Neal Leach, en un texto que bien podría referenciar la discusión sobre la ciencia computacional y el aprendizaje de programación en el capítulo “El lenguaje de la lógica digital” de esta misma tesis (cap. 2.3).

Surely what the world of computation promises is not merely a new style, but a radically new way of approaching design, where we embed new computational techniques into evolutionary and emergent systems, and where we breed systems and test them out in real time so that the diagram becomes the reality and reality is the diagram. Form should be seen as largely irrelevant within this new horizon. Instead we should be exploring the potential of algorithmic techniques, and focus on more intelligent and logical design processes. Logic should be the new form. NEAL LEACH

La preocupación por el uso equivocado se evidencia en este curioso extracto en los foros de GH por David Rutten:

I must admit I do feel guilty about writing tools like Metaballs and Voronoi. I've seen how often they have been misused by people in the name of innovation. However, I've also seen some very good uses of them and I hope these precious few will redeem me in the end. DAVID RUTTEN

El mismo Mark Burry arremete con cierta contundencia contra

³⁸⁸ Parsons, Michael. “Tolerance and customisation: A question of value.” *Australian Design Review*. Consultada 2 de abril, 2014. <https://www.australiandesignreview.com/architecture/tolerance-and-customisation-a-question-of-value/>

³⁸⁹ Tedeschi, Arturo, Fulvio Wirz, y Stefano Andreani. *AAD, Algorithms-aided Design: Parametric Strategies Using Grasshopper*. Brienza, Italy: Le Penseur Publisher, 2014.

el fracaso que ha supuesto formalizar la ciudad paramétrica. En su discurso Burry pone el ensanche de Barcelona como uno gran ejemplo de urbanismo visionario, un proyecto que se anticipó a su tiempo, y critica lo siguiente de la actualidad del panorama constructivo de las ciudades:

Essentially my proposition is that the more real the results of envisioned new urban environments appear to be, in light of formal experiment and advances in visualization, the more distant the prospect is of fulfilling these dreams using the available technology, and this risks marginalizing designers from other urban decision-making groups. Imagined future technologies never seem to be as deep reaching as the imagined future urban environments in which these yet-to-be-invented technologies will be called upon to manufacture and build. In essence this principal issue of unrequited desire was manifest even before the recent global financial crisis led to a rapid evaporation of confidence in western-style capitalism³⁹⁰. MARK BURRY

Nuestra capacidad técnica computacional está sustancialmente por delante de la de prever soluciones reales, físicas y creíbles. El potencial de proyectar ciudades en 3D o 4D esta probablemente muy lejos aún nuestras capacidades, limitadas por nuestro entendimiento y proceder. Los resultados actuales pasan por ser objeto de asombro en el mejor de los casos, a utopías o irrelevantes en el peor de ellos.

Like the jilted partner on the night of the prom we could be all dressed up but not too sure what our next ove might be. (Al igual que la pareja que ha quedado plantada en la noche del baile de graduación, podríamos estar todos vestidos pero no demasiado seguros de cuál podría ser nuestro próximo movimiento)³⁹¹. MARK BURRY

Hay una paradoja respecto a lo que a la información se refiere: cada vez poseemos más información y somos capaces de más complejidad, pero ello lleva a mayor dificultad y frecuentemente, la imposibilidad para ejecutarla nosotros mismos.

Ocho puntos a considerar de la ciudad de Mark Burry:

1. El uso y apropiación de términos que, por un lado, ya existían y se tenían en cuenta; y por el otro que se aplican de manera poco rigurosa, con la única intención de vender y disfrazar. Términos como 'design thinking', 'smart city' o 'bio'.³⁹²
2. La escala. La distancia entre sistemas abstractos computacionales y la realidad. Los experimentos de vanguardia no aspiran la mayoría de las veces más allá de lo conceptual. ¿Cómo se llega más allá de un discurso

³⁹⁰ Burry, Mark. "Ideas and computation in contemporary urban design: addressing the disconnects", Adaptive Ecologies: Correlated Systems of Living. Londres: Architectural Association, 2013, pp.31.

³⁹¹ Ídem.

³⁹² Se realizan críticas a este término en numerosas ocasiones a lo largo de la tesis.

interno entonces?

3. Complejidad. Parece ser que el exceso de complejidad deriva en el caos, más que en un orden más adecuado. El efecto es contraproducente de cara a formalizar las acciones. ¿Es simplificar un proceso suficientemente complejo?

4. Originalidad. Que no mimetizar, versionar o variar. Y aun así hay una tendencia propiciada por nuestras herramientas a ser originales por ser originales, sin un propositivo o motivo claro. Diseñadores y artistas son cosas diferentes, y sus aproximaciones desde la nada y su transgresión implican diferentes aproximaciones también.

5. Transdisciplinariedad. El tiempo del arquitecto o diseñador como director de orquesta puede haber acabado. En su lugar, un 'master planner' debería igualar en importancia todos los aspectos que influyen la ciudad -el diseño del arquitecto incluido-: censo, transporte, ingeniería, trabajo social, sanidad, ocio, agricultura, comercio...

6. Un marco creíble. La ausencia de un contexto, unos motivos, una razón, para aplicar las novedades computacionales. Muchos doctorandos poseen amplios conocimientos y capacidades, así como ideas claras de a dónde quieren llegar, pero a menudo faltan problemas y situaciones tangibles sobre los que aplicar esas capacidades.

7. Oportunidad. Para aquellos que estén dispuestos a abordar los puntos anteriores, probablemente se encuentren en situaciones de "esto no es arquitectura" cuando lleguen al mundo laboral. Si las interacciones con otros gremios son cada vez mayores, mayor puede que sea la opresión. Oportunidad y oportunismo para que los jóvenes diseñadores que quieran cambiar las formas de hacer.

8. Política. La falta de atención sobre las relaciones políticas. Nuevas y creativas ideas se pierden en el horizonte debido a la incapacidad de los jóvenes arquitectos. Cambiar la manera de enseñar las habilidades necesarias para "política" daría un comienzo influyente y operativo a muchos de ellos.

Incluso el mismísimo David Rutten (desarrollador de GH) muestra su especial preocupación por la incursión de las nuevas tecnologías en la arquitectura o, mejor dicho, como los arquitectos las incorporan³⁹³.

En el otro lado de la barrera, a la arquitectura digital suele cosechar pocas simpatías, normalmente atribuida a la arquitectura del estrellato y el exceso, de la crisis económica. Una arquitectura aparentemente desligada de su entorno, ajena, aun cuando su mayor anhelo parece ser contemporánea de su sociedad. A priori, parece una equivocación arremeter contra ideales y

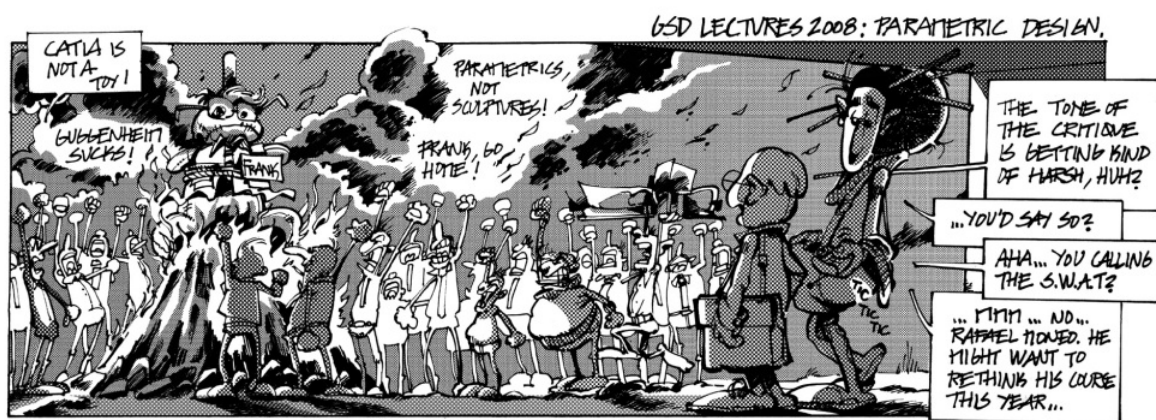
³⁹³ Rutten, David. "Worrisome trends in architecture education". *I Eat Bugs for breakfast.* Agosto, 2013. <https://ieatbugsforbreakfast.wordpress.com/2013/08/09/worrisome-trends-in-architecture-education/>

conceptos, contra la propia idea de una arquitectura determinada. ¿No habría que juzgar a los arquitectos responsables de determinadas obras en su lugar? Si bien pueden entenderse algunas de estas críticas si se miran con buenos ojos -frecuentemente desvelan cierta verdad y experiencia-, en lo general hay una total incompreensión que degenera en una crítica destructiva, en un partidismo visceral y parcial.

*What I cannot create, I do not understand*³⁹⁴. RICHARD FEYNMAN

En el vocabulario arquitectónico las metáforas, las analogías y las abstracciones son un terreno escabroso de doble filo: primero porque la etiqueta se pone fácil y el público poco experimentado no será capaz de discernir el engaño, y segundo porque el crítico voraz que no simpatiza con los ideales lo tendrá fácil para arremeter. Si el nivel de implicación biológica en el proyecto puede variar en abstracción conceptual y por tanto suele quedar asociado a un entendimiento filosófico -de proceso-, en lo digital no suele ocurrir tal cosa: la computación en arquitectura es bastante explícita y para desgracia de sus ideales fácilmente aplicable al “corta y pega”. Esto la hace tremendamente susceptible de ser pervertida, erróneamente etiquetada y por lo tanto, prejuzgada.

026. /// Klaus, *GSD Lectures 2008: Parametric Design (I)*, 2009. Klaustoon's blog. Desprecio del resto de los arquitectos por las obras de Gehry.



La arquitectura “biodigital” para bien o para mal ha aparecido y se ha desarrollado en unas condiciones poco favorables para su entendimiento y crítica. Es importante hacer énfasis que el vasto abanico de oportunidades y maneras de proceder ofrecido por la naturaleza y el mundo digital es increíblemente enorme y por ello agrupar y juzgar de manera generalizada no es sino una muestra de desconocimiento por aquello que se califica. Obvia decir que como en cualquier otra corriente, la arquitectura biodigital goza de buenos y malos ejemplos. Cualquier arquitecto con criterio entiende el Pabellón Alemán de Mies Van de Rohe poco tiene que ver con las vulgares casas a pie de costa que aparecen en muchas revistas del hogar. No obstante,

³⁹⁴ Extraído de una foto del archivo de Caltech. Consultada 31 de octubre, 2015. <http://archives.caltech.edu/pictures/1.10-29.jpg>

para alguien no familiarizado con la arquitectura moderna, le resultará difícil posicionarlas, pues son los elementos más aparentes y superficiales los que destacan y las ponen en común. El lado oscuro de la arquitectura miesiana es el aborrecido minimalismo, simple -que no sencillo-, y económicamente muy rentable.

Es vital para la arquitectura biodigital discernir y más aún, resaltar, los buenos casos de los mediocres. Que aquellos que recorren el camino sean sus propios críticos, que se autovaloren los ideales que se persiguen desde dentro y no desde la celosa mirada del observador externo. Esa distinción no es sencilla, pues la complejidad se distribuye en tantos niveles que resulta difícil discernir cuales son las virtudes del proyecto y donde se hallan sin profundizar previamente sobre los valores específicos de cada obra. Cada uno de los proyectos se vuelve un ejercicio de investigación en sí mismo, un alarde de dominio y control de la complejidad geométrica -o de proceso-.

Tampoco es fácil iniciar una corriente que confía y depende en gran parte de la experimentación cuando se le opone el movimiento moderno de austeridad, minimalismo y racionalidad³⁹⁵. Situación agravada como se ha mencionado previamente por la crisis económica de 2008. Esta crisis ha supuesto el caldo de cultivo perfecto para la demonización de aquellas arquitecturas que parecen excesivamente expresivas, que aportan innecesariamente, que tienen una identidad más fuerte que su propio entorno³⁹⁶. Los errores fatales de algunos arquitectos son los que más destacan y sirven de excusa.

En un ejercicio perverso y demagogo el lector puede considerar algunas de las maravillas históricas de la arquitectura, piezas atemporales como palacios, monumentos, castillos, catedrales... Muchas de estas obras -colosales- se construyeron en condiciones inhumanas de pobreza o esclavitud en sociedades marcadas por la desigualdad. Hoy en día son patrimonio de la humanidad, a pesar de que si alguien planteara hacer algo semejante se consideraría un exceso y un derroche insostenible “sin precedentes”. Una vez más, no se pretende en ningún caso defender o justificar las acciones que algunos de los arquitectos han llevado a cabo estos últimos años, se condena abiertamente las obras totalmente desproporcionadas en su entorno o excesos alimentados por la avaricia y la corrupción. Pero al contrario de otras disciplinas donde siempre se busca llegar a nuevas cotas de desarrollo (automóviles, cada vez más complejos y tecnificados; interiorismo increíble y bellamente decorado; gadgets más pequeños y más potentes...) un sector de la arquitectura parece estar anquilosado en una ideología de conservación y austeridad que parece justificarse a través de los ataques a la “arquitectura biodigital”.

Son muchos de estas proto-arquitecturas y pabellones, los intentos por alcanzar un ideal arquitectónico propulsado por la computación y la biología. Como tales, son las primeras pruebas donde la mayor parte del esfuerzo

³⁹⁵ Por supuesto, el doctorando se permite generalizar para presentar una idea aproximada de la situación, que en ningún caso es tan simplista. El panorama actual está lleno de ramificaciones que han superado y evolucionado respecto a la Arquitectura Moderna de la primera mitad del siglo XX.

³⁹⁶ Divisare. “Architecture goes wild.” <http://divisare.com/architecture-goes-wild>

se invierte en materializar lo que nunca antes se había materializado a nivel arquitectónico. No son en absoluto, los mejores frutos que dará esta corriente, pero sí los más valientes. Se distinguen fácilmente por su ejecución y brillantez aquellos proyectos que han logrado adaptar una nueva tecnología (o un método existente a la nueva idea), de los que a través de las técnicas habituales intentan replicar lo que se ha logrado con herramientas más avanzadas. Aunque apreciados, algunos proyectos de UNSTUDIO, son ejemplos del segundo caso. Proyectos como el Arnhem Central Station, que parece obedecer a un interesante ejercicio de superficie mínima que ata los espacios, pero que por el grosor y tosquedad de su canto se expresa con menor valor que su idea primigenia. Peca igualmente el pabellón Burnham, donde además del grueso, se manifiesta claramente que las superficies se unen mediante una transición a un plano, cuando el espíritu del proyecto es la deformación de una única superficie.

La arquitectura ha de poder permitirse explorar el potencial de estas tendencias, ha de perdonarse los errores que llevan a pulir y entender una teoría y práctica más completa. La arquitectura ha de experimentar sin prejuicios los diferentes caminos que la componen, y caminarlos una y otra vez para perfeccionarlos, nunca abandonarlos:

La humanidad ha cometido el error de confundir el monstruo con su creador y culpar de nuestros pecados contra la naturaleza a nuestras creaciones³⁹⁷. BRUNO LATOUR

³⁹⁷ Latour, Bruno. "Love Your Monsters." *Next-Nature*. Consultada 19 de septiembre, 2014. <https://www.nextnature.net/2014/09/love-your-monsters/>

2.4. ‘Biolearning’: cuando lo digital se torna natural

A new age of design from a Nature inspired Design to a design inspired nature³⁹⁸. NERI OXMAN

Debe iniciarse este capítulo, uno de los más prometedores de la arquitectura, con una advertencia hacia la terminología difundida alrededor del término “bio”. Siguiendo con la vorágine verde y sostenible, los términos “de lo vivo” también se han adoptado frecuentemente sin ningún tipo de escrúpulos, ya sea en la arquitectura o cualquier otro ámbito. Las casas de paja ahora son bio-arquitectura... también entonces las de madera por comparación. ¿Existe desde siempre la bio-arquitectura? ¿Es la arquitectura que alberga vida bio-arquitectura? ¿Es aquella que responde a un entorno natural bio-arquitectura? Probablemente no, probablemente este sea el último gran malentendido termonológico que se ha deslizado en la arquitectura. El prefijo “bio” debería estar exclusivamente reservado para aquello que realmente integre vida real entre los elementos arquitectónicos³⁹⁹. ¿Qué porcentaje de la arquitectura biodigital es #biomimic-marketing? ¿Cuánta arquitectura se acuña como biodigital de una manera superficial con el objetivo de vender una modernidad aparente, de la misma forma que se ha prostituido la sostenibilidad⁴⁰⁰? ‘Biolearning’, ‘Biomimicry’, ‘Bioinspired’... son conceptos que siempre causan incertidumbre y suspicacia entre los que los valoran y manejan. También los términos “algoritmo” y la “evolución” están en auge en el lenguaje llano, se han vuelto ‘mainstream’ (o de cultura de masas), curioso, teniendo en cuenta que datan de 1842 y 1859 respectivamente. Experimentar, probar, mejorar con el tiempo un objeto, convertirlo en una serie de sucesivos intentos que se aproximan más y mejor a la perfección... Esta descripción es aplicable a casi cualquier proyecto de diseño o arquitectura y en ningún caso supone un reflejo fiel del esquema evolutivo. Evolución es la combinación azarosa -aleatoria en el producto pero no en la manera- de elementos preestablecidos o emergentes cuyo resultado es desconocido; es la progresión objetiva de una multitud de individuos donde su recorrido solo es descubierto por comparación y cuya forma final es ignorada.

³⁹⁸ Oxman, Neri. *Design at the intersection of technology and biology*. TED Talks. Consultada 30 de octubre, 2015. http://www.ted.com/talks/neri_oxman_design_at_the_intersection_of_technology_and_biology?share=16b07a3c86#t-110929

³⁹⁹ Estévez, Alberto T. “Learning from nature: architecture and design in the first biodigital age.” 2nd International Conference of Biodigital Architecture & Genetics. Barcelona: ESARQ, 2014. p.13.

⁴⁰⁰ Plataforma Arquitectura. “Por qué la arquitectura verde pocas veces merece su nombre.” Consultada 18 de marzo, 2015. <http://www.plataformaarquitectura.cl/cl/02-276919/por-que-la-arquitectura-verde-pocas-veces-merece-su-nombre>. Artículo original: por Michael Mehaffy & Nikos Salingaros, apareció originalmente Metropolis Mag como “Why Green Often Isn’t”.

*Cinzel o gen. Maquina u organismo. Ensamblaje y crecimiento. Henry Ford y Charles Darwin*⁴⁰¹. NERI OXMAN

En este apartado de la tesis se atenderán aquellas tendencias que han adoptado los procesos naturales con más fuerza y fidelidad. Más allá de abstraer conceptos, los siguientes párrafos describen un verdadero énfasis por recrear una arquitectura natural, y resaltarán la validez de la naturaleza como gran influenciadora, capaz de inspirar en todos los niveles del diseño, desde lo material hasta lo organizativo. Cabe mencionar que, en términos de diseño y aceptación, los bio-productos pueden ejercer una aceptación mayor a través del subconsciente. Esto se debe a la generación de un producto de Nostalgia Innovadora⁴⁰², elementos que inspiran los valores positivos de lo vivo y natural. No ha de desdeñarse este valor en ‘marketing’ a pesar de su aparente superficialidad sin motivo funcional pues, tal y como se ha mencionado en capítulos anteriores, la aceptación de la tecnología en los diferentes estratos es vital para el éxito y desarrollo de la misma (cap. 2.1).

El campo de la biomimética puede ser rastreado hasta los trabajos de Leonardo da Vinci, sus notas y esbozos analizaban la anatomía de los pájaros y sus sistemas de vuelo con la esperanza de construir “máquinas voladoras”. Y si bien Leonardo no llegó a conseguirlo, sus estudios sirvieron de referencia para los Hermanos Wright, que si lo lograron en 1903⁴⁰³. Más perturbador pero claro ejemplo de los primeros pasos hacia una bio-arquitectura -más allá de la incorporación de las plantas- es la obra de Dalí. El primer mobiliario que representa lo “carnoso o vivo” a través del retrato de Mae West⁴⁰⁴.

*La arquitectura será blanda y peluda o no será*⁴⁰⁵. SALVADOR DALÍ

B.M. Katz define este campo como el estudio de procesos naturales que pueden ser emulados para solventar los problemas humanos en una manera cooperante con la vida en el planeta⁴⁰⁶. A pesar de que el marco temporal de millones de años de la evolución se encuentra en un rango y escala completamente diferente al de disciplinas como la ingeniería, diseño de producto, materiales y/o arquitectura, si es cierto que hay objetivos comunes

⁴⁰¹ Oxman, Neri. *Design at the intersection of technology and biology*. TED Talks. Consultada 30 de octubre, 2015. http://www.ted.com/talks/neri_oxman_design_at_the_intersection_of_technology_and_biology?share=16b07a3c86#t-110929

⁴⁰² Next-Nature. “Innovative Nostalgia”. Consultada 15 de agosto, 2015. http://www.nextnature.net/themes/innovative-nostalgia/?utm_content=bufferd9132&utm_medium=social&utm_source=twitter.com&utm_campaign=buffer

⁴⁰³ Weiner, S., y H. D. Wagner. “THE MATERIAL BONE: Structure-Mechanical Function Relations.” *Annual Review of Materials Science* n° 28. Agosto, 1998. p. 271-298.

⁴⁰⁴ Retrato de Mae West, 1935. El mismo año que la pintura, Dalí encargó fabricar, a petición del inglés Edward James, un sofá semejante al del cuadro. La habitación se reprodujo a finales de los años setenta en el museo Salvador Dalí de Figueras con la colaboración del arquitecto Óscar Tusquets.

⁴⁰⁵ Respuesta de Dalí a la pregunta Le Corbusier sobre el futuro de la arquitectura.

⁴⁰⁶ Klein, Lance. *A phenomenological interpretation of biomimicry and its potential value for sustainable design*. Manhattan: Kansas State University, 2009. Tesis.

al biológico: búsqueda de funcionalidad, optimización, eficiencia energética, efectividad-coste....

*Every material object has the ability of conveying forces. We are studying the capability to convey forces independent of form, material, and type of load... in all objects of organic and inorganic matter*⁴⁰⁷.
FREI OTTO

Haciendo mención de algunos ejemplos aplicados encontramos turbinas con forma algorítmica/vórtice⁴⁰⁸; vidrios para ventanas visibles para los pájaros, de la misma forma que lo son las telarañas⁴⁰⁹, o el mismo velcro, uno de los ejemplos más evidentes de tecnología inspirada por el 'biolearning' (ideado a raíz de los ganchos que algunas plantas -*Arctium bardana*- usan para que sus semillas se enganchen a los pelajes de los animales). Instituciones como biomimicry.net, asknature.org, o materfad.com, recopilan cientos de ejemplos muchos de los cuales son o pueden ser transformados en arquitectura. Materialmente, Niklas demuestra que la carcasa de una nuez de Macadamia es tan dura como el aluminio, resiste el doble de la fuerza necesaria para fracturar varios metales y es más resistente que el vidrio de silicato, el hormigón, la porcelana o el ladrillo convencional⁴¹⁰. Estas capacidades excepcionales en materiales biológicos no se debe tanto a sus propiedades como a las microestructuras que lo componen. La forma de los árboles permite autosustentación además de resistencia a fuerzas laterales producidas por el viento al mismo tiempo que maximiza la transferencia de fluidos y calor a través de sus tejidos e internos. Los huesos pueden variar su densidad a través de la deposición de fibras de calcio dependiendo de si los requerimientos son menores o mayores, como la baja gravedad en el espacio o el periodo de embarazo respectivamente⁴¹¹.

La variación de esas estructuras y su disposición es lo que da lugar a tan vasto abanico de propiedades. Podemos postular pues, que el diseño de la estructura material es importante en el diseño natural. Términos como anisotropía, o heterogeneidad aplicados en la distribución material nos permiten entender los diferentes comportamientos que puede demostrar un material en base a su dirección u orientación, la manera en la que absorben las fuerzas, su índice de reflectividad, su densidad... La posibilidad de controlar la direccionalidad física y mecánica puede dar lugar a estructuras altamente eficientes y formas adaptadas al entorno para soportar las restricciones del medio ambiente⁴¹². Cualquier ser vivo subyace reglas geométricas como las descritas por D'Arcy

⁴⁰⁷ Otto, Frei, Rudolf Trostel, y Friedrich Karl. Schleyer. *Tensile Structures; Design, Structure, and Calculation of Buildings of Cables, Nets, and Membranes*. Cambridge, MA: MIT Press, 1973.

⁴⁰⁸ Greenbiz. "Why biomimicry will shape future design." Consultada 29 de febrero, 2015. <http://www.greenbiz.com/video/why-biomimicry-will-shape-future-design>

⁴⁰⁹ Consultada 6 de marzo, 2015. <http://www.ornilux.com/>

⁴¹⁰ Niklas, Karl J., y Hanns-Christof Spatz. *Plant Physics*. Chicago: University of Chicago Press, 2012.

⁴¹¹ Wolff J. "The Law of Bone Remodeling". Berlin Heidelberg Nueva York: Springer, 1986 (translation of the German 1892 edition)

⁴¹² Thompson, D'Arcy Wentworth. *Growth and Form*. Cambridge: Cambridge University Press, 1942. p.111.

Thompson o Matila Ghyka⁴¹³.

Thompson expone que cualquier concepción debe ser argumentada en términos de magnitud y dirección, ya que el efecto de la escala depende no solo de la cosa en sí, sino también de sus relaciones con el entorno o medio. Este debate es de gran importancia para la arquitectura debido a la importancia de la escala y su constante variación. El pensamiento mecánico y la teleología, como el primero explica cómo se hacen las cosas (los constructores hicieron la casa colando las piedras) y el segundo la causa final del objeto (la casa esta para que la gente viva en ella). Ambos son importantes y entretejen una certeza más amplia. Se abre también la dicotomía entre la forma y el tamaño de la forma. El tamaño dicta el peso que el organismo debe soportar, mientras que la forma del organismo define como debe ser transmitido ese peso. Desde la bacteria más pequeña (0.3 micrómetros) hasta las ballenas (30 metros), la naturaleza sigue sorprendiendo con un amplio abanico de soluciones para diferentes escalas⁴¹⁴. La relevancia de la “escalaridad biológica” y el propósito final que le da razón de ser es clave cuando pretende trasladarse a la arquitectura y con frecuencia son el motivo más criticable de los proyectos bioinspirados. Y si bien no se considera apropiado continuar profundizando en el aspecto material de lo biológico, ya que esta tesis se centra en el desarrollo, organización y selección de la forma, cualquier arquitecto debe y/o puede considerar e incorporar estos valores materiales a cualquier línea proyectual. No solamente por su valor innovador en el ámbito de los materiales, pero también por el entendimiento de la organización, la filosofía del mismo se relaciona directamente con los objetivos de esta tesis:

*In design, the process appears as simple and as straightforward as that: imagine, draw, apply and analyze; construction follows. Invert this process, and you will, again, arrive at Nature's Way*⁴¹⁵. NERI OXMAN

En la forma arquitectónica, se entiende que el concepto “forma” es la descripción geométrica. La forma es una categoría descriptiva, al contrario que causa condicional en la naturaleza. Durante miles de años, la estructura más grande en la tierra fueron las pirámides, pero raramente se describen desde el punto de vista de distribución de carga -razón de su tamaño y longevidad-. Es una práctica arquitectónica aceptada el uso de espacios preconcebidos que han sido diseñados convencionalmente para funciones genéricas. La forma arquitectónica se ve afectada por funciones externas, inpuestas a priori en lugar de cambiar y adaptarse en función del propio proyecto, modificado por el resto de sus partes en pos de un equilibrio global. Por contra, biológicamente la supervivencia de los seres vivos depende en su habilidad para negociar entre diferentes multi-funciones y evaluar su relativa importancia en un singular proceso de integración de crecimiento, respuesta

⁴¹³ Ghyka, Matila C. *The Geometry of Art and Life*. Nueva York: Dover Publications, 1977. p. 87.

⁴¹⁴ Thompson, D'Arcy Wentworth., y Ibeas Delgado Juan Manuel. *Sobre El Crecimiento Y La Forma*. Madrid: Hermann Blume, 1980. p. 5.

⁴¹⁵ Oxman, Neri, *Material-based design computation*, Massachusetts Institute of Technology, 2010, p.125

y adaptación.

Entre cientos de habilidades, una de las más singulares es sin duda la capacidad de los sistemas biológicos para diagnosticar y reparar daños localizados en sus estructuras. En los puentes vivientes de Cherrapunji⁴¹⁶, por ejemplo, las raíces superficiales del *Ficus Elastica* han invadido las guías huecas que se pusieron a tal efecto. En unos 15 años, puentes de hasta 30m. de longitud pueden cargar a más de 50 personas. Mientras un puente convencional se debilita a lo largo del tiempo, estos se refuerzan con el crecimiento del árbol. Cualquier otra construcción de madera se degradaría y pudriría por ser este uno de los lugares del mundo más húmedos, algunos de estos sin embargo, superan los 500 años. Como se verá a posteriori, la virtud de fondo de este comportamiento es la de los “sistemas complejos”. ¿Son estos puentes óptimos a nivel de diseño estructural-material? Obviamente no, pero ello no implica en absoluto una desconexión hacia tal aspecto. Las estructuras basadas en L-Systems de Dennis Dollens puede que no sean las más óptimas estructuralmente., pero la naturaleza no entiende de optimización, sino de eficiencia. Sus arquitecturas atienden a otros valores como asoleamiento, ventilación cruzada, organización, flexibilidad... y esos valores son atendidos al unísono mediante un única regla geométrica y estructuradora.

Otro caso significativo, la piel, como uno de esos elementos multifuncionales, hace a su vez de captador de energía (ojos de algunos insectos), generación de color (escamas de una mariposa), transferencia de calor (plumas de pingüinos), transferencia de masa, reducción de rozamiento (piel de tiburón), superficie adhesiva (pie del camaleón), superficie repulsiva, sensitiva...⁴¹⁷ El denominador común en todos estos ejemplos es que están contruidos con complejas estructuras de fibras. Caparazones, perlas, corales, dientes, madera, seda, cuernos, colágeno, músculos... matrices celulares capaces de readaptarse durante el crecimiento basándose en restricciones externas de antemano. La forma de la materia es pues, directamente relacionada a las fuerzas que la influyen, y se concentra o dispersa donde fuerza o elasticidad la requieren⁴¹⁸.

It is a well-known fact that in nature shape is cheaper than material, yet material is cheap because it is effectively shaped and efficiently structured. NERI OXMAN

La sostenibilidad y eficiencia de los objetos naturales se debe a la posición y distribución de sus materiales, los cuales responden a presiones estructurales y medioambientales, provocando un objeto altamente personalizado y adaptado a su entorno. Esos procesos de generación de forma mejoran en la naturaleza gracias a la inclusión de modelado (crecimiento), análisis (adaptación), y fabricación (estructura material). En su génesis la distinción entre materia y estructura es elusiva e irrelevante, se integran y conforman

⁴¹⁶ Living roots bridges in Cherrapunji, India.

⁴¹⁷ Benyus, Janine M. *Biomimicry: Innovation Inspired by Nature*. Nueva York: Morrow, 1997.

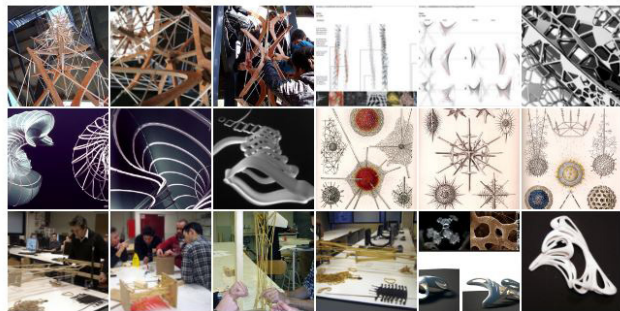
⁴¹⁸ Weiner, S., y H. D. Wagner. “THE MATERIAL BONE: Structure-Mechanical Function Relations.” *Annual Review of Materials Science* nº 28. Agosto, 1998. p. 30.

masas interdependientes⁴¹⁹. Adoptar esas cualidades de forma cambiante dentro de un material abre un nuevo paradigma constructivo para cualquier disciplina asociada a la fabricación/construcción. Vaticina la liberación de la ingeniería de producción en masa, que obliga al arquitecto, al diseñador, a pensar de una manera fragmentada dentro un marco donde sus piezas tienen que ser individuales, homogéneas, y conectables con el resto. Por contra, se ha destacado la capacidad de la piel para adaptarse en porosidad, dureza y sensibilidad sin mostrar en ello partes o ensamblajes.

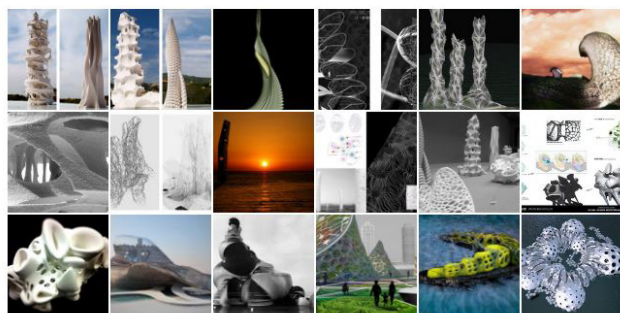
Los nuevos campos que están influenciando la arquitectura y que permitirán en periodo tiempo de corto el desarrollo de diseño verdaderamente bioinspirado son:

- Computational design: formas complejas con simple código.
- Additive manufacturing: añadir material, en lugar de excavarlo
- Material engineering: diseñar el comportamiento de los materiales
- Synthetic biology: modificar funciones biológicas.

027. /// Mosaico de trabajos realizados en los Studios de Dennis Dollens, Karl S. Chu y Alberto T. Estévez. Captura de la web del máster de Arquitectura Bio-Digital, 2014.



En los próximos capítulos se tratarán de forma tangencial estos temas, mencionando al menos los aspectos más importantes. Más adelante se profundizará especialmente en ‘Computational design’ concretando más aun alrededor de los procesos Evo-Devo. Se ha considerado la relevancia de los otros capítulos porque su análisis revela que son susceptibles en números casos de ser influenciados por los descubrimientos y experimentos realizados en el ‘Computational Design’. Las herramientas digitales siguen siendo vitales para comprender los procesos biológicos que se desarrollan en ‘Synthetic biology’, o cómo se organiza la materia en ‘Additive Manufacturing’ y ‘Material engineering’. Por lo tanto, la simulación de la primera puede servir de gran ayuda en la previsualización de las últimas en cualquiera que sea la escala que corresponda.



Es razonable terminar este capítulo con la mención del trabajo que se realiza en el máster en Arquitectura Biodigital desde el año 2000 en la vertiente de diseño computacional y su orientación hacia el ‘Biolearning’, especialmente las figuras de los doctores Dennis Dollens

y Alberto T. Estévez, que en todas sus ediciones hacen un meritorio esfuerzo por integrar procedimientos biológicos en la arquitectura.

Son de obligada mención las consecuentes sub-clasificaciones dentro de la arquitectura biodigital llevadas a cabo por Estévez, de especial interés por

⁴¹⁹ Oxman, Neri. *Material-based design computation*, Massachusetts Institute of Technology, 2010, p.2.

el recorrido histórico e influencia en el máster de Arquitectura Biodigital (dirigido por él mismo) que ha logrado reunir a numerosos arquitectos pioneros en sus respectivos campos. La lista incluye términos mencionados y otros a mencionar. A pesar de que ya se ha advertido a lo largo de la tesis sobre la peligrosidad de las etiquetas debido a la complejidad de los conceptos y sus difusos límites, tratar de clasificar y definir los aspectos básicos es necesario para una correcta comprensión del ecosistema biodigital, y por tanto se lista a continuación un resumen del texto original⁴²⁰:

- **Arquitectura biomórfica:** aquella cuyas formas son similares a las de los seres vivos.
- **Arquitectura biónica:** aquella cuyo funcionamiento, sistemas o procesos son similares a los de los seres vivos.
- **Arquitectura orgánica:** aquella que funde en unidad y continuidad los elementos de diferentes funciones.
- **Organicismo digital:** aquella arquitectura/diseño orgánico que usa para su proyección los medios cibernéticos-digitales.
- **Arquitectura genética:** aquella que tiene aplicada la genética (real o metafórica).
- **Arquitectura biológica:** aquella que incorpora elementos naturales vivos (habitualmente vegetación).
- **Arquitectura digital:** aquella que sólo puede proyectarse con medios informáticos.

Por supuesto, en un última instancia la arquitectura de Estévez y Dollens contiene matices de casi todas estas categorías.

...nowadays it is no longer about building "in" nature, but building "with" nature, and even building nature itself, equally without any preposition⁴²¹. ALBERTO T. ESTÉVEZ

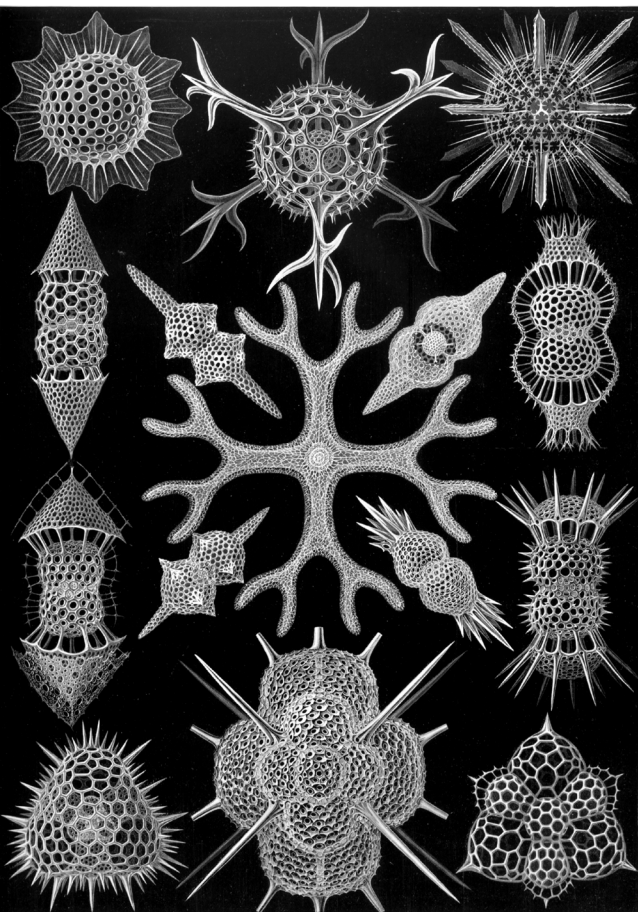
En sus respectivos estudios se aborda el análisis de las formas y sus múltiples posibilidades de adaptación al ámbito arquitectónico a través de su función y comportamiento, transformar para aplicar sin pervertir el propósito constructivo ni caer en la copia anecdótica. Es por ello que a nivel etimológico se hace especial hincapié en el abandono del término 'biomimicry' o 'biomimetics' por ese otro que da título al capítulo presente.

...what is produced should thus more appropriately be called biolearning, which is different to biomimetics (mimesis, imitation, copy of nature), or what could be described as bioinspiring⁴²². ALBERTO T. ESTÉVEZ

⁴²⁰ Estévez, Alberto T. *Arquitectura Biodigital Y Genética: Escritos = Biodigital Architecture & Genetics: Writings*. Barcelona: ESARQ, 2015. p. 47.

⁴²¹ Estévez, Alberto T., "Arquitecturas genéticas", *Genetic Architectures / Arquitecturas genéticas*, SITES Books / ESARQ-UIC, Santa Fe (USA) / Barcelona: 2003.

⁴²² Estévez, Alberto T. "Learning from nature: architecture and design in the first biodigital age." 2nd International Conference of Biodigital Architecture & Genetics. Barcelona: ESARQ, 2014. p.14.



Por último, por su valor histórico, por su evidente capacidad para “bioinspirar” y traducirse en formas geométrica y/o arquitectónicas, es menester citar el trabajo de Ernst Haeckel⁴²³, y su estudio de las formas orgánicas -más de mil grabados- en el mundo natural con una clara vocación descriptiva y analítica. A lo largo de su vida, Haeckel se convirtió en el defensor principal de la teoría del evolucionismo en Alemania. Sus dibujos son una de las referencias históricas en los estudios de los doctores Dollens y Estévez⁴²⁴ y han servido en numerosas ocasiones para iniciar los primeros pasos hacia el ‘biolearning’, así como su resonancia en proyectos posteriores que se han llevado a cabo por el grupo de investigación de Arquitecturas Genéticas (Pabellón Biodigital, 2009) o el propio doctorando (mapa filogenético de una radiolaria⁴²⁵). Los últimos capítulos de esta tesis también harán referencia a este tipo de estructuras en relación a los temas de: teselación, subdivisión, y mallas (cap. 3.4, modelo de desarrollo computacional).

2.4.1. Diseño de materiales (máxel)

En el capítulo anteriores se ha reiterado la influencia de las fuerzas sobre la forma, siendo la segunda no una consecuencia directa pero si evidentemente el resultado de un fenotipo extendido⁴²⁶, es decir, el resultado final está definido por la geometría del genotipo y la continua aplicación de las fuerzas. Las actuales líneas de diseño de materiales pasan por descifrar las organizaciones internas de dichos materiales para lograr determinados efectos. Gracias a los microscopios electrónicos se hace más evidente que la organización interna, la geometría que rige los materiales, repercute directamente sobre su comportamiento.

Por ejemplo, el concepto de ‘closest packing’ (o empaquetamiento compacto)

⁴²³ Haeckel, Ernst. *Kunstformen Der Natur*. Leipzig: Verlag Des Bibliographischen Instituts, 1899.

Versión digital: <http://caliban.mpipz.mpg.de/haeckel/kunstformen/natur.html>

⁴²⁴ Además de las fotografías a nivel microscópico, los dibujos de Haeckel son una de las referencias del proyecto: *Genetic Architectures. Biodigital Pavilion*. UIC, Barcelona, 2008-2009.

⁴²⁵ Navarro, Diego. *Random May Not Be Random*. Barcelona: s. e., 2011. Tesina en máster de Arquitectura Biodigital. p. 30.

⁴²⁶ Dawkins, Richard. *The Extended Phenotype: The Long Reach of the Gene*. Nueva York: Oxford University Press, 1990.

que implica la reducción al mínimo de los espacios vacíos entre agrupaciones de esferas -objeto geométrico primigenio y universal-; se da de manera espontánea -y por lo tanto es funcional- en todo tipo de escalas: desde los neutrones y protones de un átomo, hasta objetos tan pesados como las balas de cañón. Es propio de estructuras naturales, caracterizadas por respuestas que requieren menor energía y aparece tanto en el reino de lo animado como del inanimado. Estos hechos nos permiten apreciar la universalidad de esa tipología organizativa -cuasi estructural- que, interesantemente, es equivalente al principio de triangularización, bien conocido por su estabilidad geométrica⁴²⁷. Existen dos tipos de disposición: la cúbica y la hexagonal (ABABABA y ABCABCA) en relación a la disposición de las capas y, más importante aún en términos arquitectónicos, a los límites que ellas producen en forma de prisma hexagonal o prisma rectangular⁴²⁸.

La comprensión de la organización de la materia viva de sus niveles primigenios, el momento en que las masas amorfas de células comienzan a trazar estructuras, ha sido uno de los aspectos más desarrollados por el equipo de Arquitecturas Genéticas. Los estudios microscópicos del Dr. Alberto Estévez han recalado la fractalidad en la jerarquía de las formas y han dado lugar a numerosos proyectos⁴²⁹ tanto arquitectónicos, como artísticos y paisajísticos⁴³⁰. También en la línea de la ordenación y estructuración de la materia ('additive manufacturing y material engineering) resulta de interés el trabajo de Neri Oxman, uno de los miembros más notables en el campo del Biolearning y su aplicación al diseño y la arquitectura. La separación institucionalizada de la separación entre forma, estructura y material, profundamente embebida en la teoría del diseño moderno es apoyada paralelamente por una metodología particionista del modelado, el análisis y la fabricación, derivando todo ello en generación de formas normalmente dirigidas por la geometría. Esta priorización se ha contagiado e influenciado el diseño lógico del CAD, uno que raramente tiene en cuenta lo material. Las convenciones de la era pre-digital han sido preservadas y reapropiadas en el CAD. La revolución ha logrado una liberación sin precedentes en la expresión formal, pero ha pronunciado el vacío entre el diseño abstracto y el comportamiento matérico.

Oxman considera que este aspecto puede ser subsanado gracias el estilo de la naturaleza, donde materia y forma son indivisibles. La naturaleza prioriza la función estructural y el rendimiento con el entorno como fuerzas moldeadoras de la materia y no a la inversa, en ninguna caso se seleccionan y asignan formas preconcebidas. El material distribuido heterogéneamente para adecuarse a las necesidades estructurales y/o el rendimiento medioambiental. Esa heterogeneidad se debe a la integración entre forma, estructura, y material.

⁴²⁷ Thompson, D'Arcy Wentworth. *Growth and Form*. Cambridge: Cambridge University Press, 1942.

⁴²⁸ Conway, John H., y N. J. A. Sloane. *Sphere Packings, Lattices, and Groups*. Nueva York: Springer-Verlag, 1988.

⁴²⁹ Genetic Architectures. "Genetic Barcelona Project." 2007-2009. Consultada 28 de diciembre, 2015. http://geneticarchitectures.weebly.com/research_group.html

⁴³⁰ Estévez, Alberto. "Still alive", *landscapes and others fleshinesses series*. Barcelona: ESARQ, 2010. pp. 5-11

*Fitness, not form, is what actually matters*⁴³¹. NERY OXMAN

A nivel computacional, los talleres de Neri Oxman hacen uso de las siguientes herramientas: 'Tiling Behavior & Digital Anisotropy', 'Finite Element Synthesis', y 'Material Pixels'⁴³². De estas tres se omitirá en esta tesis la primera de ellas por pertenecer al ámbito de los patrones (ya se ha mencionado que la tesis valora procesos de desarrollo pero no profundizará en las variantes geométricas que derivan de ellos); y el uso de elementos finitos, que se asocia a la optimización de ecuaciones diferenciales parciales, comúnmente usadas en problemas de ingeniería y física. Aunque puede hallarse un cierto paralelismo en los procesos evolutivos de esta tesis (también orientados a la optimización) su metodología es diferente.

El uso de pixels materiales sin embargo revela valores y estrategias de utilidad para los posteriores experimentos, especialmente en referencia a la organización geométrica y el traspaso de diferentes capas de información asociadas a un único elemento. Su espacialidad y función se verá directamente relacionada con las aptitudes de lo embriológico. La incorporación de la materialidad en el reino digital se lleva a cabo a través de voxels⁴³³ (volumen+pixel), maxels (material+pixel), elementos finitos y partículas: elementos digitales presentados como unidades para albergar información física⁴³⁴. Con todo, las herramientas computacionales con orientación material son usadas principalmente con propósitos optimizadores y no generadores de forma. Oxman secciona el proceso en las siguientes técnicas y asociaciones elementales:

- Proceso de modelado: estrategias de teselación (que tipo de pieza/s conforman las agrupaciones).
- Proceso de análisis: basado en la 'mesh unit' (para analizar luz, o carga...).
- Proceso de fabricación: el 'maxel' como elemento de negociación entre lo digital y la fabricación física.

La búsqueda de la unidad universal, la célula paramétrica capaz de contener todo tipo de información es uno de los más importantes futuribles del diseño aunado a la fabricación. ¿Cómo integrar un modelado que incorpore geometría (forma), análisis (energía y estructura) y fabricación (materia)?

- Unidad energética: derivada y definida por el entorno (por ejemplo temperatura, campo electromagnético, iluminación, etc.) Estos elementos deberían escalar con el gradiente de esas variables.
- Unidad material: definidas por el material y sus propiedades puntuales (por ejemplo densidad, transparencia, rigidez, etc.) y por una organización micro-estructural de múltiples unidades (granos, fibras, etc.).
- Unidad geométrica: definida por su forma (por ejemplo tetraedro,

⁴³¹ Oxman, Neri. *Material-based design computation*. Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology, 2010. p.71.

⁴³² *Ibidem*. p.3.

⁴³³ Tecnología mencionada en el desarrollo de CGI en el capítulo "Sobre la historia de la computación".

⁴³⁴ Oxman, Neri. op. cit. 2010. p.74.

triángulo, etc.) y por la conectividad establecida entre dos o más unidades (triángulos que son parte de un tetraedro, tetraedros que comparten el mismo triángulo, etc.)

A nivel de fabricación industrial, el sistema VPRP (variable property rapid prototyping) permite imprimir materiales con propiedades variantes: densidad, elasticidad, etc. A día de hoy, supone la vertiente más próxima a mimetizar los comportamientos descritos al comienzo del capítulo, totalmente opuestos al escenario actual donde componentes homogéneos se ensamblan obedeciendo a la lógica de la construcción.

*In Nature one finds complete integration between shape, structure and material. Such integration, as we shall argue, is achieved by the assimilation between formal generation, adaptation and growth analogous to modeling, analysis and fabrication in the design of the artificial*⁴³⁵. NERI OXMAN

Neri Oxman explicita en esta cita que el crecimiento del sistema forma parte del diseño natural y lo condiciona. Las reglas geométricas y el orden de su desarrollo son tan propias de un proceso vivo como sus características finales. Este proceso de desarrollo es el causante de una adaptación exitosa, constante, que no se da en la arquitectura. Si ha de incrementarse el “reaccionismo” en la arquitectura o si dicho proceso de adaptabilidad ha de darse de manera virtual, simulada, queda a discrección de futuras generaciones.

El entendimiento de las células como vóxels se extenderá durante los capítulos de desarrollo computacional a través de mallas poligonales como topologías (cap. 3.4.2).

2.4.2. Lo biológico como software (biología sintética)

Parte del éxito de la explosión digital que ha propiciado recíprocamente internet y un mercado global en tiempo real es la descentralización de poder y la ausencia de necesidad de recursos económicos. Cuando no son necesarias empresas gigantes, estudios de mercado o costosas instalaciones para hacer un proyecto de repercusión mundial como Google o Yahoo, cuando lo importante son las ideas y un reducido grupo de personas dispuestas a llevarlo a cabo, el sistema económico de innovación cambia completamente (vease el boom de las “punto com”⁴³⁶ o los humildes orígenes de Apple⁴³⁷). Las herramientas son accesibles y se es libre para jugar con ellas. Esta idea se ha desarrollado extensamente en el capítulo sobre herramientas digitales y sus

⁴³⁵ Oxman, Neri, Oxman, Neri. op. cit. 2010. p.84

⁴³⁶ Editorial. “El día que la burbuja puntocom pinchó.” *El País*. Marzo, 2010. http://economia.elpais.com/economia/2010/03/10/actualidad/1268209975_850215.html

⁴³⁷ Álvarez, Raúl. “El garaje donde nació Apple es un mito.” *Applesfera*. Consultada 30 de diciembre, 2014. <http://www.applesfera.com/entrevistas/el-garaje-donde-nacio-apple-es-un-mito-steve-wozniak>

repercusiones. Actualmente, el campo que está gozando de esa posición de emergencia debido a lo asequible de sus componentes y un mercado receptivo es el de la robótica y lo responsivo por extensión⁴³⁸. Gracias a herramientas como Arduino o Rasperry Pi no hay q reinventar todo desde cero y las piezas del puzle están ahí a disposición de todos para ser reordenadas a placer⁴³⁹.

La biología se encamina ahora hacia esa posición⁴⁴⁰: En 2003 costó 2'5 billones de dólares secuenciar el genoma humano. Ahora (2015) un descodificador de genes que cabe en la palma de tu mano vale mil dólares⁴⁴¹. George Churchill sentencia que la biología viene hasta 6 veces más rápida que la tecnología, en lo que a la Ley de Moore se refiere⁴⁴². Particularmente, es la biología sintética⁴⁴³ la parte con mayor potencial, disciplina que aspira a construir nuevas entidades biológicas o la modificación de organismos existentes mediante principios ingenieriles. Se trata de programar organismos vivos para que su comportamiento sea predecible y funcional. La mayoría de las personas que trabajan en 'synthetic biology' no son biólogos, sino ex-científicos de computación y robótica y los chips biológicos están en proceso de convertirse en una realidad⁴⁴⁴ ⁴⁴⁵. Si hoy lo digital trata de imitar y simular los procesos biológicos, en pocos años será lo biológico lo que se comportará como lo digital en lo que ha flexibilidad y utilidad se refiere.

El reciente y constante goteo de proyectos e investigaciones denotan y avalan la futura importancia de la biología sintética: aparecen conceptos como "Street bio"⁴⁴⁶; se construyen impresoras capaces de modificar e imprimir ADN⁴⁴⁷; se diseña ropa responsiva que puede reaccionar gracias a células vivas con la propiedad de la hidromorfia⁴⁴⁸; se fabrican "biomaquinas" que mejoran la

⁴³⁸ Garfella, Carlos. "Barcelona quiere ser la primera dron.city de España." *El País*. Consultada 31 de julio, 2016. http://ccaa.elpais.com/ccaa/2016/07/28/catalunya/1469717614_396371.html

⁴³⁹ "Panasonic: de aquí a 5 años habrá una gran explosión en la robótica." *el Economista*. Consultada 31 de julio, 2016. <http://www.economista.es/tecnologia/noticias/7692091/07/16/Panasonic-De-aqui-a-5-anos-habra-una-gran-explosion-en-la-robotica.html>

⁴⁴⁰ Biofabricate Summit. Consultada 28 de diciembre, 2014. Congreso. <http://makezine.com/2014/12/18/biofabricate-theres-a-bio-revolution-on-the-horizon/>

⁴⁴¹ Nanopore Technologies - MinION Mkl: <https://www.nanoporetech.com/products-services/minion-mkl>

⁴⁴² 2015 Solid Conference MIT

⁴⁴³ Ito, Joi. "Why Bio is the New Digital." *Youtube*. Consultada 6 de marzo, 2015. <https://www.youtube.com/watch?v=pnHD8gvccpl>

⁴⁴⁴ Franco, Dante. "Los bioordenadores tienen un gran futuro. Nos falta responder: ¿para qué?" *FayerWayer*. Consultada 31 de agosto, 2014. <https://www.fayerwayer.com/2014/05/ordenadores-hechos-de-moho-y-otros-chips-biologicos/>

⁴⁴⁵ Sabán, Antonio. "Los chips basados en neuronas biológicas quieren desafiar la ley de Moore." *Biothinkbig.com*. Consultada 29 de marzo, 2016. <http://blogthinkbig.com/los-chips-basados-en-neuronas-biologicas-quieren-desafiar-la-ley-de-moore/>

⁴⁴⁶ Kong, David. "Street bio: synthetic biology meets community." *Solid*. Consultada 29 de junio, 2015. Congreso. <http://conferences.oreilly.com/solid/internet-of-things-2015/public/schedule/detail/45022>

⁴⁴⁷ Cosmomagazine. "Company develops a way to 3D print DNA and design a living creature." Consultada 27 de febrero, 2015. <http://blog.cosmomagazine.com/blog/2015/2/2/company-develops-a-way-to-3d-print-dna-and-design-a-living-creature>

⁴⁴⁸ Tangible Media Group. *Biologic*. MIT, Noviembre, 2015. Consultada 6 de marzo, 2016. <https://vimeo.com/142208383>

levadura común o generando fachadas con micro algas capaz de producir calor y combustible⁴⁴⁹, la creación de la primera célula artificial⁴⁵⁰, o hijos con tres padres⁴⁵¹... Entre las promesas del campo de la biología sintética esta la sustitución de las energías no renovables por bio-combustibles, la revolución del campo de la medicina -sustituyendo los medicamentos por hordas macrobióticas-, la mejora de las características alimenticias que permitan acabar con el hambre en el mundo, y nuevas formas de diseño -un pack para construir en casa tu propia planta-. Estas promesas, que destilan un cierto cariz optimista, han despertado el fervor industrial pero también la crítica moral y política de las implicaciones planetarias de esta nueva herramienta.

El análisis de las necesidades de la biología sintética ha de tomarse con gran interés por aquellos que pretenden crear una naturaleza digital. Mientras que en el campo digital se trabaja por descubrir y construir los procesos naturales, la biología sintética trata de aislar, sintetizar e identificar esos procesos ya existentes. Dos posiciones opuestas que buscan un punto central que permita el dominio de las mismas para su ulterior aprovechamiento.

La biología sintética busca en última estancia construir desde cero: varios investigadores han formulado que el número mínimo de genes necesarios para que una célula viva independientemente está alrededor de 200⁴⁵², descendiendo incluso hasta los 151 en el caso de Foster y Church⁴⁵³. No obstante, el genoma conocido del organismo más pequeño es el del *Mycoplasma genitalium*, y contiene 482 genes. Parece ser que todo genoma lleva consigo una cierta carga de redundancia⁴⁵⁴ y que este podría ser reducido hasta 382 totalmente necesarios para conservar la vida. El científico Endy⁴⁵⁵ proporciona unas necesidades mínimas para llevar a cabo el construir biológico y la motivación de la biología sintética por crear un abanico de herramientas -piezas- que puedan ser combinables.

- La existencia de un set limitado de materiales.
- Un set de reglas que expliquen la posibilidad de combinación de los anteriores materiales.
- Una comunidad capaz de aplicar los dos puntos anteriores.

No obstante, Endy menciona una confortable ilusión de control-ingeniería sobre los procesos biológicos, pero concede que hasta ahora no ha habido

⁴⁴⁹ "SolarLeaf - bioreactor façade." Arup. Consultada 6 de marzo, 2016. <http://www.arup.com/projects/solarleaf>

⁴⁵⁰ Corral, Miguel. "El padre del genoma humano, Craig Venter, crea por primera vez una célula artificial." *El Mundo*. Consultada 31 de mayo, 2010. <http://www.elmundo.es/elmundo/2010/05/19/ciencia/1274289593.html>

⁴⁵¹ Stockton, Nick. "How it's possible for a baby to have three parents." *Wired*. Consultada 29 de abril, 2015. http://www.wired.com/2015/02/baby-two-mommies-daddy-cool/?mbid=social_twitter

⁴⁵² Mushegian, A., Koonin, E. "A minimal gene set for cellular life derived by comparison of complete bacterial genomes". *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA* 93, 1996. pp. 10268-10273.

⁴⁵³ Foster, A., Church, G. "Toward synthesis of a minimal cell". *Molecular Systems Biology* 2, 2006. pp. 1-10.

⁴⁵⁴ Uno de los mecanismos necesarios para la evolución mencionados previamente.

⁴⁵⁵ Endy, D. "Foundations for engineering biology." *Nature* 409, 2001. pp.391-395.

prueba de ese proceso directo y advierte: “it is possible that the designs of natural biological systems are not optimized by evolution for the purposes of human understanding and engineering”. Un cierto nivel de simplificación es necesario para su comprensión y futura re-aplicación.

Ante la evidencia de que la situación del programador y el biólogo es diametralmente opuesta: el biólogo tiene un puzle completo del cual trata de distinguir las piezas, el programador tiene conocimiento de esas piezas pero no sabe cómo combinarlas o cual será la imagen final; el lector advertirá que el modelado algorítmico visual ya dispone de los tres anteriores: un set limitado definido por los componentes de GH agrupados en diferentes temáticas, un proceso de interacción a través de estructuras de información (paths, trees, or branches) que combina los componentes, y un foro con masa crítica suficiente como para producir nuevos contenidos a raíz de los dos primeros.**

Afortunadamente, estos también parecen cumplir la mayoría de los puntos destacados por la bióloga Laura Nuño de la Rosa⁴⁵⁶ recopilados a continuación:

- Campos de investigación:
 - El origen de la vida y el diseño de protocélulas.
 - La construcción y separación de paquetes funcionales (también llamados bio-bricks⁴⁵⁷)
 - Ingeniería celular basada en el control del genoma.
- Objetivos:
 - Estandarización y repetición de elementos iguales que sean usables en diferentes situaciones.
 - El desacoplamiento. Las piezas tienen que estar bien definidos y separados.
 - Distintos niveles de abstracción para poder operar en la complejidad del sistema.

De nuevo, ya sea a través de las células autómatas u otros procesos, el campo digital parece cumplir todos los requisitos que la biología sintética requiere y por lo tanto está totalmente preparado para desempeñar dicha tarea a través de sí mismo o ayudando a la parte biológica a cumplir los requisitos mencionados.

En la actualidad, la biología sintética ya ha demostrado su potencial -que no viabilidad- a través de proyectos como una variedad de levadura capaz de curar la malaria⁴⁵⁸. Sin embargo la cantidad de tiempo invertida y el costo son astronómicos. La dificultad de alterar los genes y sus redes son enormes y los resultados inesperados. Por eso, una gran parte de la comunidad de genetista trata de aislar y utilizar librerías de genes (paquetes de genes que se

⁴⁵⁶ Nuño, Laura. “La industria de la vida: implicaciones filosóficas de la biología sintética.” *Youtube*. Consultada 6 de marzo, 2015. <https://www.youtube.com/watch?v=koJj80MEiow>

⁴⁵⁷ ‘Bio-bricks foundation’ aspira a crear una librería de bloques genéticos a los que se le asocian funciones específicas. <http://biobricks.org/>

⁴⁵⁸ Geddes, Linda. “Synthetic yeast to brew up vital malaria drug.” *Scientist*. Consultada 27 de junio, 2008. <https://www.newscientist.com/article/dn14059-synthetic-yeast-to-brew-up-vital-malaria-drug/>

comportan de una manera determinada y cuyos resultados ya conocen) para introducirlas en diferentes situaciones a modo de herramientas.

Con todo, otra aproximación es posible: dejar que la evolución haga el trabajo duro:

Say hello to the evolution machine. It can achieve in days what takes genetic engineers years. So far it is just a prototype, but if its proponents are to be believed, future versions could revolutionize biology, allowing us to evolve new organisms or rewrite whole genomes with ease. It might even transform humanity itself⁴⁵⁹. BEGLE Y SHARON

George Church, genetista en Harvard Medical School, Boston, ha creado una máquina que evoluciona organismos a una escala y velocidad sin precedentes. Si el proceso de generar mutaciones no es nada nuevo, esta máquina tiene la capacidad de localizar los genes que afectan a los fenotipos. Peter Carr, uno de sus compañeros, lo califica de “highly directed evolution”.

It is a strange combination of clumsiness and beauty. Sitting on a cheap-looking worktop is a motley ensemble of flasks, trays and tubes squeezed onto a home-made frame. Arrays of empty pipette tips wait expectantly. Bunches of black and grey wires adorn its corners. On the top, robotic arms slide purposefully back and forth along metal tracks, dropping liquids from one compartment to another in an intricately choreographed dance. Inside, bacteria are shunted through slim plastic tubes, and alternately coddled, chilled and electrocuted. The whole assembly is about a meter and a half across, and controlled by an ordinary computer⁴⁶⁰. PETER CARR

Las aportaciones de la computación siguen siendo igualmente de una importancia capital en el desarrollo de la biología sintética: la lectura e interpretación del ADN supone en la actualidad uno de los grandes impedimentos en el desarrollo de esta rama. Se puede leer y cuantificar, se puede copiar y consultar, se entienden sus partes, pero no se comprenden sus organizaciones, de la misma forma que puedes mirar un patrón pero no entender las leyes que lo rigen. Las micromatrices de ADN son una colección de puntos de ADN microscópicos sujetos a una superficie sólida formando una matriz. Cada uno de esos puntos permite monitorizar patrones de expresión de múltiples genes simultáneamente. Sin embargo, para conseguir aprovechar estas tecnologías se necesitan nuevas maneras de interpretar la información⁴⁶¹. Inferir redes genéticas es uno de los caminos más prometedores que se utilizan para extraer información de voluminosas cantidades de datos. Este sistema permite a los biólogos formular hipótesis y facilitar el

⁴⁵⁹ Begley, Sharon. “George Church has a wild idea to upend evolution.” *STAT*. Consultada 28 de mayo, 2016. <https://www.statnews.com/2016/05/16/george-church-profile/>

⁴⁶⁰ Ídem.

⁴⁶¹ Kimura, Shuhei. “Inference of Genetic Networks Using an Evolutionary Algorithm” Hingston, Philip F., Luigi C. Barone, y Zbigniew Michalewicz. *Design by Evolution: Advances in Evolutionary Design*. Berlín: Springer, 2008. pp. 31-51.

diseño de los experimentos. De estos modelos⁴⁶², el ‘boolean⁴⁶³ network’ es uno de los más abstractos, y por su simplicidad uno de los más efectivos. El modelo booleano clasifica los genes en dos situaciones ON (se expresa) y OFF (no se expresa) para luego aplicar operaciones booleanas entre ellos. La contraparte de un sistema tan ligero es que no tiene en cuenta la relación de continuidad entre los genes, un problema a tener en cuenta a sabiendas de que el orden y la relación entre los genes pueden alterar el resultado. No obstante, este modelo es uno de los más idóneos por sus semejanzas con las lógicas informático-matemáticas que son utilizadas por la computadora y más sencillos de entender desde la perspectiva geométrica que la arquitectura pudiese necesitar. Durante los experimentos prácticos utilizaremos el modelo como metodología evolutiva fuera del propio software evolutivo, permitiendo mayor detalle y control de los procesos de diseño.

Harry Wang, discípulo de George Church, ha realizado el primer experimento de maquina evolutiva⁴⁶⁴. En tres días logró mejores resultados que toda la industria biosintética en años. Church llama a esta estrategia MAGE (Multiplex automated genome engineering) y espera que estas máquinas sustituyan las secuenciadoras de ADN.

You don't have to know what the answer is. You can let the cell find the solution for you⁴⁶⁵. HARRY WANG

Estos avances de increíble complejidad en el área genética y biológica resultan por contra mucho más fáciles de llevar a cabo desde el software digital donde los genotipos y los fenotipos están simplificados. Gracias a la informática, los valores de los resultados son fácilmente comparables, algo que en determinados casos de la genética puede resultar difícil de evaluar.

Sobre la arquitectura verdaderamente genética

Para aquellos más valientes y que vislumbran una arquitectura verdaderamente biológica, el ‘biolearning’ puede pecar de falso o excesivamente conceptual. Ya de por si este concepto se ha impuesto paulatinamente al de ‘biomimicry’, que aún parece denotar más ese sentimiento de copia, de plagio, de falta de autenticidad. Inspirarse en la naturaleza no es hacer arquitectura viva.

Las decenas (si no cientos) de pabellones experimentales que desarrollan las universidades pocas veces son verdaderamente biológicos. La excepción más

⁴⁶² Kauffman, S. “Metabolic stability and epigénesis in randomly constructed genetic nets.” *Journal of Theoretical Biology*. 22, 1969. pp. 437-467.

⁴⁶³ Boole, George, I. Grattan-Guinness, y Gérard Bornet. *George Boole: Selected Manuscripts on Logic and Its Philosophy*. Basel: Birkhäuser Verlag, 1997.

⁴⁶⁴ Wang, Harris H et al. “Programming Cells by Multiplex Genome Engineering and Accelerated Evolution.” *Nature* 460, 2009. pp. 894–898.

⁴⁶⁵ Ídem.

notable y reciente puede ser uno de los últimos proyectos de Neri Oxman, desarrollada por gusanos de seda⁴⁶⁶. El resto rezuman procesos biológicos, como la estructura Voronoi del Times Eureka Pavilion, pero no cambian su naturaleza de su materia ni la forma en que son construidos. Por supuesto que su complejidad requiere nuevos métodos de fabricación, pero estos están más próximos a la tecnología CAD-CAM que a la misma biología.

You never change things by fighting the existing reality. To change something, build a new model that makes the existing model obsolete.
BUKMINSTER FULLER

La modificación y aprovechamiento de lo verdaderamente natural puede en origen darse de las siguientes maneras⁴⁶⁷:

1. Modificando el organismo manipulando el entorno. (un invernadero, una piscifactoría...)
2. Modificando el organismo directamente.
 - Método no-genético (top-down). Como la poda, esquejes y empeltes, selección de individuos o el cruce de especies.
 - Método genético. modificación genética, alteración del ADN.

Los sistemas vivos tienen la habilidad para perdurar, adaptarse a los cambios sin necesidad de predicciones. Traspasar las fronteras, descender a un nivel molecular, incidir en un diseño genético y en las cadenas de programación que después desarrollaran por sí solos elementos vivos, es como ven el futuro arquitectos como el Dr. Alberto T. Estévez, una arquitectura donde la integración de elementos vegetales y naturaleza misma se adapta a nuevos procesos arquitectónicos creadores⁴⁶⁸, no sólo de arquitectura, sino de un entorno orgánico con vida propia, tal como el arquitecto Michel Jodking establece en su utopía de la casa de habitar.

El mismo Estévez lo comenta en su ensayo sobre "Arquitecturas genéticas"⁴⁶⁹ y otros escritos como "Lo onírico en la arquitectura"⁴⁷⁰, donde existen imágenes de cuentos y visiones, de sueños populares como dibujos y mundos cinematográficos⁴⁷¹. Vivir en una hoja dentro de un árbol o debajo de cubierta verde; edificios cuyas paredes tienen texturas vegetales sin necesidad de ser pintadas; arquitecturas que provean elementos necesarios para la vida del hombre. Todo esto dejará de ser una utopía para convertirse en

⁴⁶⁶ Oxman, Neri. *Silk Pavilion*. MIT, 2013. Proyecto.

⁴⁶⁷ Armstrong, Rachel. *Living Architecture: How Synthetic Biology Can Remake Our Cities and Reshape Our Lives*. s. l.: TED Books, 2012. pos. 20-21.

⁴⁶⁸ Estévez, Alberto. "Nature and architecture." *Máster de Arquitectura Biodigital*. Barcelona: Enero, 2011. Conferencia.

⁴⁶⁹ Consúltase: Estévez, Alberto T., "Arquitecturas genéticas", *Genetic Architectures / Arquitecturas genéticas*, SITES Books / ESARQ-UIC, Santa Fe (USA) / Barcelona: 2003.

⁴⁷⁰ Consúltase: Estévez, Alberto T. *Reflejos: Cuentos Escuetos*. Barcelona: Ediciones Del Serbal, 1990.

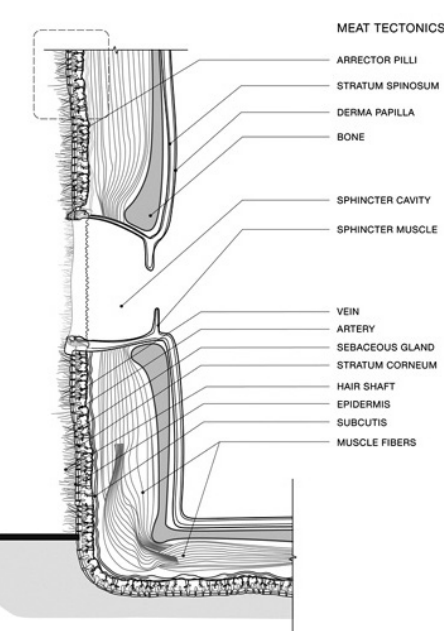
⁴⁷¹ Sendak, Maurice. *Where the wild things are*. Nueva York: Harper & Row, 1963. Esta obra presenta un bosque que crece en una habitación y, posteriormente en su versión cinematográfica, se muestran "casas de monstruos" en forma de esferas, muy similares a un nido.

nuevas realidades: en el año 2000 Estévez funda el grupo de investigación (Arquitecturas Genéticas) donde por primera vez en la historia arquitectos y genetistas colaboran en la creación de un nuevo paradigma arquitectónico.

“Arquitecturas genéticas” no sólo como metáfora. El ser humano debía conformarse con actuar limitado hasta la superficie de las cosas. Ahora ya puede descender más allá, a niveles de acción molecular, incidiendo en el diseño genético de las cadenas de programación que luego desarrollan por si solas elementos informáticos artificiales y elementos vivos naturales. ... El arquitecto sólo ha de proyectar el ADN generador de todo. Paredes y techos crecen de carne y piel reales. No se trata de construir en la naturaleza sino con la naturaleza, construir la naturaleza misma⁴⁷². ALBERTO T. ESTÉVEZ

A destacar, el Genetic Barcelona Project, 2003-actualidad, sobre la incorporación de bioluminiscencia ('green fluorescent protein') en el tejido vivo de limoneros para su implantación en lo urbano y doméstico⁴⁷³. El proyecto destaca por su potencial para cambiar el paisaje y habitat tal y como lo entendemos en la actualidad, así como un impacto sin precedentes en términos económicos y ecológicos (ahorro de electricidad y su producción)⁴⁷⁴.

029. /// Terraform One, *In vitro meat*, año desconocido. Dibujo del blog del autor: <http://www.archinode.com/arch.html>. Sección a través del hueco de la 'Meat House'.



A nivel arquitectónico, encontramos maquetas experimentales/propositivas hechas de células de cerdo, como la 'Meat House' de Terraform ONE, dónde destaca el detalle arquitectónico del hueco de la fachada, una extraña mezcla entre un libro de texto de biología y métodos constructivos⁴⁷⁵. O el pabellón-manifiesto de Mies por Estévez⁴⁷⁶, dónde la familiaridad de lo vegetal se ve sustituida por una propuesta carnosa, surrealista incluso. Expresiones tempranas de la imagen-manifiesto del mismo Estévez en contra de la caja miesiana, donde se muestra un feto dentro del útero materno: "the perfect home, or a house is not a box..."⁴⁷⁷

⁴⁷² Estévez, Alberto T. "El nuevo proyectar cibernético y el nuevo proyectar ecológico." en: Hippolyte, Pedro Luis., y Eduardo Miralles. *VI Congreso Iberoamericano De Gráfica Digital: Libro De Ponencias = Proceedings of the 6th Iberoamerican Congress of Digital Graphics, SIGraDi 2002*. Caracas: Ediciones Universidad Central De Venezuela, 2002. p. 10-13.

⁴⁷³ Estévez, Alberto T. (Investigador principal). Genetic Architectures. "Genetic Barcelona Project." 2007-2009. Consultada 6 de marzo, 2015. http://geneticarchitectures.weebly.com/research_group.html

⁴⁷⁴ Estévez, Alberto T. "Proyecto Barcelona Genética." *Metalocus*, nº 17. Madrid: otoño, 2005. pp. 162-165.

⁴⁷⁵ Terraform One. *In vitro meat*. Consultada 6 de marzo, 2015. <http://www.archinode.com/arch.html>

⁴⁷⁶ Estévez, Alberto T. (Investigador principal). Genetic Architectures. "Applying living tissues to architecture." 2007-2009. Consultada 6 de marzo, 2015. http://geneticarchitectures.weebly.com/research_group.html

⁴⁷⁷ Estévez, Alberto T., en AA.VV. *Arte, Arquitectura y Sociedad Digital*. Barcelona: Publicacions i Edicions Universitat de Barcelona, 2007. p. 1.

Protocélulas

A raíz de todo lo anterior, el ejemplo más próximo a una realidad factible en un corto periodo de tiempo es el uso de 'protocells'. Las protocélulas se hayan en ese compendio de características biológico-sintéticas, que permiten la programación de sus individuos para generar un sistema adaptable y generador de forma (para una mayor comprensión de las mismas cabe compararlas con el autómatas celular '-cellular automata'- descrito en el capítulo "La Nueva Ciencia de Stephen Wolfram" en esta misma tesis cap. 3.1.2). Las 'protocells' se hallan en el filo de la vida. No se consideran "vivas" porque no desempeñan todas sus funciones y básicamente se desarrollan únicamente por medios químicos. Ello podría contribuir favorablemente a la reticencia inicial de vivir en casas hechas de carne. Estas células, como cuasi cualquier otro proceso natural, se desarrolla mediante estrategias de bottom-up y pueden ser usadas en diseño de estrategias y metodologías que manipulen complejos contextos. Las protocélulas, pueden programarse y ello las posiciona como una de las mejores opciones para ocupar el espacio entre el mundo natural y el artificial (man-made-design). Estas estructuras biológicas no solo pueden inspirar nuevos métodos de construcción, sino constituir materiales completamente nuevos. Mientras que el ADN es gobernado por complejos sistemas de moléculas regulatorias, estas protocélulas son capaces de autoorganización espontánea a través de reacciones químicas. Producen emergencia como expresión de su contexto⁴⁷⁸. Algunos de los experimentos realizados con la programación de las protocélulas han producido resultados muy similares a los descritos por Alan Turing en 1952 acerca de la morfogénesis. Lamentablemente, la tecnología para programar las protocélulas no será accesible hasta en un periodo de diez años aproximadamente, al igual que otros ejemplos de materiales autorreparables.

Las protocélulas se desarrollan en medios acuosos (agua o aceite habitualmente) y pueden exhibir mutuo reconocimiento y establecer relaciones químicas ("conversaciones") entre ellas, así como mostrar comportamientos en grupo o poblaciones. Frente a una célula animal corriente (10 micrómetros) las protocélulas son visibles a simple vista y pueden alcanzar varios cientos de micrómetros. Su esperanza de vida es de minutos a meses, aspecto que contribuye a una regeneración constante, a un factor de autoreparación. Este continuo reconstruir crea un lazo más fuerte con el entorno, reorganizándose en base al contexto a través del tiempo y el espacio y generando complejas cartografías que integren los espacios, ya sean artificiales o naturales. Además, pueden tener un impacto más positivo, pudiendo ser programadas para filtrar la contaminación o recoger agua.

La necesidad de las protocélulas de actividad humana para propagarse (que mantenga su medio, cuide su hábitat) puede estar ligado a su vez con procesos cibernéticos y responsivos que afecten al crecimiento de las protocélulas tal y como ocurre en la instalación del pabellón canadiense: Hylozoic Ground, de Philip Beesley (2010). Una maraña de sistemas interconectados (eléctricos,

⁴⁷⁸ Armstrong, Rachel. *Living Architecture: How Synthetic Biology Can Remake Our Cities and Reshape Our Lives*. s. l.: TED Books, 2012. pos. 263.

químicos y sensoriales) dota de proto-vida y direcciona un espacio que interactúa con su entorno. Otra de las propuestas más significativas respecto a este tipo de células es el proyecto para colonizar los delicados cimientos de la ciudad de Venecia expuesto por Rachael Armstrong y Neil Spiller⁴⁷⁹. En él, las protocélulas refuerzan y reparan la maltrecha madera que, ulteriormente, será completamente sustituida por las estructuras auto replicables. El crecimiento de las protocélulas resulta pues responsivo y adaptativo a su contexto y actividad, consciente de su entorno, inteligente.

030. /// Hylozoic Ground, de Philip Beesley (arriba) y 'Future Venecia', de Rachael Armstrong (abajo). Foto e imagen extraída de: Spiller, Neil, y Rachel Armstrong, 2011.



Las protocélulas son a día de hoy el ejemplo “vivo” más próximo a ser moldeado y codificado de la misma manera en que programamos las células-automatas en nuestros ordenadores.

⁴⁷⁹ Spiller, Neil, y Rachel Armstrong. *Protocell Architecture*. Londres: Wiley, 2011.





3. PROCESOS DE EMERGENCIA

Se ha tratado deliberadamente de omitir los temas relacionados con el crecimiento y desarrollo de la forma durante los apartados anteriores con la intención de abordarlos por separado y con mayor profundidad. Tal y como se menciona en los objetivos de la tesis, los experimentos y desarrollo de la tesis versarán sobre la analogía digital de estos procesos.

El desarrollo de la tesis abandona de manera momentánea el ámbito de la arquitectura para profundizar en el de la biología (Evo-Devo) y el modelado digital (AAD) para la aplicación de la primera. Como se explicó en la metodología, los posteriores experimentos prácticos apoyados sobre el plugin Grasshopper y otros muchos add-ons tratarán de establecer un puente asociativo entre los mencionados ámbitos y la arquitectura. Es por eso motivo que las referencias en esta parte de la tesis estarán más alejadas del diseño y las ideas originales sobre las que están basadas son de carácter más abstracto. Ello no implica que puntualmente se acuda a ejemplos -ya sean industriales, gráficos o arquitectónicos- para una mejor comprensión y explicación de los conceptos.

Los sucesivos capítulos recogen tres temáticas:

- La emergencia como proceso clave, abstracto, que se da en todos los ámbitos y escalas (ya sean computacionales o naturales). Tres personajes estructurarán los subapartados de este punto: Alan Turing, Stephen Wolfram y Karl S. Chu.
- La descripción y análisis exhaustivo de la ciencia Evo-Devo en sus dos vertientes biológicas: evolución y desarrollo (ejemplo de expresión de la emergencia en el ámbito biológico). Para ello se han unificado los descubrimientos aportados por Armand Marie Leroi y Sean B. Carroll
- El estudio de la abstracción de la ciencia Evo-Devo a través de lo computacional, su aplicación en el ámbito del diseño y las consideraciones sobre su uso. Cobra especial atención los trabajos del arquitecto John Frazer y las valoraciones de David Rutten sobre el estado actual de los algoritmos evolutivos.

3.1. Emergencia y sistemas complejos

Process is more important than outcome. When the outcome drives the process we will only ever go to where we've already been. If process drives outcome we may not know where we're going, but we will know we want to be there⁴⁸⁰. BRUCE MAU

Hasta este punto, la tesis ha descrito el contexto, las ideologías, y las herramientas que han puesto en vigor el alza de lo digital y lo biológico, de qué papel formula la naturaleza y en que puede derivar, de cómo lo paramétrico puede influenciar a la arquitectura... En este capítulo se tratará de aunar esos valores bajo un único concepto que pueda ponerlos en común y regir a todos ellos: la emergencia.

La emergencia hace referencia a las propiedades y procesos de sistemas no reductibles a las partes que lo componen: “el todo, es más que la suma de las partes”. La emergencia es la causante de que la propia humanidad haya desarrollado herramientas capaces de crear nuevas emergencias, de que lo digital pueda imitar lo biológico, de que la arquitectura pueda adaptarse a un nuevo nivel de complejidad. La emergencia es la culpable de lo complejo y de los sistemas que la rigen.** Un sistema complejo se da cuando la suma de sus partes o sus reglas iniciales crean nuevos niveles jerárquicos que no estaban implícitos de manera individual. Estos sistemas complejos han dado lugar a la ‘Complexity science’ o ‘systems science’, ciencias que responden al estudio de los sistemas, en lugar de los objetos, que consideran el mundo físico como un conjunto de redes interconectadas, donde las conexiones y los vínculos se rompen y reparan constantemente.

Un sistema complejo abarca muchas partes interactivas con la habilidad de generar un nuevo tipo de comportamiento colectivo a una macroescala. La formación espontánea de estos comportamientos se aprecia con frecuencia en muchos elementos de la vida real: el clima, la emisión de luces, sistemas químicos, redes biológicas, terremotos, el cerebro humano, e incluso las dinámicas del mercado⁴⁸¹. Conceptualmente implican una serie de palabras claves, muchas de las cuales se han mencionado o se mencionarán a lo largo de la tesis por su proximidad al tema tratado: autoorganización, dinámicas, caos, células autómatas, algoritmos genéticos...

Un sistema, por definición, alberga más información de la necesaria -información redundante- con tal de añadir fuerza y cohesión al conjunto. Una cantidad de datos excesivamente optimizada (reducida al límite) debilita la red y puede producir colapsos encadenados. Las redes confieren robustez y estabilidad al sistema, por su flexibilidad y capacidad para adaptarse a posteriori -incluso ante un cambio o daño significativo-. Son la máxima

⁴⁸⁰ Mau, Bruce. *An Incomplete Manifesto for Growth*. S.l.: Combination Press, 2001.

⁴⁸¹ Doursat René, Hiroki Sayama, y Olivier Michel. *Morphogenetic Engineering: toward Programmable Complex Systems*. Heidelberg: Springer, 2012.

expresión de la eficiencia, no de la optimización. Por ser esta tipología organizadora contenedora de partes, normalmente se le asocia la capacidad de crear y multiplicar las mismas, implicando con ello la capacidad de crecer y desarrollarse, características consabidas de la naturaleza. Al contrario que el sistema prediseñado del siglo XX, el crecimiento guiado ('guided growth') abraza la complejidad y la indeterminación de un sistema. El crecimiento guiado se centra en el proceso como principio. Al depender de su entorno, el resultado puede ser parcialmente impredecible. Esto permite un cierto grado de aleatoriedad en el diseño final y resulta especialmente adecuada cuando lo "hecho" y lo "nacido" se encuentran.

Puede parecer muy futurístico, pero estos métodos "bottom-up" dónde no hay una forma final, prediseñada, sino un sistema de reglas que crece y se adapta progresivamente, es el método habitual que utiliza la naturaleza en la mayoría de sus procesos de crecimiento: plantas, bacterias, cristales, ríos...⁴⁸² En este capítulo se tratarán las ideas de tres personajes para desarrollar y profundizar conceptualmente en los aspectos de la emergencia, los cuales comienzan a arrojar luz sobre el ulterior estudio de la ciencia Evo-Devo.

3.1.1. La Morfogénesis de Alan Turing

A pesar de no ser biólogo ni químico, el único 'paper'⁴⁸³ que Alan Turing publicó en 1952 (cerca del descubrimiento del ADN) sobre esta temática tuvo un impacto considerable en ambos campos. 'The chemical basis of morphogenesis' versa sobre la formación espontánea de patrones en sistemas sometidos a reacción y difusión⁴⁸⁴. Intrigado por el desarrollo del embrión, Turing vislumbró un modelo matemático que explicaba como fluctuaciones aleatorias podían conducir a la emergencia de patrones y estructuras desde una uniformidad inicial. Esta aparición espontánea de patrones y formas ocurre en muchos procesos naturales, y algunos de artificiales. Dichas formaciones se deben a mecanismos muy sencillos, generalistas, lo cual propicia su versatilidad y que aparezca en sistemas que aparentemente tienen nada en común, como las líneas del desierto o las rayas de las cebras⁴⁸⁵. A día de hoy, todavía se descubren sucesos que son explicados mediante la teoría de

⁴⁸² Sterling, Bruce, "Guided Growth", Mensvoort, Koert van., y Hendrik-Jan Grievink. *Next Nature*. Amsterdam: Next Nature Network, 2011. p.161.

⁴⁸³ Turing, Alan Mathison. *The Chemical Basis of Morphogenesis*. Londres: Publ. for the Royal Society by Cambridge UP, 1952. Consultada 6 de marzo, 2015. <http://www.dna.caltech.edu/courses/cs191/paperscs191/turing.pdf>

⁴⁸⁴ Los sistemas de reacción-difusión son modelos matemáticos que describen cómo una o más sustancias distribuidas en el espacio cambian bajo la influencia de dos procesos: reacciones químicas locales en las que las sustancias se transforman las unas en las otras, y difusión, que provoca que las sustancias se expandan en el espacio. El resultado de este proceso es una configuración estable en la que la composición química es no uniforme en un dominio espacial.

⁴⁸⁵ Arney, Kart. "Cómo consiguieron las cebras sus rayas? Gracias a Alan Turing." *Materia*. Consultada 31 de Octubre, 2014. <http://esmateria.com/2014/08/23/como-consiguieron-las-cebras-sus-rayas-gracias-alan-turing/>

Turing, que sigue resolviendo los puzles de la naturaleza.

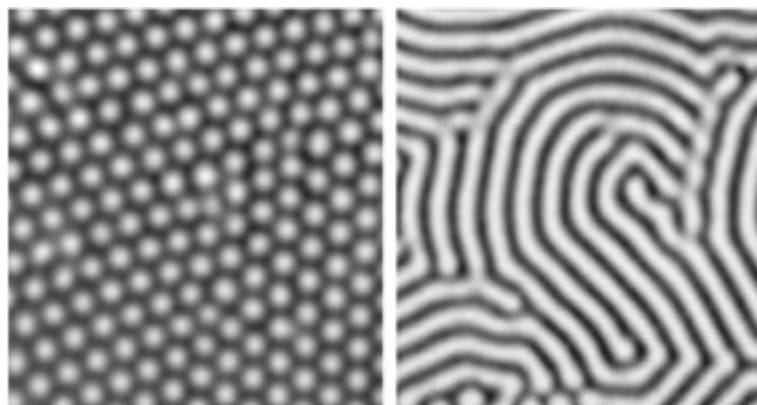
Turing mostraba como las reacciones químicas, bajo una mezcla de ingredientes específicos, podían separarse en patrones cuasi-ordenados. Como se menciona, el interés de Turing comienza intrigado por la formación de los embriones⁴⁸⁶, de la ruptura de la uniformidad en lo diferenciado, de la morfogénesis, del desarrollo. Lo que Turing consideraba ‘morphogens’ es conocido a día de hoy como sistemas de reacción-difusión. Él adjudicaba la distribución de las formas, el orden de las plantas -fitotaxis- y la organización de los patrones a estas reacciones. Como tal, su importancia en el campo de la biología era sustancial, no obstante, algunos de los casos mencionados en el artículo de Turing han sido demostrados como falsos, ya que se basan en mecanismos proteicos y no químicos.

En 1972, los biólogos Hans Meinhardt y Alfred Gierer formalizaron su propia teoría sobre los patrones biológicos desconociendo el trabajo de Turing. En él se describe un componente “activador” y otro “inhibidor” que se alternan formando patrones de la misma manera que Turing describía. Durante una de las revisiones de su trabajo se apuntará a la existencia del trabajo de Turing, cuyas ecuaciones replicaban el trabajo de los biólogos. Los cálculos computacionales revelaron que había básicamente dos tipos de esquemas: puntos y rayas, los cuales debidos a las imperfecciones no eran capaces de representar distribuciones perfectas. Viendo estos dos esquemas se entiende porque Turing pensó que eran buenos candidatos para describir las manchas de los leopardos o las rayas de las imágenes⁴⁸⁷.

031. /// Philip Ball, 2012. Patrones de Turing que muestran esquemas de puntos y líneas.

Paralelamente y contemporáneo a la investigación de Turing, otro experimento evidenciaba los patrones espaciales como efecto de combinación y reacciones químicas: el químico Boris Belousov descubrió por casualidad una mezcla que oscilaba entre dos estados, aparentemente violando la segunda ley de la termodinámica. Por desgracia su investigación fue desacreditada, y no sería hasta los años 60 cuando Anatoly Zhabotinsky se interesó por ellas y retomó el tema. Dichas

oscilaciones eran consecuencia de un balance casi perfecto entre los dos reactivos, de nuevo, a razón del proceso de reacción-difusión, y si la mezcla fuese aplicada de manera asimétrica encadenaría una serie de pulsos/olas que supondrían de nuevo la emergencia de patrones. Estas ondas no estaban consideradas por Turing, pero el principio de reacción-difusión sigue siendo el mismo. A principios de los años 70, De Kepper trabajará con estos sistemas



⁴⁸⁶ Turing apodó esta teoría como “teoría matemática de la embriología”.

⁴⁸⁷ Ball, Philip. “Turing Patterns” *Chemistry World*. Consultada 28 de mayo, 2012. <http://www.rsc.org/chemistryworld/2012/05/turing-patterns>

para lograr continuas oscilaciones químicas manteniéndose alejado del equilibrio termodinámico.

No fue hasta 1990 cuando se descubrió en un laboratorio uno de los patrones que Turing había predicho: las rosetas de un jaguar. Con este evento comienza una sucesión de descubrimientos que identifican determinados genes en miembros biológicos que son responsables de las expresiones geométricas en forma de patrones biológicos⁴⁸⁸.

032. /// Philip Ball, 2015. Patrón como resultado de las reacciones con gran semejanza a las rosetas de jaguar.



Llegados a este punto es más que obvio que los patrones de Turing se dan en lo biológico, hecho que se enfatizará a lo largo de la tesis a medida que se profundiza en genética y los autómatas celulares ('cellular automata'). Sin embargo no es ahí dónde termina su aplicación, que se extiende desde lo físico hasta lo social.

Cualquier lector reconocerá una cierta similitud entre las ondas de la arena y las rayas de una cebra. Meinhardt sugiere que este hecho no es una coincidencia y que los propios montículos de arena funcionan como activadores-inhibidores: a medida que el montículo crece recoge más arena del aire, al mismo tiempo que priva al siguiente de la misma. El balance entre estos dos procesos establece una constante, una distancia media entre todos los montículos. Se han encontrado evidencias de otros procesos reproducen patrones similares: la distribución de plankton, los cementerios de hormigas, e incluso zonas de alta criminalidad en ciudades... Estos hechos refuerzan una vez más la idea de estas reglas universales y su aplicación a cualquier ámbito.

Es posible describir estos comportamientos a través de software morfo-dinámico (de partículas o 'swarm'/enjambre) con resultados no lineales, más en concreto, como simulaciones de un medio excitable. Los medios excitables se distinguen por un tiempo de refracción el cual restringe el comportamiento de los agentes. En el ejemplo de Morphocode⁴⁸⁹ (desarrolladores del plug-in Rabbit para GH), se crean olas que no puede retornar a un mismo punto hasta que cierta cantidad de tiempo ha pasado. Un incendio exhibe este mismo comportamiento: el fuego no puede volver a quemar una zona hasta que la vegetación no ha vuelto a crecer. El próximo capítulo explicará que las reglas del sistema de partículas y su posición original puede llegar a generar los patrones de Turing.

⁴⁸⁸ Ball, Philip. "Forging Patterns and Making Waves from Biology to Geology: A Commentary on Turing (1952) 'The Chemical Basis of Morphogenesis.'" *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* n. 370. 2015.

⁴⁸⁹ Morphocode. "CA. Excitable Media with Rabbit." Noviembre, 2014. <http://morphocode.com/excitable-media-with-rabbit/>

3.1.2. La “Nueva ciencia” de Stephen Wolfram

*What was mere noise and disorder or distraction before, becomes pattern and sense; information has been metabolized out of noise*⁴⁹⁰.
WM BRODEY

El discurso de Stephen Wolfram⁴⁹¹ comienza defendiendo que la ciencia y matemáticas actuales no parecen explicar el modelo de emergencia, cómo crecen y se expanden las formas. Las plantas, las nubes, el cosmos... ¿cómo emerge el universo? Como resultado de sus investigaciones iniciadas en 1980, publica el controvertido libro ‘A New Kind of Science’⁴⁹² (un nuevo tipo de ciencia) en el año 2002, que contiene un estudio empírico basado en tests y experimentos. Estos tests se llevan a cabo a través de sistemas computacionales sencillos o “programas simples”, siendo el más famoso el autómata celular. Algunos de ellos demuestran o dan lugar a lo que parece ser “verdadera emergencia”.

Durante un sencillo experimento desarrollado a través de un proceso de células autómatas donde la computadora es capaz de seguir unas reglas a través de las cuales interactúan dichas células, Wolfram estudia las posibles combinaciones del autómata celular (256 en el caso de los unidimensionales) y los distintos resultados a los que dan lugar. El autómata celular es una clase de poliautómata⁴⁹³, uno de los procesos más simples y archiconocidos a nivel computacional por la “simpleza” de sus reglas. Este sistema consiste en matrices regulares de células en 1, 2 o 3 dimensiones. Los casos más simples normalmente proveen con dos estados a las células: viva o muerta, vacío o llena, blanca o negra... Es necesario establecer reglas que analicen la relación con sus vecinas y determinen el estado de la próxima célula. Estas reglas son aleatorias (pero siempre constantes) y pueden afectar a diferentes números de células. Dichas reglas analizan en un pulso continuo e instantáneo el estado de todas las células y determinan la siguiente operación. Las reglas son por tanto locales y “ciegas” a lo que ocurre más allá de dos o tres celdas. El concepto autómata celular fue descubierto en 1940 por Stanislaw Ulam y John von Neumann, pero no será hasta 1970 cuando el ‘Conway’s Game of Life’ -una versión bidimensional- popularizará su funcionamiento más allá de la academia.

The behaviour of a cellular automaton is defined thus by E.F. Codd (restating Von Neumann): “The state of a cell at time t+1 is uniquely

⁴⁹⁰ Brodey, WM. y Lindgren, N., *Soft architecture: the design of intelligent environments*, 1967.

⁴⁹¹ Científico británico conocido por su trabajo en las ciencias de la computación. Descrito como un niño prodigio, ha disfrutado de numerosas becas y premios a lo largo de su vida.

⁴⁹² Wolfram, Stephen. *A New Kind of Science*. Champaign, IL: Wolfram Media, 2002. Disponible online gratis. Consultada 9 de abril, 2015. <https://www.wolframscience.com/nksonline/toc.html>

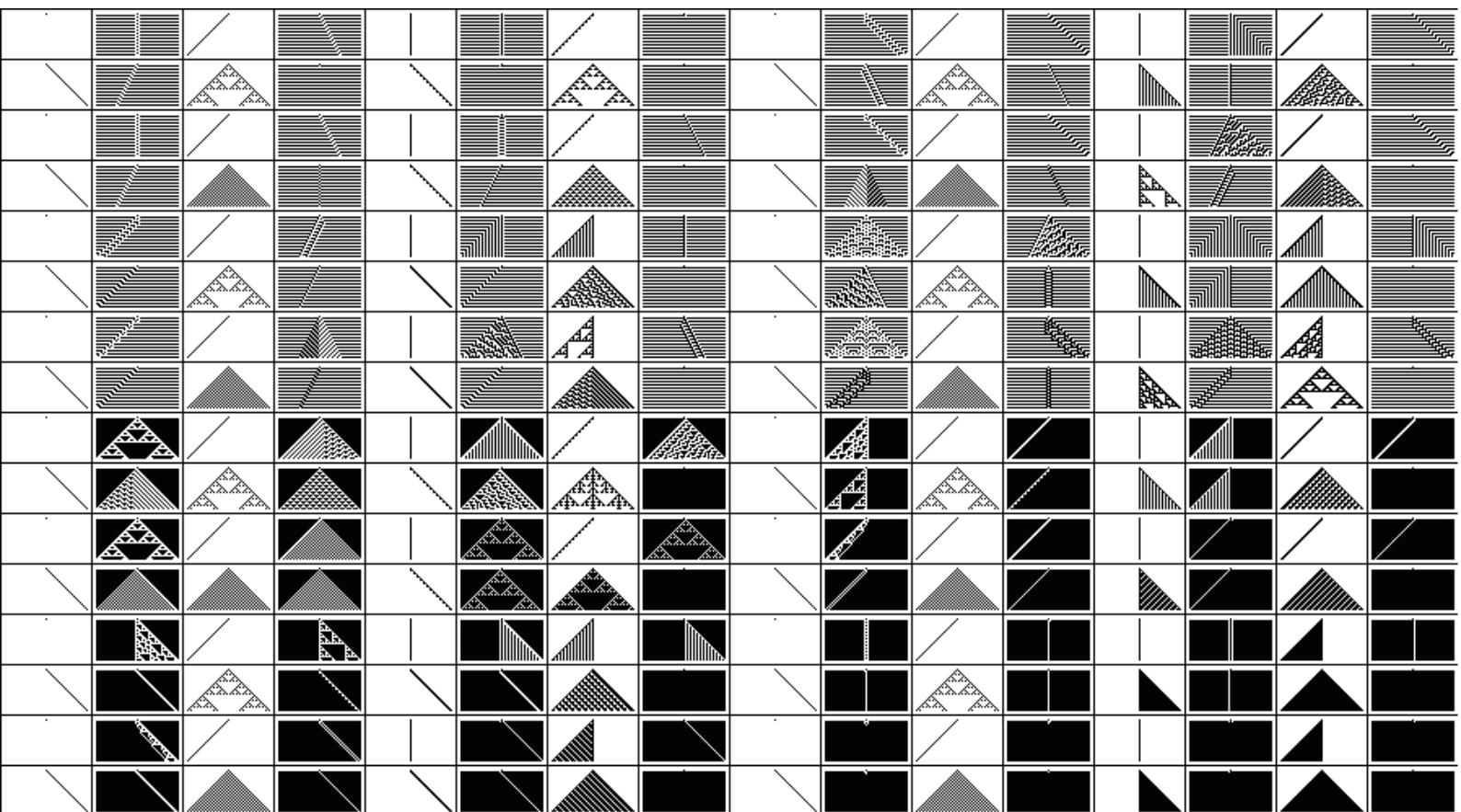
⁴⁹³ Lindenmayer, Aristid, y Grzegorz Rozenberg. *Automata, Languages, Development*. Ámsterdam: North-Holland Pub. Co., 1976.

determined by its neighborhood of any cell includes the cell itself⁴⁹⁴.
JOHN HORTON CONWAY

A priori, consideró que basándose en sencillas reglas de proximidad el resultado serían patrones repetitivos y homogéneos. Durante las primeras combinaciones así ocurre, aunque los resultados comienzan a mostrar cosas curiosas como fractales u otros ritmos de patrones. En el pack de reglas #30 aparece por primera vez lo que podría ser considerado como un patrón a-periódico⁴⁹⁵. De todos los intentos por procesar durante el máximo número de pasos este patrón y analizarlo con el fin de encontrar una periodicidad, ninguno dará resultado. Las reglas #30 parecen ser un ejemplo creador de caos, de emergencia, de cosas siempre nuevas en constante evolución⁴⁹⁶.

And actually we've been using essentially this sequence to make random integers in Mathematica for the past 16 years. and it's passed zillions of tests—even while many other proposed pseudorandom generators have failed⁴⁹⁷. STEPHEN WOLFRAM

033. /// Stephen Wolfram, p. 175. Tabla con las 256 celular automata.



⁴⁹⁴ Consúltese: Stadler, Peter F. *Special Issue on Applications of Cellular Automata in Complex Systems*. Singapore: World Scientific, 2002.

⁴⁹⁵ Wolfram clasificará los patrones en homogéneos, periódicos, a-periódicos (random).

⁴⁹⁶ Wolfram, Stephen. "A new kind of science and the future of mathematics." Consultada 11 de enero, 2004. <http://www.stephenwolfram.com/publications/a-new-kind-of-science-future-mathematics/>

⁴⁹⁷ Wolfram, Stephen. *A New Kind of Science*. Champaign, IL: Wolfram Media, 2002. p. 30.

Lo ‘random’ o aleatorio es un aspecto de importancia notable en fundamentos matemáticos y computacionales, y a pesar de que es algo aparentemente presente y común en gran parte de la tecnología que nos rodea sus resultados no son tan aleatorios como puede parecer -son en realidad una simulación de lo aleatorio-. Las secuencias de números pseudo-aleatorios no muestran ningún patrón o regularidad aparente desde un punto de vista estadístico, a pesar de haber sido generadas por un algoritmo completamente determinista, en el que las mismas condiciones iniciales producen siempre el mismo resultado. Puede observarse a que se refiere Wolfram en esta entrada de Rutten en el blog de GH donde se menciona y muestran los resultados de diferentes motores de aleatoriedad⁴⁹⁸.

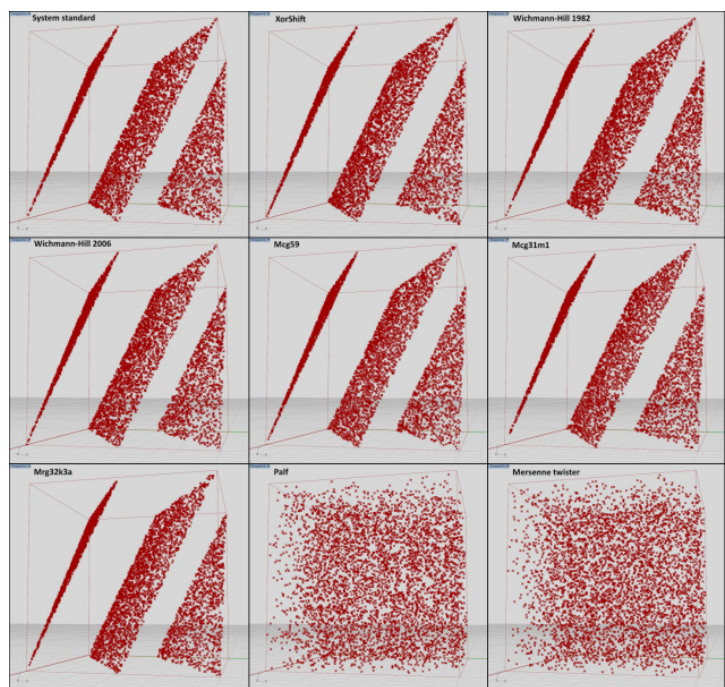
034. /// David Rutten, ‘random engine experiments’, 2014. Captura de pantalla con la expresión de diferentes motores de aleatoriedad.

Como se verá más adelante, lo aleatorio juega un papel crucial en el desarrollo de lo natural, pero puede presentar problemas en el desarrollo evolutivo de los algoritmos. Un número pseudo-aleatorio es un número generado en un proceso que parece producir números al azar, pero no lo hace realmente.

*There is no such a thing as randomness,
just lack of information. BARUCH SPINOZA*

Con esta cita, el filósofo Spinoza suscita la comprensión humana hacia los patrones. Apoyándonos en la teoría de Wolfram (lo aleatorio se produce como una consecuencia muy específica de reglas, provocando la “no repetición”) o la teoría del Caos (una cadena de sucesos “imprevisibles” pueden desembocar en cualquier suceso inesperado), los patrones aleatorios no son tal, sino que probablemente sean patrones a-periódicos que no somos capaces de discernir.

En 1957, Kolmogorov⁴⁹⁹ explica que la aleatoriedad pura (o caos) no puede comprimirse porque no tiene patrón, es decir, la información es tan grande como ella misma. En 1988 Max Plank⁵⁰⁰ propondría un sistema de unidades que define al tiempo, longitud, masa, carga eléctrica y temperatura en base a la constante de la velocidad de la luz (presuntamente limite no rebasable por



⁴⁹⁸ Rutten, David. “Random engine experiments.” *Grasshopper*. Consultada 29 de diciembre, 2014. http://www.Grasshopper3d.com/photo/random-engine-experiments?xg_source=activity

⁴⁹⁹ Fundador de la teoría de la complejidad algorítmica.

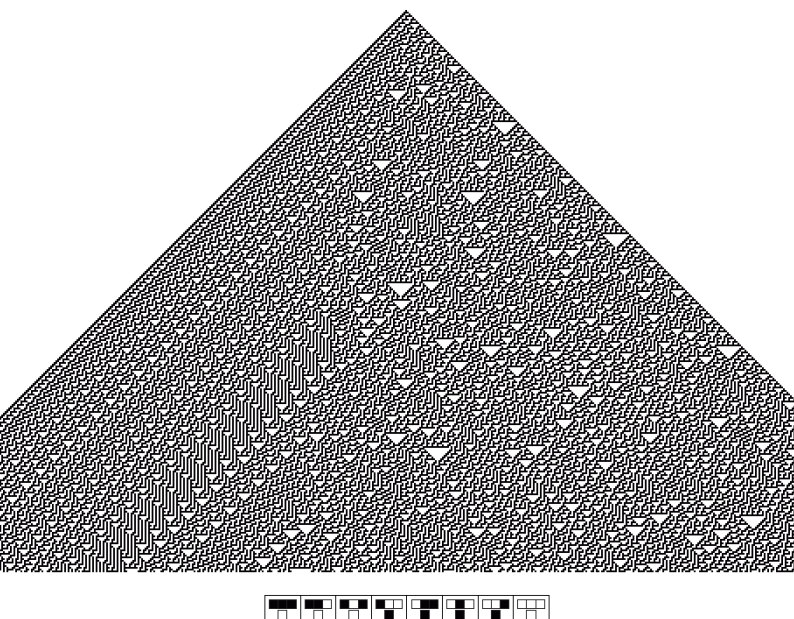
⁵⁰⁰ El uso de las unidades Plank elimina el problema del redondeo, facilitando la computación. Un Plank dimensional equivale a Plank 10-32. Las unidades Plank suelen llamarse de forma jocosa por los físicos como las “unidades de Dios”, porque elimina cualquier arbitrariedad antropocéntrica del sistema de unidades.

la física). Al igual que Wolfram, Seth Lloyd, también se une a la idea de que el universo es una gran computadora, en este caso una computadora cuántica que ejecuta un programa cósmico, y como tal, la cantidad de información crece con el tiempo. Lloyd teoriza que el comienzo del universo partió un solo bit y calcula que la cantidad de información hoy en día es de 10^{92} bits. Todas estas teorías hacen pensar que la idea de “infinito actual” pierde consistencia y que la imagen de una malla espacial universal sea más plausible.

A partir de ese punto, Wolfram descubre a lo largo de los 15 años que durará su investigación que además de la célula automática otros programas sencillos como la máquina de Turing, la sustitución secuencial, combinatorias, etc. pueden crear complejidades que, además! son reconocibles en la naturaleza. Sugiere con ello que la naturaleza “no es tan lista”, y que no le importa utilizar un pack de reglas u otro, simplemente los aplica y estos emergen. Si por algún caso alguno no funciona, las leyes de la evolución y la supervivencia se encargan de limpiar aquellos “patrones” no adecuados. Nosotros sin embargo, tratamos de visualizar el resultado final de los proyectos arquitectónicos, y luego buscamos el método para construirlos (bottom-up frente a top-down).

Con estos experimentos Wolfram descarta la idea de que lo azaroso o caótico se da por una infinidad de inputs externos imposibles de controlar y valorar. La reglas #30 se ejecutan sin ningún tipo de modificación externa y logran producir lo aleatorio por sí mismas. Esto también explicaría porque la naturaleza tiende a ser más compleja, de cómo pequeños seres unicelulares han cambiado en otros más ricos como el reino animal o vegetal. Así pues, con el tiempo y espacio suficiente, la máquina más simple del mundo⁵⁰¹ podría llegar a crear el universo.

035. /// Stephen Wolfram, p. 27. 'Rule' #30.



Wolfram clasifica los resultados de su investigación en los siguientes apartados (técnicas)⁵⁰²:

- Cellular Automata
- Fractals
- Nested patterns
- Simple Computational Systems
- Substitution Systems

Cualquiera de estas puede ser desarrollada a través de plug-ins o programas sencillos para ser aplicadas a la arquitectura (especialmente a través de Rabbit, plug-in de Morphocode que incorpora automatismos celulares y L-Systems). Por su simplicidad y abstracción, pueden ser

⁵⁰¹ Wolfram postula la máquina de Turing más pequeña.

⁵⁰² Wolfram. “Demonstrations Projects.” <http://demonstrations.wolfram.com/topic/html?topic=NKS+%2F+Wolfram+Science&limit=20>

insertadas en diferentes puntos del proyectar arquitectónico.

En un intento de dar solución a todo lo formulable, Wolfram atribuye al espacio continuo una red de puntos en una o más dimensiones (igual que los hacen los programas de mallas poligonales) como las moléculas de agua que separadas entre sí, definen un volumen homogéneo. El tiempo, la gravedad⁵⁰³ y otros valores se aplican en diferentes dimensiones. Incluso la cuestión sobre quien mueve la emergencia, cada uno de los pasos del crecimiento del patrón al mismo tiempo, como si de un reloj universal se tratase, queda asociado al proceso de la máquina de Turing y la cohesión de diferentes universos paralelos. Estas palabras difícilmente dejarán indiferente al lector. Si el universo es una gran máquina de procesar que crece paso por paso, produciendo complejidades a raíz de una reglas primigenias. ¿dónde queda el libre albedrío? Wolfram resuelve esta incógnita mediante la enunciación del Halting Problem⁵⁰⁴ o problema de la parada, en donde se estipula que nunca puede saberse si un programa acabara o no su proceso previamente a su propia ejecución. Es decir, aunque el futuro estuviese preestablecido no se podría “adivinar” con lo que nunca se sabría si habíamos ejecutado una acción diferente a la prevista.

Durante su investigación, y después de postular su nuevo tipo de ciencia donde cualquier proceso por complejo que sea es computable mediante elementos más sencillos, Wolfram desarrolla dos importantes piezas de software que pretenden alcanzar la categoría de universales. Primero, Mathematica, un potente cuyo objetivo final es el modelar, interpretar o analizar cualquier cosa existente y que fue usado para los experimentos llevados a cabo en el postulado de ‘A New Kind of Science’. Y más tarde WolframAlpha⁵⁰⁵ (‘computational knowledge engine’), un portal que pretende convertirse en algo a medio camino entre una calculadora y una enciclopedia, un punto que reúna todo el conocimiento y enlace cualquier término con el resto de campos existentes. Sin duda, el doctorando considera a Stephen Wolfram como un personaje merecedor de una atención especial e interesante para cualquier tema que aquí nos ocupase. Su aproximación hacia descubrimientos empíricos a través de la experimentación debe influir al arquitecto educado (o inspirado) por esta tesis.

El autómata celular también ha inspirado otro tipo de experimentos en diferentes campos, siendo de todos ellos el más famoso ‘The Life Game’ o ‘Conway’s Game of Life’⁵⁰⁶: John Horton Conway desarrolló este celular automata bidimensional de 2 estados en una rejilla rectangular que lograría sorprendentes propiedades. The Life Game, como su nombre indica, pretende simular un comportamiento ‘life-like’ (a pesar de que su propósito inicial

⁵⁰³ El espacio ya no se formula mediante tres dimensiones, sino que hay que añadir ecuaciones de curvatura según la teoría de relatividad de Einstein.

⁵⁰⁴ Alan Turing, en su famoso artículo “On Computable Numbers, with an Application to the *Entscheidungsproblem*” (1936), demostró que el problema de la parada de la Máquina de Turing es indecidible, en el sentido de que ninguna máquina de Turing lo puede resolver.

⁵⁰⁵ Wolframalpha. Consultada 9 de abril, 2015. www.wolframalpha.com

⁵⁰⁶ Desarrollado en el laboratorio matemático de Cambridge University, año1970.

era simplificar los procesos de maquina universal de Von Neumann). Von Neumann es otro de los miembros clave del desarrollo de la computación, cuya teoría abarca tanto la biología natural como la artificial, comenzando por la premisa de que la base de la vida es información. En este punto, se invita al lector a “jugar” a cualquiera de los simuladores disponibles hoy en día y descubrir que ciertas reglas producen patrones reiterativos o funcionales: agrupaciones de células en movimiento perpetuo, células que generan flujos continuos de células, grupos que vacían cualquier patrón previo... a lo largo de los años se han construido auténticos ecosistemas con estas simples reglas y, definitorio en este caso, una disposición de células iniciales adecuada. Este tipo de procesos iniciará las primeras especulaciones sobre la vida artificial (o IA, inteligencia artificial), debate que no se entrará a discutir.

John von Neumann también consideró ‘the cellular automata’ como una maquina universal de Turing, una maquina/proceso que debería ser capaz de autoreplicarse. ¿Puede un patrón de ‘cellular automata’ generar mecanismos de celular autómatas por sí mismo? Lamentablemente, el proyecto de autómatas autoreplicante quedará inacabado⁵⁰⁷. Con todo, el estudio de autómatas celulares continuará y evidenciará su capacidad para simular operaciones computacionales, de simular fenómenos tanto físicos como biológicos⁵⁰⁸, creando música⁵⁰⁹ o geometría⁵¹⁰. Lanzando el mundo a una búsqueda de patrones...

Arquitectónicamente, el autómatas celular ha inspirado una nueva tipología arquitectónica: como ejemplos, una exposición artística con motivo de la presentación del libro ‘New Kind of Science’ (2003)⁵¹¹; el pabellón Biothing, de Alisa Andrasek (2013)⁵¹²; el evento en The Why Factory con la conferencia de Winy Maas y Rob Nijse “The Pixel Power”, relacionado con las exposiciones del proyecto Porous City (2012)⁵¹³; y numerosos ejercicios desarrollados durante los workshops del arquitecto Karl S. Chu (a explicar en el próximo capítulo).

⁵⁰⁷ Neumann, John Von, y Arthur W. Burks. *Theory Of Self-Reproducing Automata*. Urbana: University of Illinois Press, 1966.

⁵⁰⁸ Frazer, John. *An Evolutionary Architecture*. Londres: Architectural Association, 1995. p. 54.

⁵⁰⁹ Dancing with music: Ian Chee, 1994

‘Music is generated by mapping the states of a two dimensional automata to musical tones and sound duration. The top and bottom of the automata are joined to form a tube and the sides are joined in turn to form a Taurus. The sound patterns travel in opposite directions and eventually collide bringing the composition to a climatic conclusion.’

⁵¹⁰ Tseng, Jui-Pang. *Seeding and response, cellular automaton using the I-Ching*. s. l. 1993.

‘This 2D cellular automaton uses the rules of the I-Ching to map a series of proportional transformations based on the states of the cells.’

⁵¹¹ initially developed for Dr. Stephen Wolfram’s New Kind of Science Conference Art Gallery, Boston, MA, June 27, 2003
by Robert J. Krawczyk with production assistance from Ying-Chun Hsu, Illinois Institute of Technology, College of Architecture, Chicago, IL.

⁵¹² Biothing (Alisa Andrasek). “Turning Pavilion.” *Vimeo*. 2013. <http://vimeo.com/20873694>

⁵¹³ Maas, Winy, y Nijsee, Rob. *Porous City*. 2012. Thewhyfactory. “Porous-city.”<http://thewhyfactory.com/project/porous-city/>

036. /// Winy Maas y Rob Nijsee, The Pixel Power, 2012. Foto de la web de la exposición: Wini Maas, 2012. El uso de la unidad (la célula, el pixel volumétrico) da lugar a diferentes patrones que se expresan a través de rascacielos.

Mike Silver, en colaboración con Karl S. Chu, escribe lo siguiente sobre la incorporación de CA (cellular automata) en la arquitectura:

...the building's design emerges naturally from the process of staking bricks while the overall pattern is constituted in response to specific design requirements. Again, the code self-organizes the parts while the manipulation of the initial conditions gives the designer power over the whole⁵¹⁴. MIKE SILVER



Patrones de la arquitectura

El reconocimiento de patrones y el aprendizaje de nuevas jerarquías son lo que definen al ser humano. El proceso de síntesis sucede en el neo córtex (que es la parte “más nueva” del cerebro) respecto a otros seres vivos en la cadena evolutiva. Cada nivel superior del neo córtex es más abstracto que el anterior y gracias a ellos es por lo que somos capaces de entender el lenguaje. Debido a que el mundo es jerárquico, fractal, recursivo... este método de pensar ha supuesto uno de los valores más importantes como especie. La potencia del cerebro (que es mucho más lento que cualquier chip/procesador) viene dada por su procesamiento en paralelo en muchas direcciones al mismo tiempo⁵¹⁵. Esta habilidad es básica para entender e identificar los temas recurrentes de la tesis: la abstracción de la evolución biodigital en una computacional, la jerarquización de los genes en las definiciones de GH, la identificación de patrones aperiódicos inspirados por Wolfram, la formalización de los genotipos digitales en fenotipos arquitectónicos... En resumen, la jerarquía para abstraer los patrones generados a raíz de las reglas sencillas.

En el blog de Wolfram, Christopher Carlson lleva a cabo un ejercicio gráfico para demostrar, una vez más, la capacidad de las reglas simples y su potencial generador. Esta característica se acuña como ‘minimun inventory maximun diversity’⁵¹⁶. El Concepto de Minimun Inventory - Maximun Diversity, de Peter

⁵¹⁴ Futurefeeder. “Automason version 1.0”. Consultada 6 de agosto, 2015. <http://www.futurefeeder.com/2006/08/automason-version-10/>

⁵¹⁵ Kurweil, Ray. “Biological inspired models of intelligence” *GOOGLE I/O 2014*. Consultada 9 de abril, 2015. https://www.youtube.com/watch?v=MG_nOddk01E#t=38

⁵¹⁶ Carlson, Christopher, “Minimun Inventory, Maximun Diversity.” *Wolfram blog*. Consultada 27 de marzo, 2005. <http://blog.wolfram.com/2009/03/25/minimun-inventory-maximum-diversity/>

Peace, será una de las reglas fundamentales de esta y muchas otras tesis⁵¹⁷. La “manera de la naturaleza” y su forma sostenible se basa en el uso de estos inventarios minimizados, ‘kits’ de partes, junto a las reglas para combinar dichas partes o componentes. Los copos de nieve por ejemplo, exhiben gran diversidad de forma, gobernados por ciertas restricciones físicas y geométricas. De acuerdo a Pearce, el copo de nieve es un arquetipo: dentro de su forma hexagonal, nunca un copo de nieve ha sido considerado igual a otro.

037. /// Christopher Carlson, *Minimum inventory experiment*, 2015. Dibujo extraído de Wolfram Blog: Christopher Carlson, 2005. La conexión de semi círculos de diferente tamaño y grosor generan gran variedad de formas.



Una simple variación de semicírculos puede dar a luz todo un sistema de formas. A observar que todos los resultados y productos, al resonar con pocas y simples reglas rezuman un parecido indiscutible y aportan coherencia y relación al conjunto, características muy valoradas en el ámbito arquitectónico. En el patrón, la belleza en sí no viene por la situación de sus elementos, sino por la relación entre ellos. Ya sea aludiendo un aspecto social o un dibujo geométrico, las relaciones son esa cosa intangible, inexistente que añade algo a dos elementos más allá de sus valores independientes. A raíz de lo anterior, el arquitecto contemporáneo no ha de volver a ver los patrones como una matriz repetitiva de información plana y superficial. A medida que nuestra inteligencia avanza, y se extiende a través de lo tecnológico, queda a nuestro alcance el entendimiento de los poderosos patrones en nuestro mundo. Patrones que pueden ser recreados –y extendidos!- en otros sustratos. Los patrones y su potencial, son mucho más importantes que la materia que la sustenta⁵¹⁸.

Paradójicamente, Helen Castle destaca como los patrones más significativos y originales son frecuentemente los más discretos. Son los patrones invisibles,

⁵¹⁷ Pearce, Peter. *Structure in Nature Is a Strategy for Design*. Cambridge: MIT Press, 1978.

⁵¹⁸ Kurzweil, Ray. *The Singularity Is Near: When Humans Transcend Biology*. Nueva York: Viking, 2005. p. 4781.

los inmateriales, los dinámicos, los intangibles, los conceptuales y los virtuales los que constituyen el futuro. Al contrario que el concepto más tradicional de los patrones (del tipo formal, material, ornamental, y decorativo), los más innovadores son aquellos sigilosos, que describen contenidos y contextos, que las consecuencias del espacio. Considerar las historias y teorías detrás de los patrones en una investigación más amplia y multidisciplinar ayudará a entender sus orígenes⁵¹⁹.

En arquitectura, el dibujo de patrones y el especial interés en el grafismo de estos dibujos puede desvelar situaciones deslumbrantes: el seminario de Patternism (patronismo) llevado a cabo en la universidad de Yale⁵²⁰ plantea una alternativa a la corriente de superficies continuas y complejas -vigente gracias a la explosión digital- a través de un modo más diverso de continuidad: los patrones. Este seminario se lleva a cabo a través de GH y explora la forma arquitectónica mediante la modulación de las relaciones entre objetos y espacios, haciendo hincapié en jerarquías y multiniveles estructurales. Como en muchos de los casos presentados en esta tesis, la metodología no es totalmente nueva, sino una reaplicación de conceptos anteriores a través del potencial digital. El seminario⁵²¹ se apoya en los pilares de Gregory Bateson⁵²² y lo que él consideraba 'the great aesthetic unity that patterns'⁵²³ (la genial unidad estética de los patrones). Son referencia los dibujos de Paul Rudolph y, de alguna manera, los collages de John Hejduk, en el bien entendido de que no se pretende crear una figura atractiva que se visualiza desde el principio, sino que la "casualidad" de sus combinaciones hará emerger la belleza del patrón.

En el mismo sentido, cabe destacar los trabajos del matemático Georg W. Hart en relación a patrones esféricos, cuyos conceptos pueden ser replicados a través de procesos de mallas y add-ons como el Mesh+ o el Starfish (metodologías que se aplicarán durante los experimentos de la tesis). El teselado de las geometrías, su patronaje, se extenderá en posteriores capítulos en esta tesis dedicados a las mallas y la subdivisión celular (cap. 3.4.2).

La emergencia a partir de simples reglas, el juego de Lego, la propia gramática del lenguaje⁵²⁴ -capaz de crear un idioma con un pequeño grupo de letras-, denotan el mismo comportamiento que el ADN. Las reglas pueden evolucionar en continuo dialogo con su entorno. Y esas interacciones construyen los

⁵¹⁹ AA.VV. *AD Patterns of architecture*. Volume 79, Issue 6. Noviembre, 2009. p.11

⁵²⁰ Buck, Berenan. "Patternism, Computation and Contemporary Continuity." *Architecture Yale*. Consultada 31 de agosto, 2014 <http://architecture.yale.edu/courses/patternism>

⁵²¹ Suckerpunchdaily. "Patternism." Consultada 9 de abril, 2015. <http://www.suckerpunchdaily.com/2015/06/08/patternism-2/>

⁵²² Bateson, antropólogo, científico social, lingüista y cibernético, teorizará sobre el término de abducción como una alternativa a las metodologías científicas de inducción y deducción. El método comparativo de patrones y sus relaciones se usará en campos como la anatomía comparativa, estudio presente en esta tesis.

⁵²³ Bateson, Gregory. *Pasos Hacia Una ecología De La Mente*. Buenos Aires: Lohlé-Lumen, 1998.

⁵²⁴ Stiny, George. "The Generative Specification of Painting." *Pictorial and Formal Aspects of Shape and Shape Grammars*. Basel: 1975. pp. 289-310.

criterios de adaptabilidad⁵²⁵. De especial dificultad e interés es que esas reglas afecten simultáneamente a los “paquetes” que se forman en los diferentes niveles jerárquicos, por la interdependencia que crea eso, y por el intento último de la arquitectura para manejar el individuo, las agrupaciones o bloques, y la escala urbana en un mismo sistema.

3.1.3. La arquitectura genética de Karl S. Chu

De la palabra arquitectura, arché+tekné, orden (software) más técnica (hardware). El orden o las leyes, son el código, es lo que crea a partir de la nada. Una arquitectura que solo se basa en la técnica y en lo visual es una mala arquitectura, es una arquitectura escultórica. KARL S. CHU

Reality should not be limited by what we think that is or is not possible⁵²⁶. KARL S. CHU

El arquitecto Karl S. Chu, encargado del último estudio en el máster de Arquitectura Biodigital aproxima la construcción del espacio y su organización aspirando a los modelos de la máquina universal de Turing. En dicho estudio se plantea el enunciado de proyectar una biblioteca universal, que se construye y organiza a sí misma a medida que almacena o genera contenidos. Su propuesta de arquitectura se basa pues en geometrías con leyes intrínsecas (morfo genética), sistemas de propagación con información hereditaria y con capacidad para replicarse a sí misma. La responsabilidad recae así en las reglas (contenido o genotipo) que se formaliza posteriormente en el cuerpo (contenedor o fenotipo)⁵²⁷.

There are three types of objects: objects for others, objects for itself, objects for no one (highest level of irreducibility). The architecture that is alive, intelligent, is architecture for itself. Of its own, therefore is no longer human, is architecture autonoma⁵²⁸. KARL S. CHU

El universo es una gigantesca máquina de Turing, un infinito proceso de información (cuantificado en nuestro presente a 10^{92} bits de información).

⁵²⁵ Spyropoulos, Theodore, Brett D. Steele, John H. Holland, Ryan Dillon, Mollie Claypool, John Frazer, Patrik Schumacher, Makoto Sei Watanabe, David Ruy, y Mark Burry. *Adaptive Ecologies: Correlated Systems of Living*. Londres: Architectural Association, 2013. p.25

⁵²⁶ Citas recogidas de las clases magistrales de Karl S. Chu en el máster de Arquitectura Biodigital.

⁵²⁷ Carroll, Sean B. *Endless Forms Most Beautiful: The New Science of Evo Devo and the Making of the Animal Kingdom*. Nueva York: Norton, 2005.

Explicación sobre los genes Homeobox, encargados de dar forma y geometrizar las partes del cuerpo. El número de ellos y el modo en que se organizan es el responsable del resultado.

⁵²⁸ Karl Chu, primer día de clase de su propio ‘studio’ en el Master de Arquitectura Biodigital 2016.

Por tanto, la información no es solo invisible o digital, sino también material. La información se mueve en diversas capas -energía, tiempo, magnetismo, materia, materia oscura...- recuperando las ideas de multi-dimensionalidad, universos paralelos y posibles existencias holográficas⁵²⁹. Toda esa información, toda esa creación, y el proceso para obtenerla es irreductible en el entendido de que no pueden resumirse los pasos para obtener el resultado final.

Partiendo del relato “La Biblioteca de Babilonia”⁵³⁰ Karl S. Chu comienza un discurso donde la semántica y la sintáctica⁵³¹ se confunden y se fusionan, volviéndose una parte de la otra. ¿Está la biblioteca en el libro, o el libro en la biblioteca? Un libro es un conjunto de conocimientos, es una biblioteca donde el lenguaje es el software y la tinta el hardware. Para poder crear una biblioteca de sí misma está deberá contener su propia información, aquello que la materializa, además de los libros como valor alieno (o no). Pocos son los proyectos arquitectónicos que han conseguido alzarse bajo estos valores de autogeneración y codificación de su propia información (los Dolmens, las Pirámides, o Stonehenge). La arquitectura convencional está definida en su mayor parte por la creación de cajas, aglomeraciones de muros que podrían contener cualquier tipo de significado, dónde los espacios son ambiguos para maximizar su flexibilidad y utilidad y no son resultado de su propio contenido. Se pretende con ello traspasar geoméricamente las fronteras de la arquitectura racional al igual que se hizo previamente con la clásica.

Toda arquitectura ha de contener Materia+Energía+Información. Una arquitectura sin información sería como un vertedero, una masa homogénea de materia. La arquitectura ha de ser la construcción de mundos posibles, de la multiplicidad contrapuesta al vacío, al espacio no ocupable⁵³². Esta multiplicidad de planos/dimensiones y el vacío suponen conceptos geoméricos y matemáticos reales pero no humanos, consecuentemente el profesor Chu acuñará esta arquitectura como Post-Humana, en el bien entendido de que será la unión de espacios humanos y no humanos, la arquitectura cobrará vida más allá de las necesidades humanas. A pesar de su componente de ciencia ficción, se tiene a bien reconocer en estas líneas el ejemplo del Tesseract diseñado para la película *Interstellar*⁵³³. Aun cuando su crecimiento es regular y simple (una simple matriz rectangular tridimensional) los esfuerzos por representar una arquitectura multidimensional son sinceramente agradecidos. De su arquitectura se deduce (hecho que no se menciona en la película) la posibilidad de universos paralelos. Hipercubos, espacios procedurales, todo

⁵²⁹ Aigner, Florian. “Is the universe a Hologram?” *Technische Universität Wien*. Consultada 29 de abril, 2015. http://www.tuwien.ac.at/en/news/news_detail/article/9447/

⁵³⁰ Borges, Jorge Luis. *La Biblioteca De Babel: Prólogos*. Buenos Aires: Emecé Editores, 2000.

⁵³¹ Paradoja lógica: “*This Sentence is False*. Esta frase está mal.” A nivel lógico, la frase es cierta, pero su significado contradice su estado.

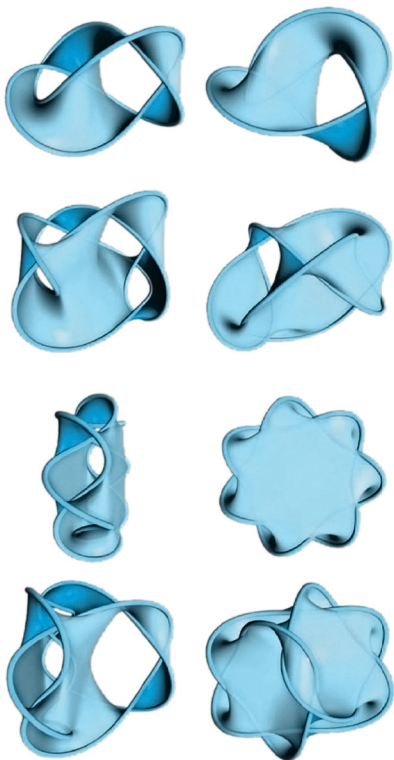
⁵³² La última cámara del Templo de Jerusalén.

⁵³³ Jobson, Christopher. “The visually stunning ‘tesseract’ scene in *Interstellar* was filmed on a physically constructed set.” *Colossal*. Consultada 31 de junio, 2015. <http://www.thisiscolossal.com/2015/06/interstellar-tesseract-set/>

a través de una estantería de libros que deja entrever una sutil referencia al mono de Émile Borel, y por ende, a la Biblioteca de Babel de Borges. Una arquitectura que crece infinitamente albergando el todo.

La idea principal del proyecto es que las ideas lógicas que componen los sistemas de crecimiento están relacionadas y creadas a partir de las necesidades de la biblioteca: el programa del edificio y la arquitectura es lo mismo, manteniendo al margen inputs externos como el entorno. Se buscarán para el desarrollo de la biblioteca patrones y sistemas de crecimiento usando algunos de los programas antes mencionados siendo las repeticiones a-periódicas (por ejemplo, la 'Penrose Tyle') las más ricas por su comportamiento no-lineal; o las curvas fractales de Hilbert, Moore, o Peano por su capacidad de ocupar el espacio. Unidades primitivas, agregación, nesting o nidificación, mutaciones, púas, escalado, fusiones, sustituciones, eliminaciones... son algunas de las propiedades que estas arquitecturas pueden contener. Las mutaciones crearan situaciones singulares que podrán cambiar el transcurso del crecimiento de la biblioteca, como si de un sistema vivo se tratase.

038. /// Diego Navarro, experimentos durante el Studio de Karl S. CHu, 2011. Render del autor. Superficies de Seifert como resultado de diferentes nudos.



La continuidad, la unidad básica o la información son otros de los temas de vital importancia para el Studio de Karl S. Chu. El problema de la continuidad espacial⁵³⁴ es uno de los conceptos geométricos no resueltos a tener en cuenta. Los ordenadores se ven limitados por los factores infinitos -haciendo una referencia obvia al software fractal- (infinitamente pequeño o infinitamente grande⁵³⁵). ¿En cuántas partes puede subdividirse el espacio entre dos puntos? ¿Por qué una esfera pequeña y una esfera grande tienen el mismo número de puntos? Estas limitaciones en la computación repercutirán en la generación de nuestra arquitectura. Paradojas formales como la banda de Möbius o la botella de Klein, que son sencillas de construir⁵³⁶ pero que albergan conceptos muy interesantes sobre la continuidad, pueden ser aplicadas a la geometría arquitectónica como potentes emisores de ambigüedad y relación espacial. También las superficies de Seifert⁵³⁷ añaden gran interés a través de funciones relativamente sencillas, que destilan asociaciones a los trabajos de curvatura mínima de Gaudí, Frei Otto, Eladio Dieste, o Félix Candela.

⁵³⁴ Georg Ferdinand Ludwig Philipp Cantor, Matemático alemán, inventor con Dedekind y Frege de la teoría de conjuntos, base de las matemáticas modernas. Por sus investigaciones sobre los conjuntos infinitos fue el primero en formalizar la noción de infinito bajo la forma de los números transfinitos (cardinales y ordinales).

⁵³⁵ Definido por Aristóteles como infinito potencial: siempre puede haber uno más, e infinito actual: existente, las partes de las partes.

⁵³⁶ Ben van Berkel. *Casa Moebius*. Amsterdam, Holanda, 1998.

⁵³⁷ Por Herbert Seifert, son superficies orientables cuyo límite es definido por un nudo o conexión.

Morfodinámico como proceso genético

Durante el estudio de Karl S. Chu, se hace especial énfasis en la crítica de los sistemas dinámicos en relación a la tipología de 'swarm intelligence', abordada en el capítulo de esta tesis "el estilo de la arquitectura paramétrica". Karl defiende acertadamente que las leyes o algoritmos dinámicos no pueden ser considerados emergentes por su planitud, su simplicidad (a nivel jerárquico) y por su falta de recursión. Su planitud se debe a lo directo de su aplicación, a su carácter efecto-causa; su falta de recursión, a su constante adaptación en tiempo real.

Sin embargo, se considera que un sistema de agentes también puede dar lugar a emergencia siempre y cuando se establezca un registro en el tiempo de esa dinamicidad. ¿Acaso no es el autómatas celular o la máquina universal de Turing un registro del movimiento de la interacción de los agentes y la información? ¿es el 'Conway's Game of Life' un sistema de 'swarm intelligence'? De ser así, la diferencia entre morfogenética y morfodinámica sería inexistente, y el único valor capaz de agrupar los procesos generativos o sistemas complejos a tener en cuenta sería la capacidad de acumular capas de información que pudiesen dar lugar a nuevos niveles jerárquicos, a la emergencia⁵³⁸. Se plantea –que no se resuelve– esta cuestión para futuras teorías. ¿Han de considerarse morfodinámicos únicamente aquellos procesos en tiempo real, responsivos, que no son capaces de almacenar o verse afectados por estados anteriores?***

En el proyecto teórico Microzoo, el artista Yunus Emre teoriza sobre enjambres de microrobots ('swarm intelligence') capaces de construir y readaptar la arquitectura en tiempo real⁵³⁹. En sus comentarios pueden leerse la interrelación de todos los conceptos mencionados, y no su contraposición.

039. /// Kirsten Zirngibl's, *Microzoo*, 2015. Imagen del artículo-web Yunus Emre, 2015. Paisaje que muestra el carácter fractal de ciudades creadas por robots autómatas.

I am fascinated by swarm intelligence/ emergence, as well as the structure of colonies (coral, slime mold, artificial life simulations like Conway's). How close could one approach abstract thought with this architecture? I also am heavily inspired by fractals! Fractals, especially 3D ones, are tied to how swarms self-assemble to maximize certain attributes like surface area. They will help sell the idea that they are "alive" to an extent. (I actually used



⁵³⁸ Recalcar que un sistema morfodinámico también puede generar emergencia sin necesidad de acumular las diferentes fases.

⁵³⁹ Emre, Yunus. "Ever-changing sceneries with microrobots" *Next Nature*. Consultada 27 de abril, 2015. http://www.nextnature.net/2015/04/ever-changing-sceneries-with-microrobots/?utm_content=buffer480b1&utm_medium=social&utm_source=twitter.com&utm_campaign=buffer

fractal software to help make part of this piece.) I was also inspired by Lego growing up and am interested in how to make the most out of a relatively small variety of parts⁵⁴⁰. YUNUS EMRE

Obviamente, cualquier combinación de algoritmos emergentes o procesos dinámicos tendrá potencial para generar a su vez emergencia y jerarquía a diferentes niveles (pudiendo ser esta simple o increíblemente compleja). Además del ejemplo mencionado con anterioridad sobre los medios excitables (Morphocode mediante Rabbit⁵⁴¹), en la comunidad de GH pueden encontrarse más de 100 entradas y cerca de 30 videos en relación al tema de 'swarm intelligence'. Esto nos da noticia de que si bien es un aspecto que no está incluido en GH de forma nativa, su importancia es suficiente como para que la comunidad cree sus propias soluciones.

It is no longer possible to use traditional, centralized, hierarchical command and control techniques to deal with systems that have thousands or even millions of dynamically changing, communicating, heterogeneous entities the type of solution swarm intelligence offers is the only way of moving forward, we have to rethink the way we control complex distributed systems⁵⁴². ERIC BONABEAU

⁵⁴⁰ Ídem.

⁵⁴¹ Morphocode. "CA. Excitable Media with Rabbit." Noviembre, 2014. <http://morphocode.com/excitable-media-with-rabbit/>

⁵⁴² Bonabeau, E., Dorigo, M., Theraulaz, G., "Swarm Intelligence: From Natural to Artificial Systems", Santa Fe Institute Studies in the Sciences of Complexity. Nueva York: Oxford University Press, 1999. p.69.

3.2. Evo-Devo: biología evolutiva del desarrollo

The first cell is still living after billions of years, and now even in many trillions of copies. Wherever we look, it is there. It has made a garden of our earth and transformed our atmosphere with green plants. and it created our eyes and opened them to the blue sky and the stars. It is doing well⁵⁴³. KARL POPPER

Como sistema emergente, la vida desarrollada en el planeta es un abanico de increíble complejidad. Desde seres unicelulares hasta la civilización humana que hoy dirige un constante y cautivador ritmo de descubrimientos, mejorando incesantemente, insaciable. La manifestación más evidente de esos cambios son los procesos evolutivos y el desarrollo -crecimiento- de las formas vivas. El ADN (o conjunto de moléculas de ácido nucleico) define el genoma, pieza clave responsable de todas estas capacidades de autoorganización. Todo el ADN del mundo está formado por solo cuatro tipos de nucleótidos⁵⁴⁴, y solo su número, tamaño y secuencia de dichas moléculas supone que el ADN conforme una especie u otra. ¿No es suficiente justificación que la naturaleza sea capaz de generar entes vivos a través de la combinación de cuatro nucleótidos, para convencer de que reglas simples son capaces de producir emergencia/complejidad?

En los últimos años, gracias a la genética, se han revelado asombrosas verdades que combinan la evolución y el desarrollo de los cuerpos (recuperando especialmente la ciencia de la embriología). Ello ha llevado a la formulación de la ciencia Evo-Devo (Evolutionary Developmental Biology), que combina en un solo campos las dos vertientes mencionadas. Aunque este capítulo tratará ambos temas por separados para un mejor entendimiento, el lector advertirá que frecuentemente los temas son susceptibles de participar en ambas temáticas ya que las repercusiones entre ambas son recíprocas. Por ser la parte evolutiva la más antigua y avanzada de las dos, la mayoría de los conceptos nuevos en Evo-Devo se asocian al desarrollo de las formas vivas: su estructura, forma y orden (a su crecimiento embriológico).

3.2.1. Evolución (biológica)

If, during the long course of ages and under varying conditions of life, organic beings vary at all in the several parts of their organization, and I think this cannot be disputed; if there be, owing to the high geometric

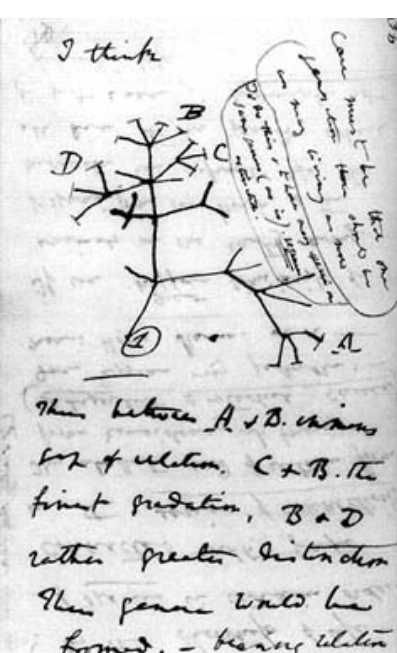
⁵⁴³ Popper, Karl R. *In Search of a Better World: Lectures and Essays from Thirty Years*. Londres: Routledge, 1992. Capítulo 1, p. 4.

Traducción del autor: La primera célula creó el mundo, cambio la atmósfera con plantas verdes y abrió nuestros ojos al cielo azul y las estrellas. Lo está haciendo bien.

⁵⁴⁴ Las bases que se unen, una de cada cadena, a lo largo de la doble cadena, son siempre las mismas A con T (o T con A) y G con C (o C con G).

powers of increase of each species, at some age, season or year, a severe struggle for life, and this certainly cannot be disputed; then, considering the infinite complexity of the relations of all organic beings to each other and to their conditions of existence, causing an infinite variety in structure, constitution, and habits, to be advantageous to them, I think it would be a most extraordinary fact if no variation ever had occurred useful to each being's own welfare, in the same way as so many variations have occurred useful to man. But if variations useful to any organic being do occur, assuredly individuals thus characterized will have the best chance of being preserved in the struggle for life; and from the strong principle of inheritance they will tend to produce offspring similarly characterized. This principle of preservation, I have called, for the sake of brevity, Natural Selection⁵⁴⁵.
 CHARLES DARWIN.

040. /// Charles Darwin, *I think*, 1837. Extraído de la web Darwin Online. Boceto temprano de Darwin sobre el esquema de la teoría evolutiva de uno de sus cuadernos de notas.



La evolución es un proceso que comenzó miles de millones de años atrás -y todavía sigue-, que ha permitido a los seres vivos sobrevivir y adaptarse al planeta tierra, desembocando en una asombrosa variedad de formas y respuestas a su entorno. La evolución ha logrado que los simples protozoos logaran transformarse en millones de especies distintas, comunidades de individuos capaces de crear descendencia entre dichos individuos, siendo esa descendencia igualmente capaz de reproducirse.

El proceso evolutivo se asienta sobre las siguientes bases y mecanismos:

- La unicidad
- Producción en exceso
- Herencia
- Selección natural

Aunque semejante a sus parientes, cada criatura es única, caracterizada por pequeños matices que la hacen distinta a sus congéneres (más grande, más bajo, más agresivo, más rápido,...). El responsable de esas características es el ADN en el interior de cada una de nuestras células, compuesto por una sucesión de genes. Los genes albergan la información y las ordenes que definen al individuo. Este gigantesco rango de cadenas de ADN variables se produce a través de:

- Producción en exceso: Si bien las estrategias pueden diferir, lo más común es que la especie trate de perpetuarse a través de la reproducción, generando el mayor número de individuos posibles. Incluso en entornos que no están preparados para determinado

⁵⁴⁵ Darwin, Charles, y Charles Kelchner. *The Origin of Species*. Nueva York, NY: Simon & Schuster Paperbacks, 2009. p.127. (Original: Darwin, Charles. *The Origin of Species*, 1876).

número de individuos, este hecho garantizará la supervivencia de los más fuertes. Al mismo tiempo, mayor número de individuos, mayor será la diversidad en la especie.

- La herencia es la segunda causa de unicidad. Gracias a ella, los genes de los padres se recombinan de forma aleatoria en una nueva secuencia de genes que da lugar a un tercer individuo único.
- Las mutaciones también juegan un papel clave en la evolución: son cambios aleatorios (o errores en la copia) que se producen en el ADN, normalmente como consecuencia de la exposición a radiaciones o toxinas⁵⁴⁶.

Todos estos procesos contienen un alto nivel de aleatoriedad y carecen, en principio, de objetivo o intención. La selección natural es la encargada de elegir aquellos individuos más aptos en tan azaroso proceso. La unicidad de cada individuo se pondrá a prueba ante predadores, parásitos, otros miembros de la especie, cambios en el hábitat, el clima... Uno de los casos más representativos de esta selección son los llamados pinzones de Darwin, 14 especies de aves que evolucionaron como respuesta a la sobrepoblación, evolucionando hacia la especialización de adquisición de alimentos para reducir la competencia.

Este capítulo resume el funcionamiento de la síntesis evolutiva moderna (o neodarwinismo) que integra la selección natural de Charles Darwin, la teoría genética de Gregor Mendel sobre herencia genética, las mutaciones y la genética de poblaciones⁵⁴⁷. Este compendio ha sido revisado a lo largo de los años para incluir los últimos descubrimientos⁵⁴⁸.

Por describir en otras palabras el proceso evolutivo se recopilan aquí las palabras del doctor Josep Corcó, de la Universitat Internacional de Catalunya, perteneciente también al grupo de Arquitecturas Genéticas. Según él, la evolución es⁵⁴⁹:

1. Cambio universal latente en los seres vivos
2. Novedad cualitativa, el emerger de una cualidad dentro de un sistema que no posee ninguna de sus partes.
3. Realidad puede ser analizada en niveles, cada uno de ellos consistentes en sistemas caracterizados por sus significantes propiedades emergentes.

⁵⁴⁶ Lee, Adam. "4 beneficial evolutionary mutations that humans are undergoing right now." *bigthink*. Julio, 2015. <http://bigthink.com/daylight-atheism/evolution-is-still-happening-beneficial-mutations-in-humans>

⁵⁴⁷ Huxley, Julian. *Evolution: The Modern Synthesis*. Nueva York: Harper & Brothers, 1943.

⁵⁴⁸ Smocovitis, Vassiliki Betty. *Unifying Biology: The Evolutionary Synthesis and Evolutionary Biology*. Princeton, NJ: Princeton University Press, 1996.

⁵⁴⁹ Corcó, Josep. "Emergent properties of life". Estévez, Alberto T. *Genetic Architectures III: New Bio & Digital Techniques*. Barcelona: SITE BOOKS/Escola Tècnica Superior d'Arquitectura, Universitat Internacional De Catalunya, 2003. pp. 54-67.

En lo referido a la evolución, por supuesto, hay matices y elementos que han de considerarse con mayor detalle y que se describen a continuación. En lo sucesivo la tesis ahondará ampliamente en el carácter filosófico y biológico con el fin de replicar y aplicar fieles analogías al mundo arquitectónico. Las sucesivas noticias/descubrimientos/artículos, obviando su increíble repercusión a nivel científico, ponen de manifiesto más aún si cabe, las teorías de Turing y las semejanzas de los sistemas computacionales a la biología. No solo por su interés explicativo y aclarador del inicio del proceso evolutivo -tan importante para la tesis-, sino por su asentamiento en la ideología de la emergencia a partir de la sencillez, de las matemáticas, a la física, a la química, a la biología...

Estos procesos de interdisciplinariedad siempre son de gran valor en el pensamiento arquitectónico. El grupo de investigación de England MIT⁵⁵⁰ hace un esfuerzo por sintetizar una realidad más compleja, la biología, en otra más sencilla, la física. Pero ello no es solo una simplificación y pérdida de información, sino la importante labor de explicar cómo los procesos adquieren complejidad. En la arquitectura, de la misma manera, se trata de explicar constantemente comportamientos, funciones, y relaciones sociales; pero la herramienta usada no es la sociología, sino una mucho más simple: la geometría.

Creacionismo y Reduccionismo

Sorprendentemente, todavía hoy en día se sigue poniendo en tela de juicio la validez de la teoría neodarwinista, especialmente en Estados Unidos, donde la educación pública aun incorpora el modelo creacionista en varios de sus estados (Louisiana y Tennessee son los más destacados). Es por ello que gran parte de la bibliografía consultada comienza defendiendo al evolucionismo y criticando al creacionismo en un intento de ganar la batalla argumental.

Aunque el concepto de emergencia se introduce a debate en el primer tercio del siglo XX, este será silenciado rápidamente por el Reduccionismo, movimiento filosófico apoyado por el Viena Circle y Rudolf Carnap. Esta corriente filosófica establecerá que todo término puede ser reducido y simplificado hasta el nivel más básico de la física, alegando así que algún día cualquier campo puede ser dominado y explicado por un físico. Es decir, las partes definen el todo. Sin embargo, de forma reiterada, el concepto de evolución y emergencia (del emerger de las cosas) se abrirá camino a lo largo del tiempo gracias a personajes como Joseph Needham, Donald T. Campbell, Jaegnon Kim o Karl Popper, volviéndose en la actualidad teorías más apropiadas que el reduccionismo o el neopositivismo.

Por su parte, Donald Campbell argumentará que las causas pueden ser tanto

⁵⁵⁰ England lab at MIT physics. Consultada 9 de abril, 2015. <http://www.englishlab.com/>

crecientes como decrecientes, y que los niveles exteriores pueden afectar a los niveles interiores o primigenios. Por ejemplo, un dolor de cabeza o problema psicológico puede producir un dolor físico en el estómago. Es decir, las causas son retrospectivas, y por lo tanto, no se puede explicar los niveles inferiores ya que estos mismos ya dependen de los exteriores. Esto plantea en un estado de evolución en las dos direcciones hasta que se alcanza un estado de equilibrio (y alude a los valores de una arquitectura responsiva). El concepto de que diferentes características o valores se organizan en niveles que pueden afectar recíprocamente tanto a niveles superiores como inferiores también señala a la idea clásica de las jerarquías que se dan dentro de un edificio, y se puede interpretar como sucesos que acaecen en el interior como producto del uso que ejercen sus habitantes traducido en modificaciones físicas en el edificio. Es decir, los usuarios de un edificio -que suponen uno de los niveles más altos en la vida de un edificio- tienen el poder para cambiar y alterar las formas más básicas y generadoras de dicho edificio. Esta situación de búsqueda de equilibrio resulta tremendamente útil a la hora de formular una teoría para una arquitectura más inteligente. Una que permita que la estructura secundaria aporte información a la primaria, que absorba la información de las personas que la habitan para reformularse y poder mejorar, recibiendo un 'feedback' constante para adaptarse de la manera más adecuada a cada situación. A día de hoy se conoce como 'responsive architecture'.

Interesa el debate del creacionismo 'versus' evolucionismo, no por la polémica atea o religiosa, sino porque la posición del arquitecto (como creador de emergencia) probablemente esté en un punto intermedio entre ambas. Entender cuáles son sus valores es relevante para posicionar las decisiones del arquitecto durante el proceso creativo.

Los creacionistas han variado el concepto de "Dios creador" a una argumentación basada en la imposibilidad de la teoría evolutiva, alegando que los seres vivos son resultado de un diseño inteligente (ID 'intelligent design').

Intelligent design is theologically minimalist. It detects intelligence without speculating about the nature of intelligence⁵⁵¹. DEMBESKI

Los defensores del ID llaman a la naturaleza "The blind watchmaker", argumentando que difícilmente puede crearse un reloj sin tener noción de qué es un reloj. ¿Cómo se hace? ¿Para qué sirve? Todas esas piezas en sintonía, sin que ninguna de ellas sobre, formando un mecanismo perfecto... La historia del reloj de William Paley⁵⁵² establece las bases de los argumentos de hoy:

All appearances to the contrary, the only watchmaker in nature is the blind forces of physics, albeit deployed in a very special way.

⁵⁵¹ Dembski, W. "The intelligent design movement". In: J. Miller (ed.) *An Evolving Dialogue: Theological and Scientific Perspectives on Evolution*. Spring, 1998. pp. 439-443.

⁵⁵² Muller, H. "Reversibility in evolution considered from the standpoint of genetics". *Biological Reviews of the Cambridge Philosophical Society* 14, nº 3, 1939. pp. 261-280.

*A true watchmaker has foresight: he designs his cogs and springs, and plans their interconnections, with a future purpose in mind. Natural selection, the blind, unconscious automatic process Darwin discovered... has no purpose in mind. It has no vision, no foresight, no sight at all. If it can be said to play the role of watchmaker in nature, it is the blind watchmaker.*⁵⁵³ WILLIAM PALLEY

La teoría ID establece que la inteligencia es un elemento natural aunque inmaterial, mientras que las actuales corrientes de ciencia mantienen que cualquier cosa natural es material⁵⁵⁴. Dicha inteligencia se mide mediante el concepto de ‘specified complexity’ (o ‘complex specified information’ CSI), que establece unos varemos para detectar la improbabilidad de que cierto diseño “emerja” por sí solo. Si supera dicho valor se considera que la inteligencia ha intervenido (ID). Michael Behe, partidario del creacionismo defiende que algunos sistemas biológicos son irreductiblemente complejos (dejarían de funcionar si alguna de sus piezas fallase, igual que un reloj).

*By irreducibly complex I mean a single system which is composed of several interacting parts that contribute to the basic function, and where the removal of any one of the parts causes the system to effectively cease functioning. An irreducibly complex system cannot be produced directly (that is, by continuously improving the initial function, which continues to work by the same mechanism) by slight, successive modifications of a precursor system, because any precursor to an irreducibly complex system that is missing a part is by definition nonfunctional. [...] Even if a system is irreducibly complex (and thus cannot have been produced directly), however, one cannot definitely rule out the possibility of an indirect, circuitous route. As the complexity of an interacting system increases, though, the likelihood of such an indirect route drops precipitously*⁵⁵⁵. MICHAEL BEHE

En lo sucesivo, se darán explicarán los procesos que han permitido alcanzar esa complejidad supuestamente irreducible empezando por ejemplos que han demostrado la creación de la misma, como el proyecto Avida⁵⁵⁶, donde programas virtuales llegaron a evolucionar en dicha complejidad. Se considera oportuno reflejar también puntos intermedios entre estas dos posturas. Una de las críticas al sistema evolutivo es su completa aleatoriedad, la falta de propósito, el ser un sistema puramente negativo que solo funciona por eliminación. Otras filosofías plantean que la materia viva sea autopoietica⁵⁵⁷, autoorganizativa, que haya una consciencia que rijan una cierta direccionalidad.

⁵⁵³ Consúltese: Dawkins, R. *The Blind Watchmaker*. Londres: W. W. Norton ADN Co., 1986.

⁵⁵⁴ Hingston, Philip F. *Design by Evolution Advances in Evolutionary Design*. Berlín: Springer, 2008.

⁵⁵⁵ Behe, Michael J. *Darwin's Black Box: The Biochemical Challenge to Evolution*. Nueva York: Free Press, 2006. pp. 39-40.

⁵⁵⁶ Lenski, R., Ofria, C.; Pennock, R., Adami, C. “The evolutionary origin of complex features.” *Nature* 423, 2003. pp. 129-144.

⁵⁵⁷ Maturana, Humberto R., y Francisco J. Varela. *De Máquinas Y Seres Vivos; Una Teoría Sobre La Organización Biológica*. Santiago De Chile: Editorial Universitaria, 1973. p. 73.

Que las formas se creen accidentalmente es renunciar a entender cómo se crean: es reconocer que no sabemos cómo se han dado.

Estructuras y clasificaciones evolutivas

A lo largo de los años se han propuesto diferentes tipos de estructuras que permitiesen relacionar y organizar los seres vivos regidos por el proceso evolutivo. El propósito de este capítulo no es discernir el más adecuado o el más apto, sino entender sus justificaciones y mantener una actitud abierta de cara a su aplicación. Dado que GH funciona en una estructura muy determinada de datos (paths, trees, branches, list, items) modificables, podremos también adecuar el proyecto a un tipo de relaciones u otras. Las estructuras evolutivas también definen que aspectos son importantes en la definición evolutiva, priorizando unos sobre otros.

En la década de los 40, se produjo una revolución conceptual en la sistemática; los sistemáticos se empezaron a interesar, no solo por la descripción, sino por el esclarecimiento de la historia y la evolución de los seres vivos. Fruto de estas nuevas inquietudes surgieron tres grandes escuelas sistemáticas: sistemática evolutiva, sistemática fenética (o taxonomía numérica) y sistemática filogenética (o cladística).

- La sistemática evolutiva se centra en el estudio de las poblaciones y sus variaciones para discernir los cambios evolutivos en lugar de acotar las especies⁵⁵⁸.
- La cladística (del griego, klados: «rama») es una rama de la biología que define las relaciones evolutivas entre los organismos basándose en similitudes derivadas. Es la más importante de las sistemáticas filogenéticas que estudian las relaciones evolutivas entre los organismos. La cladística es un método de análisis riguroso que utiliza las “propiedades derivadas compartidas” de los organismos que se están estudiando.
- En contraste, la fenética agrupa los organismos basándose en su similitud global, mientras que los enfoques más tradicionales tienden a basarse en caracteres clave⁵⁵⁹.

La investigación sistemática moderna suele basarse en una gran variedad de información, incluyendo secuencias de ADN (los famosos “datos moleculares”), datos bioquímicos y datos morfológicos. Es común que el sistema más habitual de representación sea el cladista, que deriva en cladogramas, gráficos en forma de árboles que organizan los seres vivos. La cladística no asume ninguna teoría de la evolución particular, sólo el conocimiento original de la descendencia con modificación. Por ello, los métodos cladísticos se pueden aplicar, y así se ha hecho recientemente, a sistemas no biológicos, como determinar las familias de lenguajes en la lingüística histórica y filiar

⁵⁵⁸ Huxley, Julian. *The New Systematics*. Oxford: Clarendon Press, 1940.

⁵⁵⁹ Hennig, Willi. *Phylogenetic Systematics*. Urbana, Londres: Univ. of Illinois Press, 1966.

manuscritos en la crítica textual⁵⁶⁰.

La teoría jerárquica de la evolución⁵⁶¹ aplica los mismos valores a unidades distintas al organismo individual: linajes celulares, grupos o demes, especies, o incluso clados. Según la teoría jerárquica, la evolución es el resultado de la interacción simultánea de distintos niveles que pueden coincidir pero también entrar en conflicto.

La teoría jerárquica de la selección reconoce muchas clases de individuos evolutivos, ordenados en una serie de inclusión creciente (genes en células, células en organismos, organismos en demes, demes en especies, especies en clados). La unidad focal de cada nivel es un individuo, y podemos dirigir nuestra atención a cualquiera de estos niveles. Una vez designamos un nivel focal como primario para un estudio concreto, entonces la unidad a ese nivel (el gen, el organismo, la especie, etcétera) se convierte en nuestro individuo focal o relevante, y sus unidades constituyentes se convierten en partes mientras que el nivel superior se convierte en colectividad. Así, si nos centramos en el nivel organísmico convencional, genes y células se convierten en colectividades. Pero si nuestro estudio requiere considerar a las especies como individuos, entonces los organismos se convierten en partes y los clados en colectividades. En otras palabras, la tríada parte-individuo-colectividad se desplazará, como un todo, arriba y debajo de la jerarquía en función de los sujetos y objetos de cualquier estudio particular. Esta filosofía fue tomada como referencia en el experimento llevado a cabo en esta tesis sobre las manzanas del ensanche. En él, el individuo evolucionado no es tal, sino la agrupación de varios para poder valorar su interacción. Por lo tanto, se trata de un ejercicio de evolución de agrupaciones. **

De igual manera, el concepto para valorar las especies ha cambiado paulatinamente pasando de un pensamiento tipológico a uno poblacional. Ernst Mayr introduce la disyuntiva filosófica de cómo han de considerarse las especies en el ámbito del darwinismo en 1959⁵⁶². Según él, el pensamiento tipológico concibe las especies como tipos o clases naturales con respecto a las cuales los individuos no son más que proyecciones degradadas, identificándolo con el esencialismo (según el cual cada especie posee una esencia propia que las define en términos de propiedades intrínsecas históricas, necesarias y suficientes, Hull 1965⁵⁶³) y el creacionismo (según el cual cada una de las especies actualmente existentes fue creada por Dios separadamente). El nuevo pensamiento poblacional concibe las poblaciones como constituidas por individuos únicos, lo cual posibilita precisamente el

⁵⁶⁰ Humphries, C. J., y Lynne R. Parenti. *Cladistic Biogeography: Interpreting Patterns of Plant and Animal Distributions*. Oxford: Oxford University Press, 1999.

⁵⁶¹ Fitch, Walter M., y Ayala Francisco José. *Tempo and Mode in Evolution: Genetics and Paleontology 50 Years after Simpson*. Washington, D.C.: National Academy Press, 1995.

⁵⁶² Mayr, Ernst. *Animal Species and Evolution*. Cambridge: Belknap Press of Harvard University Press, 1963.

⁵⁶³ Hull, D., "The Effect of Essentialism on Taxonomy: Two Thousand Years of Stasis", *British Journal for the Philosophy of Science*, 15: 1965. pp. 314–326, 16: pp. 1–18.

nacimiento del evolucionismo⁵⁶⁴ ⁵⁶⁵. El pensamiento poblacional valora que la materia prima de la evolución son las pequeñas variaciones dentro de una misma especie.

El pensamiento tipológico implica un ideal dentro de la especie, un individuo perfecto del cual derivan el resto siendo copias imperfectas del mismo. Mayr asocia esta filosofía a la esencia de Aristóteles, a la idea de la auténtica verdad de Platón, la idea del individuo representante de la especie. Ese mismo pensamiento también procura un carácter separatista de las ramas del evolucionismo, preocupándose dramáticamente del origen, de la clasificación. En el caso de la arquitectura, ¿cómo sería ese edificio idílico de medidas perfectas? ¿Cuándo las ecuaciones están bien definidas y solo hay que rellenar los parámetros? ¿Cuál de las soluciones es la adecuada? Valores máximos, optimización en base a un aspecto, la decisión de dicho aspecto, la media de los posibles individuos... ¿Cómo se representa una especie arquitectónica?

El pensamiento poblacional, que aparece a mediados del siglo XIX, contempla todos los individuos por igual, siendo los extremos tan validos como la moda. Puede darse, y se da, que extremos de diferentes especies están más próximos que algunos individuos de una misma especie. Diferentes especies pueden acabar en un punto común hasta llegar a habilitar la reproducción sexual entre ellas unificando dos especies en una nueva. El mismísimo Darwin llegó a pensar que no existían las especies y eran convenciones humanas para separar en función de lo observado. Esta filosofía es recogida en posteriores capítulos por el filósofo De Landa en su valoración hacia una arquitectura algorítmica y evolutiva. Muestra de ello es la evidencia de que diferentes especies biológicas han acabado solucionando el mismo problema -los murciélagos, mamíferos voladores que modificaron sus extremidades en una forma muy similar a las aves, por ejemplo-. O con diferentes objetivos, acabaron desarrollando la misma herramienta. La visión tipológica supone pues una forma sesgada poco adecuada para el desarrollo de nuevas formas donde una etiquetación cerrada se empeña en acotar valores que oscilan y parpadean en diferentes partes de la escena arquitectónica.

Pocos años más tarde, Michael Ghiselin y David Hull proponen que las especies NO son tipos universales, sino “individuos históricos”. Homo sapiens, es un linaje de homínidos que comienza y se extingue en un determinado momento y espacio. Y su distribución de variaciones, sigue la archiconocida campana de Gauss provocando variaciones susceptibles de ser aisladas durante el tiempo suficiente como para originar una nueva especie. Las especies son entidades biológicas que cambian y cuyos bordes son difusos.

Biologists offer various definitions of the term ‘species’ (Claridge, Dawah, and Wilson 1997). Biologists call these different definitions

⁵⁶⁴ Nuño, Laura. *The concept of form in contemporary biology*. Madrid: Universidad Computense de Madrid, Université Paris 1-Sorbonne, 2012. Tesis.

⁵⁶⁵ Nuño, Rosa. “Pensamiento tipológico y pensamiento poblacional.” *Laurang-wordpress*. Consultada 26 de Abril, 2010. <https://laurang.wordpress.com/2010/04/11/pensamiento-pensamiento-tipologico-y-pensamiento-poblacional/>

'species concepts.' The Biological Species Concept defines a species as a group of organisms that can successfully interbreed and produce fertile offspring. The Phylogenetic Species Concept (which itself has multiple versions) defines a species as a group of organisms bound by a unique ancestry. The Ecological Species Concept defines a species as a group of organisms that share a distinct ecological niche. These species concepts are just three among over a dozen prominent species concepts in the biological literature.⁵⁶⁶

En cuanto a la arquitectura esto abre un debate realmente interesante. ¿Ha de clasificarse la arquitectura "biodigital" por su aspecto final -fenotipo-? ¿por los comandos que le han dado forma -genotipos-? ¿por la metodología o el proceso usado -entorno-? Proyectos completamente diferentes pueden acabar desembocando en una geometría muy similar, siendo las razones para escoger un mismo comando o proceso muy diferentes de uno a otro. Entender el proceso, la intención del edificio, el motivo por el cual se articula de determinada manera es necesario para valorar su adecuación y éxito, así como a qué sub-especie pertenece.

Pero esto no ha de considerarse únicamente dentro del marco "biodigital", sino que su mayor peligro está en su externalización, y en la evaluación de la estética. Cuando proyectos racionales y de autor -en un proceder más próximo al movimiento moderno- se "tapan y visten" de digitales aparentan ser más de una especie que algunos propios que no exhiben una fachada digitalmente fetichista. De hecho, algunos de los experimentos de esta tesis -como por ejemplo la evolución de la manzana del ensanche de Ildefons Cerdà- tienen como resultado aspectos poco orgánicos o complejos y sin embargo, suponen arriesgadas aproximaciones a la manera de proyectar evolutiva. Por supuesto, los proyectos más puristas llevarán sus ideologías desde la filosofía inicial hasta el acabado de las carpinterías, convirtiendo el proyecto en un bello alarde de coherencia proyectual.

No obstante, la hibridación entre la arquitectura más corriente y la biodigital expone una serie de contrapuntos preocupantes: los procesos y motivaciones de los proyectos frecuentemente quedan ocultos o desconocidos convirtiendo al fenotipo, al resultado, en el mayor representante de juicio y valoración. Los procesos "biodigitales" aplicados en momentos más tardíos de diseño suelen implicar más superficialidad pero más apariencia, sintiéndose próximos a esa idea del individuo perfecto de la especie. Si esos mismos procesos se aplicasen al inicio del proyecto podrían diluirse sin dejar rastro resultando en un edificio que pocos tildarían de "biodigital". La falsedad tipológica se torna más engañosa si cabe debido a la carismática forma de los procesos inspirados por la naturaleza.

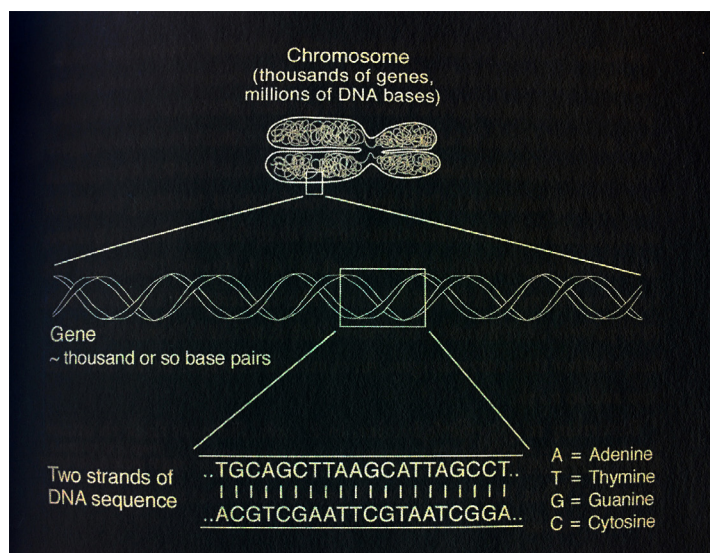
3.2.2. Desarrollo (biológico)

Evolución y desarrollo: los dos aspectos que intervienen en la forma de los seres vivos. Si no nos sorprende que una célula se transforme en un ser completo (con miles de millones de células) ¿por qué nos sorprende tanto la evolución? No es más que una falta de imaginación⁵⁶⁷. En la historia de la evolución, “selección” suele ser más desarrollada y valorada que “variación”. Darwin basó la teoría de la evolución en mutaciones aleatorias, y en selección no-aleatoria. En el mismo periodo Mendel sacaría a la luz las propiedades hereditarias de los seres vivos, trabajo que más tarde sería recuperado durante el s. XX para establecer las bases de la genética y culminar en el descubrimiento del ADN por Avery y su estructura de doble hélice por Watson y Crick. En la actualidad, se conoce la relación directa de los genotipos y los fenotipos, y se sabe que las mutaciones en el primero provocan variaciones en el segundo.

041. /// Esquema de Cromosomas, genes y ADN. Sean Carroll, 2005. p. 45.

El desarrollo de los seres vivos -y los inertes- abarca un sinfín de estrategias geométricas que dan lugar al fascinante abanico de formas que habitan tierra, mar y aire. Con el fin de acotar la tesis apropiadamente estas estrategias no se estudiarán⁵⁶⁸. El objetivo de la tesis es trabajar con los procesos más básicos en el desarrollo de la forma, previos a que formen estrategias distinguibles según su resultado. Ello no implica que alguna de esas estrategias se utilice puntualmente en algunos de los ejercicios o que se mencionen por su importancia matemática y computacional durante la comparación desarrollo-computacional. Inevitable también, citar los primeros vocetos de Ernst Haeckel⁵⁶⁹ y el libro de D'Arcy Thompson⁵⁷⁰, un clásico que incorporó las leyes físicas y geométricas en el mundo de la biología

y cuya influencia ha sido -y sigue siendo- notable en campos que van desde lo biológico hasta la arquitectura (ya descrito en el cap. 2.4). El trabajo de D'Arcy Thompson (cuya primera edición se remonta a 1917) pone de manifiesto que las fuerzas que modifican e influyen el crecimiento biológico no son diferentes a las que rigen los procesos de formación de fenómenos físicos y que pueden encontrarse puntos en común que han inspirado proyectos de ‘form finding’



⁵⁶⁷ Huxley, Thomas Henry, y Ashley Montagu. *Man's Place in Nature*. Ann Arbor, MI: University of Michigan Press, 1959.

⁵⁶⁸ El lector puede consultar la clasificación de los experimentos de Stephen Wolfram o las clasificaciones de la publicación 'Adaptive Ecologies' como punto de partida para este tema.

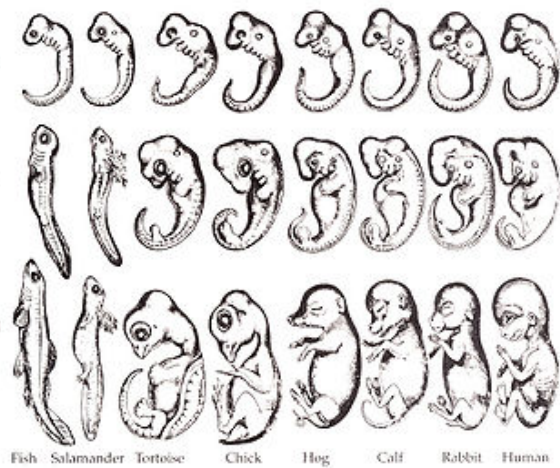
⁵⁶⁹ Estos bocetos fueron desacreditados por ser considerados intencionados y trasgiversados pero información posterior en esta tesis corroborará sus tendencias acertadas en relación a procesos como la alometría.

⁵⁷⁰ Thompson, D'Arcy Wentworth. *Growth and Form*. Cambridge: Cambridge University Press, 1942.

posteriormente. Sí que se mencionaran -y son coincidentes con algunos de los puntos de Thompson- algunos de los mecanismos de modularidad para explicar algunos de los aspectos embriológicos. Arquitectónicamente, una de las manifestaciones más evidentes del trabajo de Thompson puede hallarse en los ensayos sobre las obras de Buckminster Fuller, Pierre Teilhard de Chardin, y Frei Otto⁵⁷¹.

La razón de ser de este capítulo se debe a recientes investigaciones que han descubierto que los genes que controlaban el desarrollo del cuerpo de la mosca son muy similares a criaturas totalmente distintas. El resultado es que moscas y humanos comparten una gran cantidad de genes y que somos virtualmente idénticos a los monos a nivel de ADN. Sin duda esto arroja serias dudas sobre la supremacía del hombre respecto a otras especies⁵⁷². Estas investigaciones han devuelto la importancia a ciencias como la embriología y han conformado un nuevo tándem: la ciencia de Evo-Devo (evolutionary developmental biology⁵⁷³).

042. /// Romanes, *Bocetos de embriones*, 1892. Armand Leroi, 2003. p. 59. Copia de los bocetos fraudulentos sobre embriones de Ernst Haeckel.



La importancia de Evo-Devo es notable. Primeramente por continuar con la síntesis de la teoría evolucionaria. Evo-Devo ha provisto de una pieza crítica a la síntesis moderna -a través de la embriología- y la ha integrado con la genética molecular. Las evidencias presentadas son de una calidad y profundidad sin precedentes. Segundo, porque facilita la enseñanza de la evolución a través del drama de la forma, ilustrando los cambios de los genes en la unidad y la diversidad de la forma. La expresión de esos patrones genéticos se hacen patentes en embriones de diferentes especies. Y finalmente, porque el entendimiento del proceso evolutivo, trasciende la filosofía y e impacta directamente en el futuro del ser humano⁵⁷⁴.

Organismos multicelulares (‘selfsignaling’)

Ya sea desarrollo, crecimiento o multiplicación, históricamente lo complejo ha requerido de “subpartes”. Sistema frente a individuo, partes frente a todo, y como tal la aparición de los seres multicelulares abrió el camino hacia la abrumadora situación actual. Sorprendentemente, lo que a priori ha sido

⁵⁷¹ Bonnemaison, Sarah, y Philip Beesley. *On Growth and Form: Organic Architecture and beyond*. Halifax: TUNS Press, 2008.

⁵⁷² Carroll, Sean B. *Endless Forms Most Beautiful: the New Science of Evo Devo and the Making of the Animal Kingdom*. Nueva York: Norton, 2005. pp.9-10.

⁵⁷³ *Ibidem.*, p.9.

⁵⁷⁴ *Ibidem.*, p.283.

considerado un salto gigantesco en la historia de la biología y el desarrollo, ha resultado no serlo tanto⁵⁷⁵: el cambio de un ser unicelular a uno multicelular puede ocurrir de varias maneras a través de la mutación de un único gen. Si el proceso tuvo origen hace 2.1 mil millones de años, se cree que ha ocurrido de forma independiente más de veinte veces. No obstante parece que esa transición no ha tenido lugar en los últimos 200 millones de años, al menos de manera natural⁵⁷⁶. Resulta interesante la lógica que sigue este proceso para llevarse a cabo. Crear seres multicelulares no es introducir una nueva habilidad en el ser vivo, sino alterar una existente: la subdivisión fallida de una célula, mediante el gen que controla la separación de las células después de su división. Estos experimentos llevados a cabo por el doctor Herron⁵⁷⁷, no solo han demostrado lo anterior, sino que probablemente esto se debiese como respuesta a otros seres unicelulares depredadores que no podían devorar seres pluricelulares debido a su tamaño.

Como se apuntará más adelante, la causa probable de estos sucesos son las mutaciones. Se ha advertido que deformaciones como la cyclopia⁵⁷⁸ y serenomelia (ciclopes y sirenas) se producen como falta de distancia entre los elementos de la cara -los ojos- o en la parte inferior del cuerpo -las piernas-, regulados por los genes mutados⁵⁷⁹. Geométrica o arquitectónicamente, el concepto es igualmente simple: la superposición. La copia y multiplicación de los elementos no adquiere distancia suficiente, y sus formas definirán espacios de unión que pueden o no recibir un tratamiento diferente.

El patrón -el mapa- morfogenético que permite que las células desarrollen formas concretas cuando se multiplican esta embebido en cada una de las células, las cuales se comunican para entender su situación y “cambiar” en consecuencia con las instrucciones. Este comportamiento para cobrar consciencia de su posición y comunicarse entre ellas se llama ‘selfsignaling’ o ‘signalling molecule’ (ejemplos como el gen Noggin o Chordin se explican en el capítulo sobre mutaciones⁵⁸⁰), y sirvió para inspirar uno de los proyectos (arquitectónicos) que se presentaron en la 2nd International Conference of Biодigital Architecture and Genetics y, más tarde, también en el eCAADe 2015⁵⁸¹. El “extraño” autoreconocimiento de las células biológicas y su respuesta al entorno -los obstáculos que encuentra el crecimiento de plantas, aun cuando

⁵⁷⁵ Holmes, Bob. “One gene may drive leap from single cell to multicellular life” *New Scientist*. Consultada 30 de junio, 2015. <https://www.newscientist.com/article/dn27762-one-gene-may-drive-leap-from-single-cell-to-multicellular-life>

⁵⁷⁶ Holmes, Bob. “Lab yeast make evolutionary leap to multicellularity.” *New Scientist*. Consultada 30 de junio, 2011. <https://www.newscientist.com/article/mg21028184-300-lab-yeast-make-evolutionary-leap-to-multicellularity/>

⁵⁷⁷ ‘Matthew Herron is a Research Assistant Professor working in the Rosenzweig lab. His main interest is in the evolution of multicellularity, which he studies using theoretical, comparative, y experimental approaches. Current work involves experimental evolution of multicellularity in *Chlamydomonas reinhardtii*’.

⁵⁷⁸ Algunas toxinas como el alcohol aumentan en un 200% la posibilidad de tener hijos ciclopes.

⁵⁷⁹ Leroi, Armand Marie. *Mutants: On Genetic Variety and the Human Body*. Nueva York: Viking, 2003. p. 78.

⁵⁸⁰ *Ibidem.*, p. 42.

⁵⁸¹ Frederico FIALHO. *Biology, Real Time and Multimodal Design*. eCAADe, 2015. Conferencia.

ese obstáculo son ellas mismas- supondrá en capítulos posteriores una de las dificultades más importantes a nivel computacional, pues exige colisión de cuerpos -y por tanto físicas- en tiempo real.

Embriología ('switches' y 'homeobox')

La embriología estudia el proceso natural mediante el cual la representación genética en el interior de una única célula (zigoto) controla el desarrollo (el *devo*) de esa célula hasta formar un organismo multi-celular. Este proceso permite a un organismo extremadamente complejo (fenotipo) ser producido a partir de un "set" relativamente simple de instrucciones (genotipo). Este fenómeno se lleva a cabo mediante la división de células que proliferan hasta completar el organismo⁵⁸². Todas y cada una de las células que conforman un ser pluricelular contienen la misma información genética, sus diferencias se deben al estado relativo en el cuerpo y su entorno. El intercambio entre genotipo y fenotipo es constante, creando un mapeado extremadamente complejo.

La información genética contenida en las células (el ADN) produce proteínas, encargadas de las reacciones y trabajos en los procesos químicos en el cuerpo. Largas cadenas de ADN conforman todos y cada uno de los genes, pero solo el 1.5% de ellas es capaz de producir casi todas las proteínas necesarias. ¿Que hay en el resto del ADN? Las investigaciones científicas apuntan a que el 3% es "regulatory": dice cuánto, cuándo y cómo se hace el resto de los genes. Este ADN contiene las instrucciones para construir la anatomía y los cambios evolutivos en él, lleva a la diversidad de forma.

La biodiversidad no es tanto sobre qué y cuantos genes sino de cómo los usas. "it's the way you use it" (Eric Clapton). Depende más de en qué momento se encienden y se apagan⁵⁸³. SEAN CARROLL

Los grupos de genes que resultaron ser responsables de la forma de la mosca de la fruta⁵⁸⁴ (homeogenes/homeodomain que llamaron homeobox o hox) resultaron ser los mismos que en el resto de los animales. Esto supone un hallazgo de gran importancia. Estas partes son sustituibles e intercambiables, puede añadirse el gen responsable del tejido del ojo (Pax-6, otro homeodomain) de la mosca en otra parte del cuerpo y aparecerá dicho tejido. Y puede intercambiarse con otros animales (los cuales también tienen el Pax-6) y seguirá funcionando, solo que el ojo siempre será el del propio animal y no el del animal al que se le extrajo el gen/es.

Mientras que los homeogenes definen el qué, otros genes marcan el dónde:

⁵⁸² Bowers, Chris. *Design By Evolution: Advances in Evolutionary Design*. Berlin: Springer, 2008. pp. 243-263.

⁵⁸³ Carroll, Sean B. op. cit. 2005. p.11.

⁵⁸⁴ Los experimentos se desarrollaron sobre esta especie por su propensión a las mutaciones.

los 'switches' (o interruptores) suponen un 2 o 3% de toda la materia oscura, de la cual se piensa que mucha de ella solo es "basura" acumulada a lo largo de la evolución. Los 'switches' dan lugar a patrones de actuación. Pueden haber fácilmente 10 o más 'switches' controlando un único gen, para que se manifieste en diferentes sitios y momentos del desarrollo. El gen BMP5 produce cartílago y hueso pero es solo el uso de los 'switches' el que le permite crear las distintas partes que conforma (vértebras, costillas, nariz, esternón...) Al final, los genes son casi los mismos para todos los animales, y no son demasiados (25,000 para un ratón o humano). Son los 'switches' los que hacen que el mismo gen pueda dar lugar a un dedo gordo o un ala. Estos descubrimientos refuerzan la idea de un sistema universal que logra crear variedad como consecuencia de su reorganización, y no mediante la aparición o la invención de nuevos genes. Las bases de la evolución han estado presentes desde siempre, las piezas actuales son las mismas que hace millones de años, solo que siguiendo diferentes patrones -secuencias distintas-. Ello embarca al ser humano en la búsqueda de un "kit básico de herramientas" que puede ser usado y recombinado para generar cualquier ser vivo. Actualmente, las dificultades que se enfrentan no son encontrar los elementos que expresan o crean cosas, sino saber "quien" los organiza entre ellos y los activa o desactiva.

A near infinitude of particulars which have to be sorted out case by case (por la variedad y diferencia). GUNTHER SENT

Los complejos dibujos de una mariposa pueden parecer caóticos, pero la investigación y mirada concienzuda revela una serie de patrones, elementos que varían dentro de unas celdas que corresponden con las venas. ¿Qué conforma la geometría de las mariposas? 'scales' (escamas minúsculas en forma de "polvillo"), coloración y sistemas de patrones geométricos. Cada puntito de 'scale' es monocolor (como si de un pixel se tratase), y resultan ser "antiguas antenas atrofiadas", sensores por así decirlo, que resultan útiles para escaparse de las pegajosas telarañas⁵⁸⁵. Los colores funcionan como una pintura puntillista, como los leds de un televisor. Diferentes escalas revelan diferentes colores. Los mismos genes definen la forma de un dinosaurio y la mancha de una mariposa, su posición, un pequeño cambio en el origen puede desencadenar grandes cambios.

What is true for E.Coli is also true for the elephant⁵⁸⁶. JACQUES MONOD

Igualmente, en la mayoría de los casos la producción de unas proteínas u otras se basan en "interruptores"/'genetic switches' que se activan mediante la presencia de unas u otras sustancias gracias al proceso de 'selfsignaling' mencionado anteriormente.

La metodología del desarrollo no deja de sorprender e igual que la lógica de la computación aporta nuevas formas de pensar, también la de los genes abre la mente a nuevas estrategias. Por ejemplo, la formación de miembros (limbs),

⁵⁸⁵ Carroll, Sean B. *op. cit.*, 2005. p.204

⁵⁸⁶ *Ibíd.* p. 57.

especialmente la de los dedos, está marcada por la muerte. Las células intermedias entre los dedos son eliminadas para dar lugar a cinco (u otro número) de miembros. Junto a otros ejemplos, se discierne que la naturaleza trabaja con capas solapadas, simples, en oposición a un único e intrincado diseño: una malla homogénea de células, es súper puesta por un patrón de eliminación, y no un gen que da instrucciones de hacer crecer cinco miembros separados en forma de dedos... No son términos ajenos a la arquitectura: la destrucción del espacio, la creación del vacío⁵⁸⁷...

Otro ejemplo es el uso del color negro, cuyo comportamiento difiere respecto al resto de colores. Esta tonalidad se basa en el uso la melanina (los pigmentos de melanina son complejos polímeros químicos). Algunos animales, como es el caso de la pantera⁵⁸⁸, sufren una mutación en un aminoácido dentro de una proteína que les produce su característico pelaje negro. El negro se tiñe sobre las manchas, no es q sean “solo” negros. Es decir, varios genes controlan el color, al menos uno en relación al tono cromático y un segundo que puede activar la melanina o no. Por tanto se trata de una superposición de patrones.

To explain the complicated visible by some simple invisible. JEAN PERRIN

Mutaciones ('hopeful monsters')

Junto a la selección natural y la recombinación de genes, la mutación es el tercer factor clave en el logro de lo Evo-Devo. Gracias a ella, se lograrán resultados que no podían contemplarse o no eran accesibles con el esquema de herramientas inicial. Las mutaciones logran que cualquier cosa sea posible. Se ha mencionado con antelación en el capítulo sobre Evolución Biológica que son cambios aleatorios (o errores en la copia) que se producen en el ADN, normalmente como consecuencia de la exposición a radiaciones o toxinas. Las tipologías y características propias de las mutaciones son muchas y variadas, ofreciendo múltiples posibilidades de recombinar la información. Se recogen aquí las siguientes⁵⁸⁹:

- En base a su efecto: negativa (cáncer), neutrales (ojos azules) o positivas (resistencia a enfermedades). A nivel computacional son más positivas que negativas, biológicamente lamentablemente suele ocurrir lo contrario.
- Dominancia: recesivas (necesitan que padre y madre las expresen en el fenotipo, pero pueden ser portadas a través del fenotipo si cualquiera de los dos la posee) o dominantes (siempre se expresan en el fenotipo).
- Según estructura morfológica afectada: molecular (ADN), cromosómico (cambia el tamaño de un gen), o genómico (cambia el

⁵⁸⁷ Carroll, Sean B. *op. cit.*, 2005. p. 103.

⁵⁸⁸ La pantera es una variación del leopardo (*Panthera pardus*) o del jaguar (*Panthera onca*) que sufre melanismo.

⁵⁸⁹ Leroi, Armand Marie. *Mutants: On Genetic Variety and the Human Body*. Nueva York: Viking, 2003. p. 14.

número de cromosomas).

- Gémicas o somáticas (siendo las primeras heredables y las segundas no).

Particularmente los tipos de recombinación de estructura molecular y cromosómica incluyen:

- Sustitución, inversión, traslocación, desfasamiento.
- Delección, inversión, duplicación, traslocación, isocromosomas.
- Genómicas: euploidía, aneuploidía, trisomías, monosomías.

Por las extrañezas que producen, las mutaciones suelen ser fácilmente identificables (al menos, saber que han tenido lugar) facilitando que mediante lógica-inversa, puedan arrojar luz sobre la información que falta -o que sobra- en un organismo. Históricamente, el registro de deformaciones humanas ha permitido que el ser humano mismo, sea una de las especies que más ha aportado a la comprensión de este fenómeno. Por la importancia y repercusión que tiene sobre la humanidad, y por la inherente proximidad, muchas de las menciones aquí expuestas giran alrededor del ser humano, basadas en el libro de Marie Leroir, “Mutants: On Genetic Variety y the Human Body”.

To learn from animals alone is to run the risk of an error [...] We must approach the human body more circumspectly, we must find mutants⁵⁹⁰. ARMAND LEROI.

El genoma humano está compuesto de 3 mil millones de pares, y todos coincidimos en el 99,9% (esos pocos millones son todas las diferencias que nos distinguen). Para sorpresa de muchos, cada individuo lleva 100 mutaciones nuevas además de las que ha heredado de sus padres. ¡Todos somos mutantes! Por ello, la mutación puede formar parte de manera constante del desarrollo de la vida y sus repercusiones pueden ser muy leves, siendo innecesario que mutación sea sinónimo de deformidad o monstruosidad. Uno de los primeros ejemplos de bibliografía ilustrada que recogen deformaciones data de 1557, escrito por Conrad Lycosthenes: Prodigiorum ac ostentorum chronicon (capítulo: The Doome, calling all men to judgement) Más tarde Francis Bacon clasificará la historia natural en: Freedom of Nature, Errors of Nature, y Bonds of Nature. Es decir, lo natural, lo aberrante y lo manipulado por el hombre. Y animará a la colección de “monstruos”:

The monstrous, the strange, the devian, or merely the different, reveal the laws of nature. and once we know those laws, we can reconstruct the world as we wish. FRANCIS BACON

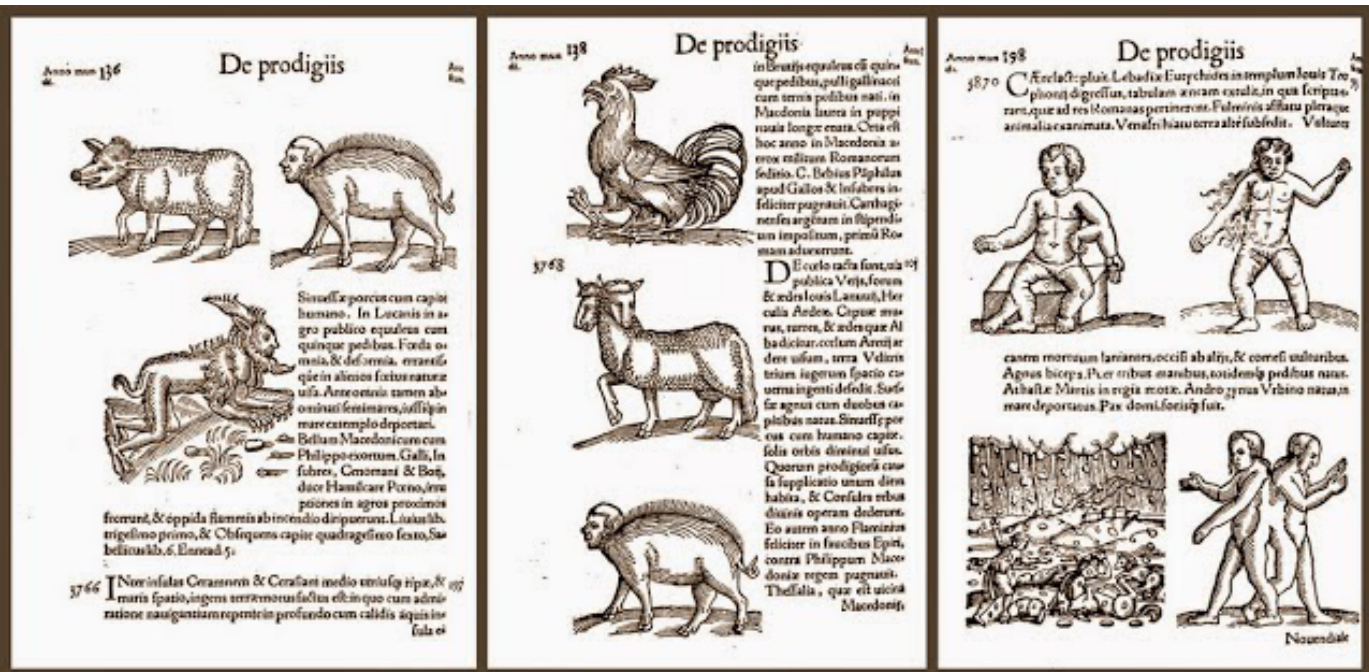
En 1706 Joseph-Guichard Duverney, tras diseccionar una segunda pareja de gemelos siameses estaba completamente seguro que tal perfección y combinación de elementos no podía sino ser obra del señor, de la misma forma que cualquier nacimiento lo era. La deformidad no era sino una prueba de su omnipotencia. ¿Cuál era la probabilidad de que al estrellar dos relojes

⁵⁹⁰ Leroir, Armand Marie. op. cit., 2003. p. XV.

quedasen unidos con semejante gracia, compartiendo usos y uniones mientras funcionaban al unísono? Por supuesto, otros considerarían esto ridículo: los monstruos no eran evidencia de diseño divino, sino meros accidentes. Este conflicto entre dos posiciones tan radicales será conocido como la ‘querelle des monstres’.

Los siglos XVIII y XIX se verán acompañados de numerosas colecciones a lo largo del globo que reúnen los “horrores” de la naturaleza y que sirven para descubrir poco a poco los puntos en común que los relacionan⁵⁹¹: ‘Willem Vrolik’s anatomical collection’ en Ámsterdam; ‘Gordonc collection en Londres’s Guy’s y St Thomas’s Hospital; ‘Hunterian collection’, de la ‘Royal College of Physicians and surgeons’; la colección ‘Mütter’, en Filadelfia; y en París el ‘Muséum d’Histoire Naturelle’, la ‘Orfila’ y el ‘Dupuytren’. Sus ejemplares dejan poco lugar para la duda, y muchos se postulan como el origen de gran cantidad de mitos: los ciclopes, los esciápodos (o monóscelos, criaturas con un solo pie sobredimensionado), enanos/pigmeos, cinocéfalos (personas con cabeza de perro), amén de muchas otras sin nombre propio⁵⁹².

043. /// Páginas del manuscrito Prodigiorum ac ostentorum chronicon. Armand Leroi, 2003. p. 14.



La discusión no era meramente teológica, sino que influía en la manera de pensar la creación, el nacimiento. Los primeros, preformacionistas, creían en huevos/esperma que contenían infinitamente los futuros huevos de toda la humanidad. Los otros, creían en que la forma emergía espontáneamente en el momento de fecundar. Ambas filosofías coincidían parcialmente con lo que se considera hoy científicamente cierto: si bien hay un traspaso a través de las

⁵⁹¹ Leroi, Armand Marie. op.cit. 2003. p. 66.

⁵⁹² Ibidem. p. 69.

generaciones de información en el ADN, nada está decidido hasta el momento de la fecundación y los resultados son afectados por multitud de aspectos⁵⁹³.

Entre los años 1921 y 1923 experimentos realizados por Hilda Pröscholdt arrojarían luz sobre tejidos que eran capaces de organizar las células. Los 259 trasplantes de células (de los cuales solo sobrevivieron 6) que Hilda acometió tenían la particularidad de combinar diferentes especies de tritones. Con todo los mellizos no eran de especies diferentes: la célula huésped no producía un individuo nuevo sino que ampliaba la información y desarrollo de la célula anfitrión. A pesar de la importancia de este descubrimiento la ciencia del desarrollo fue incapaz de encontrar el ‘morphogen’ considerando el problema como intratable en los años 60. No será hasta los años 90 con la tecnología de recombinación de ADN que se lograría identificar el gen ‘noggin’. Noggin es una ‘signalling molecule’, una molécula que comunica las células entre ellas para saber su posición y futura identidad. Una célula puede recibir varias y contradictorias señales de diferentes fuentes (BMP4 Bone Morphogenetic Protein) en cuyo caso atenderá a aquella que se encuentre con mayor frecuencia/densidad. Si el noggin se encarga de la formación de huesos y columna vertebral cabría esperar que la ausencia de él produjera un ser horrible o “algo” que no viviría durante mucho tiempo o hasta nacería muerto. Este no es el caso. Debido a que otro gen (chordin) parece desempeñar la misma tarea. Es lo que se entiende como genes redundantes (su entendimiento aun no es completo desde la parte genética). Eso sí, la ausencia de ambos producirá deformaciones orgánicas catastróficas y una criatura que no llegará a nacer (y probablemente no llegue a vivir desde un inicio)⁵⁹⁴.

Los genes homeóticos (homeobox) mencionados en el anterior capítulo fueron descubiertos a raíz de las mutaciones que provocaban resultados “desordenados” en los miembros de las moscas. En las docenas de mutaciones que se han encontrado durante los últimos años en las moscas, eliminando algunas de sus partes o sustituyéndolas (patas en ojos, antenas en alas...) se ha deducido que la mosca posee 8 genes homeóticos. Estos genes son las variables que definen cada uno de los segmentos. Los genes homeóticos (homeotic genes) son los encargados de identificar el ‘body plan’⁵⁹⁵ del organismo, de dar identidad a los diferentes segmentos. Estos genes permiten a las células calcular su posición en el “océano del organismo”. Los genes reciben el nombre en honor al biólogo británico William Bateson⁵⁹⁶, quien fue el primero en identificar el fenómeno de la Homeosis (enfermedad que altera los genes homeóticos)⁵⁹⁷.

El lenguaje químico, proteínico y molecular que aparentemente resulta tan alejado del lenguaje arquitectónico (y computacional), finalmente acaba sintetizándose de manera magistral en algo mucho más sencillo:

⁵⁹³ Leroi, Armand Marie. op.cit. 2003. p. 30.

⁵⁹⁴ *Ibidem*. p. 42.

⁵⁹⁵ El body plan es la subdivisión, el mapeado del organismo. Se extenderá este concepto en el próximo capítulo.

⁵⁹⁶ Bateson, William. *Materials for the Study of Variation, Treated with Especial Regard to Discontinuity in the Origin of Species*. Londres: Macmillan, 1894.

⁵⁹⁷ Leroi, Armand Marie. op. cit. 2003. pp. 85-88.

*The segmental calculator is a thing of beauty. It has the economical boolean logic of a computer programme*⁵⁹⁸. ARMAND LEROI

Y escribe:

- IF ultrabithorax is PRESENT
- AND all other posterior homeotic proteins are ABSENT
- THEN third thoracic segmente: HALTERE

Encontramos de nuevo puentes entre las leyes que rigen la naturaleza y nuestro mundo computacional, haciendo más verosímil si cabe su replicación. Estas lógicas (o condicionales) se usarán en posteriores experimentos de esta tesis para activar o desactivar modificaciones dentro de la forma del proyecto, permitiendo expresar mutaciones, definir patrones, o establecer límites muy concretos⁵⁹⁹.

A nivel computacional, conceptual, y reiterando lo ya descrito, una mutación es un cambio o modificación sobre la base original y que altera el resultado por defecto. Normalmente, si un “gen computacional” está definido por un rango de números posibles (por ejemplo del 2 al 6) y se expresa como uno concreto. En una población de individuos formados por un único gen que se expresa únicamente como 2, 3 y 6 sería imposible que apareciera ninguno de los otros números (4 o 5). No existen y la recombinación solo producirá indefinidamente doses, treses y seises. Únicamente la mutación puede alterar, empujar, esos valores hacia números fuera de la población permitiendo acceder a individuos nuevos, como un 5. La fuerza de la mutación indica cuán lejos puede estar el nuevo resultado respecto al original. No obstante, la mutación no puede superar los límites del rango del gen (no puede materializarse como 1, 7, o mayor). Esos límites probablemente están ahí debido a incompatibilidades o por certeza de que el resultado buscado está dentro del rango, así que valores externos no tendrían ningún efecto beneficioso.

Las mutaciones representan uno de los aspectos más importantes de la emergencia. Su imprevisibilidad y capacidad de innovación quedan fuera de toda previsión, convirtiéndolas en un elemento de alta creatividad. De acuerdo a Greg Lynn⁶⁰⁰, sobre el trabajo del matemático y filósofo Edmund Husserl⁶⁰¹, la necesidad de mutaciones reiterativas en una forma perfecta es más importante que el ideal geométrico por sí mismo. No obstante, algunos miembros del ámbito arquitectónico-evolutivo son especialmente críticos con los varemos de mutabilidad. John Henry Holland defiende que se dan con extrema escasez, que el ADN trata de evitarlos y protegerse de ellos, y que la

⁵⁹⁸ Leroi, Armand Marie. op. cit. 2003. p. 88.

⁵⁹⁹ Leroi, Armand Marie. *Mutants: On Genetic Variety and the Human Body*. Nueva York: Viking, 2003. pp. 85-88.

⁶⁰⁰ Lynn, Greg. *Fold Bodies and Blobs: Collected Essays*, La Lettre Volée, 1998.

⁶⁰¹ Derrida, Jacques, y Edmund Husserl. *Edmund Husserl's Origin of Geometry, an Introduction*. Stony Brook, NY: N. Hays, 1978.

recombinación, el 'crossover'⁶⁰² es la base para construir⁶⁰³.

A continuación se recopilan algunas de las consideraciones y comentarios de Mike Weinstock durante el seminario de emergencia. Estos comentarios beben directamente de algunas de las referencias descritas en los primeros capítulos sobre Evo-Devo y por lo tanto se basan considerablemente en aspectos biológicos.

- Las mutaciones al comienzo de la secuencia darán lugar a mayores cambios que si están cerca del final. Una mutación temprana puede repercutir en las sucesivas generaciones creando una reacción en cadena. Igualmente, una mutación en estados primarios del embrión también provocará mayores deformaciones.
- Normalmente las mutaciones suelen producirse durante la estrategia de cruce o emparejamiento, no obstante se sabe que estar expuesto a ciertos elementos químicos de manera reiterada puede disparar genes recesivos en un momento determinado de tu vida. Arquitectónicamente bien podría implicar la modificación de espacios bajo determinados eventos (como por ejemplo un cambio de uso).
- Los seres vivos más simples (virus, amebas,...) que son de reproducción asexual son los más propensos a mutar. Por este motivo un constipado/fiebre puede mutar hasta tres veces en un mismo invierno. La simplicidad hace más aparente la mutación, mientras que en un organismo complejo es más probable que la mutación se disipe.

Respecto al primer punto, se introducirá en alguno de los ejercicios el proceso para representar lo que se considera macro-mutaciones. Este término fue acuñado en los años 40 por el biólogo Richard Goldschmidt, quien argumentaba que los organismos formaban nuevas especies cuando grandes mutaciones ocurrían en una única generación, creando lo que él llamaba "hopeful monster"⁶⁰⁴.

A pesar de la seriedad del tema, incluso las mutaciones que producen el cáncer pueden ser motivo de un avance positivo. Particularmente las células cancerígenas de Henrietta Lacks (1920-1951) cuya característica es la inmortalidad. Las células de Lacks, apodadas HeLa en su honor, se subdividen infinitamente permaneciendo vivas siempre y cuando dispongan de un cultivo apropiado. Por sus cualidades, son cultivadas y repartidas a lo largo

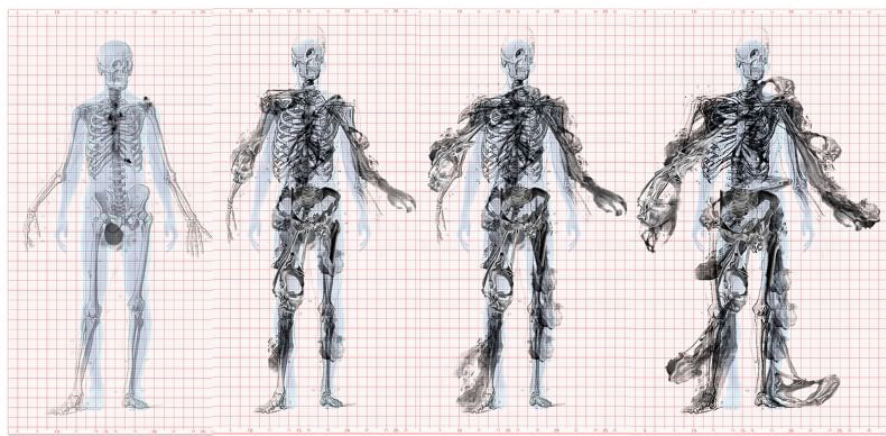
⁶⁰² El 'crossover' es la manera en la que se recombinan los genes hereditarios.

⁶⁰³ Spyropoulos, Theodore, Brett D. Steele, John H. Holland, Ryan Dillon, Mollie Claypool, John Frazer, Patrik Schumacher, Makoto Sei Watanabe, David Ruy, y Mark Burry. *Adaptive Ecologies: Correlated Systems of Living*. Londres: Architectural Association, 2013. p.25.

⁶⁰⁴ Un 'hopeful monster' o monstruo esperanzador hace referencia a la idea de que un individuo completamente distinto al resto de la población debido a una mutación desarrolle características positivas, abriendo un nuevo camino de desarrollo para la especie.

de todo el mundo para servir a experimentos científicos (billones de células que han superado en 400 veces el tamaño de la muestra original, en más de 70.000 experimentos en 2012) y han servido para desarrollar innumerables curas⁶⁰⁵. El cáncer, con todas sus connotaciones negativas, resulta ser una mutación sorprendente. Recientemente, se ha descubierto que las células de cáncer no son la acumulación de pequeñas mutaciones progresivas, sino que con frecuencia se dan durante intentos fallidos de división que producen cromosomas dobles y que son más propicios a sobrevivir durante fuertes mutaciones^{606 607}.

044. /// Irene Cheng, *Cancer-warped skeletons imagined for building design*, 2015. Imagen del artículo-web: Slezak Michael, 2014. Interpretación de la evolución del cáncer en huesos por Irene Cheng.



Formalmente, por su desarrollo incesante, el cáncer puede inspirar ejercicios como el de Irene Cheng en colaboración con el Dr. Issam Hussain y el Dr. Francesco Proto en la universidad de Lincoln, UK. Donde se hace una interpretación artística aunque fundamentada científicamente de la progresión del cáncer de huesos⁶⁰⁸. Una mutación con implicaciones estructurales y formales que atiende a como la estructura del cuerpo humano se

acomoda a situaciones de crecimiento explosivo y grandes cambios, y qué puede significar esto para edificios inspirados por la imperfección.

Topologías de cambio ('body-plan')

Todas las investigaciones anteriores deducen que el set de herramientas genético estaba ahí desde muy al principio. Los genes de los primeros seres primitivos son los mismos de los que dispone el ser humano. Con el tiempo ha ido aumentando el número de ellos, pero no los tipos. Los cambios evolutivos

⁶⁰⁵ Skloot, Rebecca. *The Immortal Life of Henrietta Lacks*. Nueva York: Crown Publishers, 2010.

⁶⁰⁶ Slezak, Michael. "Giant leaps of evolution make cancer cells deadly." *New Scientist*. Consultada 29 de enero, 2014. http://www.newscientist.com/article/mg22129533.100-giant-leaps-of-evolution-make-cancer-cells-deadly.html?full=true#.VY7Xs_ntlBc

⁶⁰⁷ Id., "Monster cancer chromosome is made from shattered DNA." *New Scientist*. Consultada 29 de noviembre, 2014. <http://www.newscientist.com/article/dn26530-monster-cancer-chromosome-is-made-from-shattered-dna.html#.VY7T4PntlBf>

⁶⁰⁸ Graham, Flora. "Cancer-warped skeletons imagined for building design." *New Scientist*. Consultada 29 de enero, 2015. <http://www.newscientist.com/article/dn26884-cancerwarped-skeletons-imagined-for-building-design.html#.VRmWphwgiiy>

han aparecido gracias a la evolución de los 'switches', es decir, el orden de los genes.

Biológicamente, el 'Big Bang' de la evolución es el periodo denominado 'Cambrian Explosion', donde en un periodo relativamente corto de tiempo se produjo una rápida diversificación de organismos macroscópicos complejos en los inicios del periodo Cámbrico, hace 542/530 millones de años. Gracias a los registros fósiles se ha observado que el equivalente a 150 millones de años de evolución se concentraron en tan solo 30⁶⁰⁹. A pesar de que no hay certeza, se especula que la explosión de la época Cambrian fue debido a un cambio ecológico que ofrecía nuevas oportunidades.

La comprensión de los 'switches' y los homeobox genes arrojan luz sobre el funcionamiento del desarrollo de la forma, su organización y repercusión. Son las herramientas que permiten a los seres vivos cambiar, transformarse. Pero estos "patrones" e "instrucciones" parecen obedecer a ordenes abstractas y con frecuencia repetitivas, difícilmente justifican cómo se producen los cambios o saltos Evo-Devo. ¿Cómo aparecen nuevas cosas en la evolución? ¿Es el ojo un pop-up (algo que aparece repentinamente de la nada)? ¿Qué uso puede tener medio brazo (mientras se desarrolla pero aún no es útil)? Estas preguntas suelen ser usadas desde la rama Creacionista para justificar el argumento del "relojero ciego". La respuesta está en la multitarea. Dos órganos distintos podían servir para lo mismo, permitiendo así que uno de ellos se especializase o cambiase. O al revés. Un mismo órgano puede servir para dos cosas, de forma que no deja de ser útil para la primera mientras aparece la nueva. Un animal puede seguir caminando mientras aprende a comer⁶¹⁰. Dicho de otra forma, es necesario un cierto nivel de redundancia (valor cuasi antagónico de lo óptimo) para permitir ese cambio, de alguna forma, el organismo se convierte en uno de los sistemas complejos mencionados en anteriores capítulos:

Un sistema complejo alberga más información de la necesaria -información redundante- con tal de añadir fuerza y cohesión al conjunto. Una cantidad de datos excesivamente optimizada (reducida al límite) debilita la red y puede producir colapsos encadenados⁶¹¹.

Se resumen las técnicas para la innovación evolucionaria en los siguientes pasos⁶¹²:

1 - Reutilización. La evolución cambia progresivamente sobre lo que ya tiene. Las alas no brotan de la nada. Los genes han estado siempre ahí desde el principio.

2 y 3 - Multifuncionalidad y redundancia. Las partes redundantes o partes que sirven para varias cosas favorecen la especialización y división de estructuras.

⁶⁰⁹ Lee, Michael S., Julien Soubrier, y Gregory D. Edgecombe. "Rates of Phenotypic and Genomic Evolution during the Cambrian Explosion." *Current Biology* 23, n° 19 (10) 2013. pp. 1889-1895.

⁶¹⁰ Carroll, Sean B. op. cit. 2005. p.167.

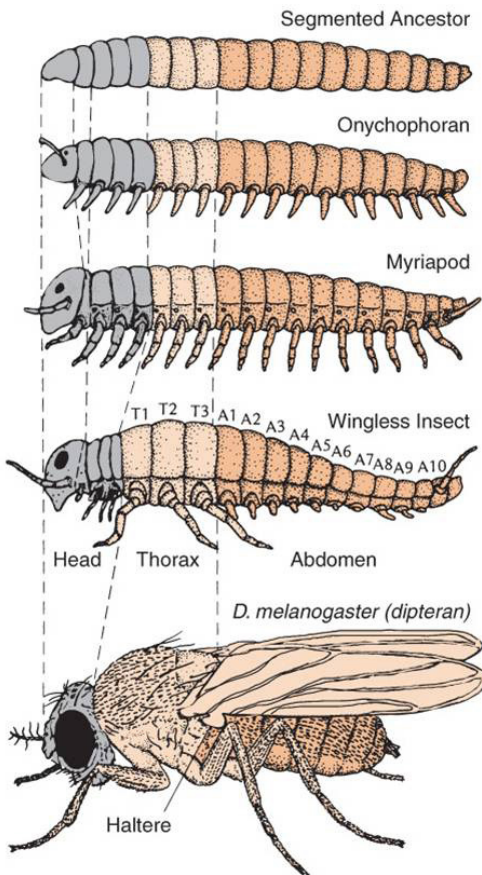
⁶¹¹ En esta tesis, capítulo "Emergencia y sistemas complejos"

⁶¹² Carroll, Sean B. op. cit. 2005. p.194.

4 - La modularidad de los artrópodos o de los esqueletos vertebrados con la ayuda de los 'switches' y la topografía de los embriones permite alterar partes sin afectar al resto del sistema.

A la luz de estos puntos y deducciones anteriores se hace patente la necesidad por subdividir el cuerpo y organizarlo en partes a fin de que la evolución y los genes puedan desarrollarse con la máxima flexibilidad. A esta subdivisión se le llama 'body plan'. El 'body plan' es la subdivisión y estructuración del organismo, el mapa que utilizan los 'switches' para indicar que genes deben aplicarse y cuáles no. Esta subdivisión no es estática, sino que puede darse en diferentes momentos del proceso, creando estructuras fractales, subdivisiones con memoria, que crean una intrincada estructura de información. También podemos referirnos al 'body plan' como la topología subyacente de las formas, el mapa regulador de los fenotipos. Biológicamente, el 'body plan' presenta una serie de características y tendencias (asociadas a los pasos de innovación evolutiva)⁶¹³:

045. /// Comparación de 'body plans' entre diferentes especies. Sean Carroll, 2005. p. 134.



- Arquitectura modular o segmentaria: apreciable en huesos de los vertebrados, o en fósiles de partes blandas para los invertebrados (Burgess Shale).

- Variaciones de una misma forma, con sus equivalentes en diferentes especies ('homology').

- Tendencia a menos partes y más especializadas (Samuel Williston⁶¹⁴).

- Simetría: mayormente bilateral, otros pentaradial (como el caso de erizos o estrellas marinas).

- Polaridad y orientación: en frente, atrás, principio y fin, etc.

La modularidad es uno de los aspectos más representativos del 'body-plan', gracias a la subdivisión pueden aplicarse cambios sin que alteren el desarrollo o funcionalidad de los demás, componiendo un único elemento a partir de distintos módulos -haciendo viable el 3er punto definido por Samuel Williston). Como ejemplo de aplicación puede destacarse las alas de los insectos, que provienen originalmente de las branquias. En un proceso considerablemente lento, los miembros se desarrollaron en animales que habitan un primer periodo dentro del agua y después fuera de ella (como por ejemplo las libélulas). Respecto a su ubicación, aerodinámicamente se sabe que es mejor tener las alas en la 2a y 3a parte del abdomen. De la misma forma se han desarrollado herramientas más especializadas como pueden ser pinzas o sierras en múltiples crustáceos, insectos o arácnidos. Siguiendo el sistema de expresión de interruptores homeóticos, se entiende ahora que no es que el gen

desarrollado herramientas más especializadas como pueden ser pinzas o sierras en múltiples crustáceos, insectos o arácnidos. Siguiendo el sistema de expresión de interruptores homeóticos, se entiende ahora que no es que el gen

⁶¹³ Carroll, Sean B. op, cit. 2005. p.134.

⁶¹⁴ Williston, Samuel Wendall. *Water Reptiles of the Past and Present*. Chicago: University of Chicago Press. 1914.

de las alas se dé únicamente en esas dos partes, sino que se expresa en todo el cuerpo y los interruptores se encienden únicamente en esas dos partes⁶¹⁵.

Profundizando, la modulación y la homología derivan o se unifican en un tercer concepto: la alometría, una característica biológica que se refiere a los cambios de dimensión relativa de las partes corporales correlacionados con los cambios en el tamaño total -deformaciones respecto a los estados iniciales-. El término alometría fue acuñado por Julian Huxley y Georges Teissier en 1936⁶¹⁶. Stephen Jay Gould⁶¹⁷ distinguirá en 1966⁶¹⁸ cuatro tipos de alometrías: la ontogenética, el filogenético, el intraespecífico y el interespecífico⁶¹⁹. La alometría es responsable de determinados cuernos en insectos, o del hecho de que los humanos nazcan con una cabeza relativamente grande respecto al resto del cuerpo. En términos evolutivos, la alometría ha dado lugar a diferentes especies modificando de distinta manera los mismos módulos (homología): las ballenas por ejemplo tienen un cráneo muy similar al humano originalmente, su deformación a medida que crecen lleva a la nariz a la parte superior donde termina definiendo el agujero de soplido. Topológicamente sin embargo, las narices son módulos equivalentes y se encuentran en la misma posición en las primeras fases de los individuos.

Posteriores experimentos geométricos en esta tesis desarrollados durante la estancia en la AA de Londres demostrarán el potencial para desarrollar complejas estructuras y niveles jerárquicos gracias al 'body plan'.

⁶¹⁵ Carroll, Sean B. op, cit. 2005. p.168.

⁶¹⁶ Katz, Michael J. *Allometry Formula: a Cellular Model*. S.I.: s.e., 1980.

⁶¹⁷ Además de su contribución a la alometría, Stephen Jay también es conocido por su teoría de equilibrio puntuado donde se apunta que la mayoría de los procesos evolutivos están compuestos por largos periodos de estabilidad, interrumpidos por episodios cortos y poco frecuentes de bifurcación evolutiva (opuestamente a la teoría del gradualismo filogenético).

En *Palaeobiology*, la revista insignia de su propia especialidad, sólo Charles Darwin y G. G. Simpson han sido citados más cantidad de veces que Stephen Jay Gould.

⁶¹⁸ Gould, Stephen Jay. *Stephen Jay Gould On Evolution*. Nueva York: Voyager, 1994.

⁶¹⁹ La alometría ontogenética se refiere al crecimiento relativo en los individuos; La alometría filogenética se refiere a las tasas de crecimiento diferencial en los linajes; La alometría intraespecífica se refiere a los individuos adultos de una especie o una población local; La alometría interespecífica se refiere al mismo fenómeno entre especies relacionadas.

3.3. Algoritmos Evolutivos (ES: evolutionary solver)

En junio del año 2000 Bill Clinton acuñó de manera temprana el siglo XXI como “el siglo de la biología”⁶²⁰. A día de hoy, el análisis, experimentación y comprensión de la disciplina biológica depende completamente de las técnicas computacionales e informáticas de las que disponemos. El crecimiento de nuestras capacidades tecnológicas impacta directamente sobre el desarrollo de la ciencia biológica. Entre muchos otros aspectos, los algoritmos suponen la puerta de acceso a procesos más complejos, alejados de las estrategias de interfaz más propias del CAD para arquitectos. En otras palabras, buscamos avanzar desde el CAD (computer aided design) a NPDC (natural processes design computation). Los solucionadores evolutivos basados aproximan el vacío entre la biología, la ciencia de la computación, y el diseño. Esta transformación permite al diseñador crear forma a través de procesos generativos que contemplen subprocesos o reglas asociadas a la materia, el análisis en tiempo real, la eficiencia, la adaptabilidad... Entre las estrategias más comunes que ejecutarán estos algoritmos encontramos sistemas de partículas, sistemas multi-agentes, análisis de redes, y elementos finitos⁶²¹. De Castro introduce por primera vez el término ‘Natural Computing’ (computación natural) como respuesta a la réplica de procesos naturales a través de computación. Estos servirán para resolver problemas complejos que van desde la ingeniería hasta la biología⁶²² y se dividen en: búsqueda, simulación, y físicos.

3.3.1. Descripción y funcionamiento de un ES

Los algoritmos de búsqueda y optimización buscan ofrecer soluciones para problemas complejos que no pueden ser resueltos mediante métodos lineales, no-lineales y/o de programación dinámica. Estas técnicas computacionales bio-inspiradas o biológicamente motivadas, se basan en modelos altamente abstractos, a veces llamados ‘metaphors’ (Patton, 1992⁶²³) y están diseñados para mimetizar mecanismos biológicos particulares. Los ejemplos más relevantes son las redes neuronales artificiales y los algoritmos evolutivos, ambos sistemas de procesamiento de información para búsqueda y optimización inspirados en sus respectivos modelos biológicos. La tesis se centrará

⁶²⁰ Cookson, Clive. “Century of biology takes time to bear fruit.” *Financial Times*. Consultada 29 de marzo, 2010. <http://www.ft.com/cms/s/2/e04e5abe-f555-11de-90ab-00144feab49a.html#axzz4H7KMwAmd>

⁶²¹ Oxman, Neri, *Material-based design computation*, Massachusetts Institute of Technology, 2010, p.168.

⁶²² Nunes, De Castro Leandro. *Fundamentals of Natural Computing: Basic Concepts, Algorithms, and Applications*. Boca Raton: Chapman & Hall/CRC, 2006.

⁶²³ Pelta, David Alejandro, Natalio Krasnogor, Dan Dumitrescu, Camelia Chira, y Rodica Lung. *Nature Inspired Cooperative Strategies for Optimization*. Berlin: Springer, 2011.

únicamente en los algoritmos evolutivos, pero apunta un momento de inflexión en el desarrollo de las redes neuronales gracias a un artículo de McCulloch y Pitts en 1943⁶²⁴.

Besides Genetic Algorithms (GAs), there are several other ways for optimization and evolution, such as Hill Climbing (HC), Simulated Annealing(SA), Artificial Neural Network(ANN), etc. To some extent, all these approaches, including Genetic Algorithm, are involved in artificial intelligence. Their common destination is to find a way for optimization and seeking for a fitting result, even though their inner computing methods are not same with each other.

Comparing with the other methods for optimization, I think GA is more suitable for the architectural adaption and evolution. From one hand, in the complex and unpredictable architectural context, GAs could initially seek for the fitter solution for optimization. Comparing with this, ANN need a fixed database as a priori reference, though it can be used for predicting the behavior, materials and structures. On the other hand, GA is a self-evolving computing method and able to find the global optimum, because the evaluating criteria and random crossover filter the population and make it active. This is the ability that most other algorithms, such as HC and SA, do not have. GA is not the only algorithm that is able to work on the architectural adaptive cybernetic, but it is an effective one, as it has the functions to satisfy architectural optimization and evolution⁶²⁵. SHER, E.

La cita anterior de la publicación “Simulation” deja entrever las virtudes de los algoritmos genéticos respecto a otros sistemas más optimizados pero menos versátiles. El diseño arquitectónico, lleva implícito la resolución de problemas, del diseño efectivo que debe resolver desde cosas realmente sencillas (un puente ha de conectar dos extremos) hasta otras más intangibles como activar la vida en una plaza, o provocar admiración por su belleza. El éxito de esa resolución viene determinada por una serie de parámetros que pueden o no ser cuantificados: coste, movilidad, seguridad, tiempo...

Tradicionalmente el proceso de diseño se relaciona con la inteligencia y el razonamiento, sin embargo, un simple proceso de ensayo y error puede crear increíbles resultados. En el caso reiterado de la tesis, la evolución, puede dar lugar a criaturas capaces de resolver por diferentes vías un único problema: la supervivencia. La evolución es uno de los procesos de diseño más antiguos de los que tenemos constancia. A través del proceso de variaciones aleatorias y selección natural en iteración a través de generaciones. Científicos, matemáticos, ingenieros y biólogos han hecho un esfuerzo considerable para programar la evolución en algoritmos. Esos esfuerzos comienzan hace

⁶²⁴ McCulloch, Warren S., y Walter Pitts. “A Logical Calculus of the Ideas Immanent in Nervous Activity.” *Bulletin of Mathematical Biology Bln Mathcal Biology* 52, no. 1-2, 1990. pp. 99-115.

⁶²⁵ Sher, E., Chronis, A. y Glynn, R. “Adaptive behavior of structural systems in unpredictable changing environments by using self-learning algorithms: A case study.” *SIMULATION*, 90(8), 2004. pp. 991-1006.

55 años, con Nils Barricelli's y sus experimentos pioneros en inteligencia artificial. A mitad del siglo XX varios modelos computacionales evolutivos fueron desarrollados, siendo los más prominentes las Estrategias Evolutivas de Rechenberg y Schwefel's, la Programación Evolucionaria de Fogel, y los Algoritmos Genéticos de Holland.

John Holland⁶²⁶ desarrollará uno de los primeros marcos teóricos para el planteamiento de los algoritmos genéticos: una sucesión de órdenes que producen cadenas de información que son seleccionadas y recombinadas en base a una selección establecida por un contexto. Esto se conoce como algoritmos genéticos. Aunque originalmente su objetivo era el mismo que otros solucionadores, la comunidad científica quedó gratamente sorprendida con su habilidad para producir soluciones no-imaginadas, y para solucionar problemas cuya estructura no era entendida.

A pesar de que estos modelos habían sido desarrollados de manera casi independiente los unos de los otros, una serie de conferencias sobre esta tipología de algoritmos en los años 90 establecería beneficiosas interacciones en los dominios de la evolución computacional. De Jong⁶²⁷ tratará de unificar los parámetros de los diferentes puntos de vida con la intención de que ello permita la continuación y desarrollo del campo como uno solo. La integración de esos paradigmas, supone un nuevo auge y desafío para lograr mejor algoritmos evolutivos que gestionen mejores resultados en marcos cada vez menores de tiempo, siempre manteniendo los principios de referencia evolutiva. Los conceptos básicos de los algoritmos evolutivos son^{628 629}: Generación de población inicial. Variación. Evaluación. Selección. Vuelta al punto de variación.

El Dr. Zitzler (ETH Zúrich) define los algoritmos de la siguiente manera:

In evolutionary algorithms, natural selection is simulated by a stochastic selection process. Each solution is given a chance to reproduce a certain number of times, dependent on their quality. Thereby, quality is assessed by evaluating the individuals and assigning them scalar fitness values. The other principle, variation, imitates natural capability of creating "new" living beings by means of recombination and mutation⁶³⁰. ZITZLER

Una de las principales diferencias de los algoritmos computacionales respecto al ámbito biológico es la conservación de los mejores individuos a través de

⁶²⁶ Holland, John H. *Adaptation in Natural and Artificial Systems: An Introductory Analysis with Applications to Biology, Control, and Artificial Intelligence*. Cambridge, Mass.: MIT Press, 2010.

⁶²⁷ A., De Jong Kenneth. *Evolutionary Computation: a Unified Approach*. Cambridge, MA: MIT Press, 2006.

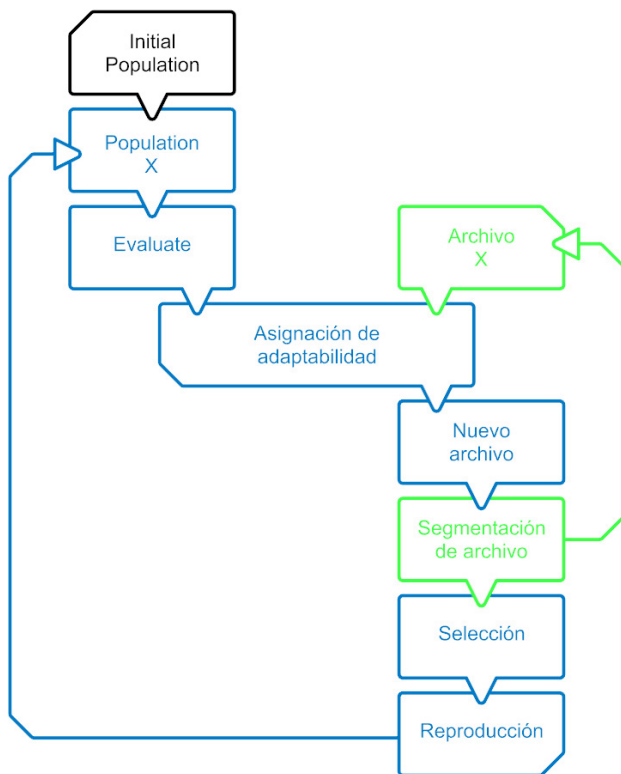
⁶²⁸ Algoritmos evolutivos y genéticos, Universidad Carlos III de Madrid. Consultada 9 de abril, 2015. <http://www.it.uc3m.es/~jvillena/irc/practicass/estudios/aeag>

⁶²⁹ Marczyk, Adam. "Algoritmos genéticos y computación evolutiva." *The Geek*. 2004. Consultada 9 de abril, 2015. <http://the-geek.org/docs/algen/>

⁶³⁰ Zitzler, Eckart. *Evolutionary Algorithms for Multiobjective Optimization: Methods and Applications*. Aachen: Shaker, 1999.

las generaciones en lo que en el diagrama se denomina Archivo ('Archive')⁶³¹. Biológicamente, los individuos más aptos acaban muriendo irremediamente y sus genes son combinados con otros individuos que pueden disminuir la adaptabilidad de sus sucesores. El algoritmo permite conservar a los mejor de cada generación en un "archivo" para que sigan recombinándose con los mejores resultados sin importar su origen o generación.

046. /// Flujo de información en los algoritmos evolutivos. Esquema de Diego Navarro, 2015.



La principal estructura del programa evolutivo fue basada en un "clasificador"⁶³² definido por Goldberg,⁶³³ y que dispone de cinco elementos:

- un sistema de contexto (environmental)
- un sistema de desarrollo
- un módulo de evaluación
- un algoritmo genético
- un proceso de output de mapeado gráfico

*Simply stated, what we are evolving are the rules for generating form, rather than the forms themselves. We are describing processes, not components; ours is the packet-of-seeds as opposed to the bag-of-bricks approach.*⁶³⁴ JOHN FRAZER**

En la conferencia de 2010 en la AA, David Rutten marca las diferencias entre la evolución biológica y la computacional⁶³⁵ (en referencia al ES Galápagos):

- La biológica tiene un entorno cambiante a lo largo del tiempo, en constante feedback. Las relaciones entre la población se alteran debido a la complejidad social (cambios de parejas, descendencia ilegítima...).
- Los parámetros computacionales sin embargo son objetivos y honestos, y no son alterados por el engaño, la crueldad u otros aspectos sociales. Estos genomas tampoco sufren selección sexual, son solamente genomas abstractos que se combinan sucesivamente. No se simulan genes recesivos o dominantes, al parecer por su extrema

⁶³¹ Makki, Mohammed, Ali Farzaneh, Diego Navarro. "The Evolutionary Adaptation of Uban Tissues through Computatuional Analysis", AA.VV. *Real Time, Extending the reach of computation*. Viena: 33rd eCAADe Conference, 2015. Volume 2, p.563.

⁶³² Frazer, John. *An Evolutionary Architecture*. Londres: Architectural Association, 1995. p. 59.

⁶³³ Goldberg, David Edward. *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*. Boston: Addison-Wesley, 2012.

⁶³⁴ Frazer, John. *An Evolutionary Architecture*. Londres: Architectural Association, 1995. p. 99.

⁶³⁵ Rutten, David. *Computing Architectural Concepts*. Architectural Association, Londres, 2010. Consultada 9 de abril, 2015. <http://www.aaschool.ac.uk/VIDEO/lecture.php?ID=1212>

complejidad. Al contrario que en la vida real donde se barajan miles de genes, en computación oscilan entre uno y unas pocas decenas.

- Los sistemas que rigen los agentes de la evolución biológica (ARN, ADN, proteínas...) están también sujetos a la evolución y son susceptibles de cambio ('meiotic drive'), mientras que el código del 'Evolutionary Solver' es inalterable.
- 'Genes are code': los genes llevan instrucciones que desarrollan a un ser vivo, mientras que los genes en software solo son números, solo son datos.
- La recombinación de los individuos no se hace mediante 'crossover' (intercambio de genes: la descendencia recibe algunos de su madre y algunos de su padre), sino mediante un sistema de 'coalescence', donde se realiza un promedio de los valores genéticos de padre y madre.

El cuarto punto en concreto será abordado en el experimento 4 con la intención de subsanar esta simplificación de los algoritmos evolutivos.

Se ha de considerar no obstante, que si bien el lenguaje bebe frecuentemente de la rama biológica, los términos corresponden a su relevancia en el software, y por tanto no han de ser interpretados estrictamente como su terminología original.

- Generaciones: número de iteraciones por simulación procesadas.
- Población: número de individuos en una generación.
- Fenotipo: geometría que la simulación creara.
- Gen: parámetro que controla la intensidad con la que una determinada propiedad del fenotipo es modificada.
- Criterio de adaptación ('fitness'): criterio por el cual el fenotipo es evaluado y seleccionado.
- Mutación: modificación aleatoria que afecta a la reserva genética.
- Ratio de Mutación: intensidad de la variación que produce la mutación.
- Probabilidad de Mutación: probabilidad de que un gen sufra una mutación.
- Cruce (Crossover): intercambio de genes de diferentes fenotipos.
- Elitismo: el número de individuos seleccionados que pasarán a la siguiente generación (archivo).
- Frente de Pareto: las soluciones más óptimas de la población.

Funcionamiento de Galápagos ES

Galápagos es el componente que incorpora Grasshopper como algoritmo evolutivo. David Rutten⁶³⁶ inicia la programación de Galápagos en Marzo de 2010, basándose en los tres principios de la evolución (variación, herencia y selección).

⁶³⁶ Rutten, David. "Galapagos Day 02." *Grasshopper*. Consultada 29 de enero, 2010. <http://www.Grasshopper3d.com/video/galapagos-day-02>

I'm still amazed at how well the solver works given that it has no understanding whatsoever of the problem (it doesn't even know there is such a thing as spatial dimensions)⁶³⁷. DAVID RUTTEN

En este post, Rutten desgrana los aspectos básicos de Galápagos⁶³⁸ -y la mayoría de ES ('evolutionary solvers'), a falta de documentación existente (y de ahí la importancia de su recopilación en esta tesis):

1. *Galapagos populates the first generation (G[0]) with random individuals. Basically the sliders are all set at random values.*

2. *Now we step into the generic evolutionary loop, so G[0] becomes G[n], as this is the same for all generations.*

3. *For each individual in G[n] the fitness is computed. This is the most time consuming operation in the solver.*

4. *The individuals in G[n] must populate G[n+1], there are two ways in which this can happen:*

- *Individuals 'survive' the generation gap and are present in both G[n] and G[n+1]*

- *Individuals mate to produce offspring that populates G[n+1]*

Often, fit individuals will use both vectors.

5. *Creating offspring is a complex procedure and there are many factors that affect it.*

5a. *Coupling: this step involves picking individuals from G[n] for mating couples. Individuals can be picked isotropically (i.e. everyone has an equal chance of being picked, regardless of fitness), exclusively (i.e. only the fittest X% are allowed to mate, but they are all equally likely to mate) and biased (i.e. the fitter an individual, the higher the chance it finds a mate, but everybody has a chance)*

5b. *Mate selection: this step involves someone picking a mate from G[n]. When an individual has been selected to mate (step 5a), he/she needs to find a mate. Instead of picking another fit individual, mate selection happens based on genetic distance. For example, individuals could be said to prefer very similar individuals, or they could be said to prefer very different individuals, or something in between. This is called the "Inbreeding factor" in Galapagos. A high inbreeding factor will result in 'incestuous' couples, a low factor will result in 'zoophilic' couples. Neither extreme is healthy.*

⁶³⁷ Rutten, David. "Galapagos Day 04." *Grasshopper*. Consultada 29 de enero, 2010. <http://www.Grasshopper3d.com/photo/galapagos-day-04>

⁶³⁸ Lee, Sangsu. "References about Galapagos?" *Grasshopper*. Consultada 30 de julio, 2015. <http://www.Grasshopper3d.com/forum/topics/references-about-galapagos?id=2985220%3ATopic%3A77115&page=1#comments>

5c. *Coalescence*: Once a couple has been formed, offspring needs to be generated. Basically coalescence defines how the genomes of mommy and daddy are combined to produce little johnny. The best analogy with biological coalescence is crossover, where P out of Q genes are inherited from mom and $(Q - P)$ genes are inherited from dad. In Galapagos, these genes are always consecutive, thus if the genome consists of 5 genes, the first 3 come from mom and the last 2 come from dad. Or the first 1 comes from mom and the last 4 come from dad. The amount of genes per parent is random. Genes can also be interpolated (there is no analogy for this in biological evolution). Since a single gene in Galapagos is nothing more than a slider position, it is quite easy to average the positions for mom and dad. Finally, genes can be created via preference blending. Very similar to interpolation, but the blending is weighted by the relative fitness of both parents.

5d. *Mutations*: Once the offspring genome has been created in step 5c, mutations are applied. Mutations are random events that affect gene values in random ways. Although the Galapagos engine supports several kinds of mutations, in Grasshopper it only makes sense to allow for point mutations, as it not possible grow or shrink the number of sliders.

6. Finally, a new generation is populated and solved for fitness. There is an optional final step which can ensure that fit individuals do not get lost in the process. The "Maintain High Fitness" value controls what percentage of individuals from $G[n]$ are allowed to displace individuals in $G[n+1]$ provided they are fitter. By default this percentage is 10. Which basically means that the 10% fittest individuals in $G[n]$ are compared to the 10% lamest individuals in $G[n+1]$ and if grandpa is indeed fitter, he's allowed to bump junior off the list.

7. This process (step 2 - step 6) repeats until the maximum number of generations has been reached, until no progress has been made for a specified number of generations or until a specific fitness value has been reached.

La interfaz⁶³⁹ ⁶⁴⁰de Galápagos se distribuye de la siguiente manera:

Las opciones iniciales para configurar el algoritmo:

- **Fitness (adecuación)**: valor con tendencia máxima, mínima, o determinada.
- **Threshold (umbral)**: valor determinado que se considera lo suficientemente bueno.
- **Runtime Limit**: establece un tiempo máximo en el que buscar la

⁶³⁹ Javed, Shamim. "Galapagos questions." *Grasshopper*. Consultada 30 de noviembre, 2013. <http://www.Grasshopper3d.com/forum/topics/galapagos-questions>

⁶⁴⁰ Imai, Yuki. "Please tell me the basics of Galapagos." *Grasshopper*. Consultada 30 de julio, 2015. <http://www.Grasshopper3d.com/forum/topics/please-tell-me-the-basics-of-galapagos>

mejor adecuación.

- **Max. Stagnant:** número máximo de generaciones sin encontrar una solución antes de abortar.
- **Population:** número de individuos por generación
- **Boost:** se recomienda un mayor número de población inicial (ya que se crea aleatoriamente), para tantear más posibilidades y evitar soluciones locales.
- **Maintain:** el número de individuos que se mantienen para próximas generaciones.
- **Inbreeding:** cuan diferentes pueden ser los individuos susceptibles de recombinarse.

La ventana del “solucionador” divide en zonas con diferentes tipos de gráficos:

047. /// Interfaz de Galápagos. Captura de pantalla de Diego Navarro. La ventana del solucionador presenta la información de cuatro maneras diferentes.



- La primera y superior, el historial de generaciones. La línea roja marca el valor medio del fitness -poco relevante en la filosofía de poblaciones-, los valores máximos y mínimos están marcados por las franjas amarillas, mientras que la naranja es la desviación estándar que contiene la mayoría de los individuos. Cuando aparecen nuevos resultados que marcan a individuos con los mejores valores de adaptabilidad hasta la fecha se marcan con un pequeño símbolo sumatorio (+).
- La primera de las ventanas inferiores marca los genes eliminados y

aquellos que servirán para reproducirse en próximas generaciones. Los puntos negros son los padres y las cruces rojas los que mueren. Se hacen agrupaciones en base a su similitud.

- La segunda ventana inferior es una ‘multi-dimensional-point-graph’. Cada polilínea representa un genoma, teniendo un punto de discontinuidad por cada gen (slider) en la definición.
- La tercera ventana inferior es una lista ordenada de genes en base a su adaptabilidad que expresa en un código de colores los genes que lo componen.

Pueden encontrarse una cantidad de ejemplos y tutoriales razonable para iniciarse en su uso a lo largo de la web⁶⁴¹, pero sin duda el lugar más idóneo es el propio blog de David Rutten bajo el tag Galápagos⁶⁴² y sus comentarios en los post de la web de GH, los cuales se distribuyen a lo largo de la tesis.

Enunciados para ES (‘fitness’)

El ‘Fitness’ (adecuación) es un concepto difícil de concretar. El más adaptado no es el más fuerte, ni el más rápido, ni el más grande... Estar adaptado es la suma de cientos, sino miles, de características en equilibrio y que definen una especie o ser vivo. Ser rápido, fuerte, o grande no son sino pocas entre centenares de fuerzas que son necesarias para estar/ser adaptado. Si estar adaptado implica proporcionar, acomodar, apropiarse algo a otra cosa, ¿cómo puede medirse cuán adaptado está un ser vivo a su entorno? Dichas cualidades no pueden ser medidas y valoradas de manera objetiva pues siempre dependerán del equilibrio entre las mismas y de su entorno: puede ser muy rápido, pero si en su ecosistema hay un predador ligeramente más rápido no servirá de nada, puede mimetizarse excelentemente pero una ligera variación en su entorno eliminaría esa ventaja... los valores son muy relativos y con frecuencia las especies más extremas son más propensas a extinguirse, ya que ello conlleva menor versatilidad.

Normalmente se hace un estudio que determina la variabilidad del entorno y su potencial de cambio (ecosistema), la fertilidad (número de descendientes), y los márgenes de supervivencia en cada una de las fases de desarrollo. Unido a la antigüedad de la especie (número de generaciones) y el ritmo de crecimiento en base a la población, puede extrapolarse una cifra de adecuación⁶⁴³. Las tortugas difícilmente evolucionarán hacia una especie veloz (en principio siempre parece un valor positivo) mientras no tengan necesidad de ello (ni

⁶⁴¹ Nesis. “Grasshopper Galapagos Tutorial.” *Youtube*. Consultada 9 de abril, 2015. <http://www.youtube.com/watch?v=TGVwz4c6ieY>

⁶⁴² Rutten, David. “Fitness Pressure.” *I eat bugs for breakfast*. Consultada 29 de marzo, 2011. <http://ieatbugsforbreakfast.wordpress.com/tag/galapagos/>

⁶⁴³ Instituto de Ecología, UNAM. “Laboratorio de evolución molecular y experimental.” Consultada 9 de abril, 2015. <http://web.ecologia.unam.mx/laboratorios/evolucionmolecular/index.php/es/>

cazan ni huyen de sus presas) y, más aún porque ello implicaría una serie de cambios inviábiles, como sería probablemente la desaparición del caparazón para ganar ligereza y flexibilidad. De hecho, algunos de los animales más rápidos del mundo como el guepardo, el halcón, o el pez vela, están en peligro de extinción.

En un ES definir la adecuación es un valor matemático mucho más fácil de manejar, existiendo sólo tres posibilidades: maximizar, minimizar, o aproximarse a un número determinado. Esa cifra determinada o indeterminada es la cuantificación de un valor (posiblemente arquitectónico) que direcciona la voluntad evolutiva del proceso. Al intentar resolver un problema, cómo reducir la cantidad de material, adecuación es que el valor sea el mínimo posible sin ningún tipo de argumentación posible, adecuación es la solución al problema, adecuación es lo que nosotros queremos que sea⁶⁴⁴.

Por tanto, es vital enunciar el problema: establecer unos criterios de cuantificación y la fórmula que los relaciona para que el ES pueda buscar una solución. Los criterios de cuantificación como se verá más adelante es una de las apuestas más arriesgadas del diseñador y probablemente la componente más subjetiva de todo el proceso. A medida que nos alejamos de factores más objetivos (cantidad de m²) y tratamos de cuantificar términos menos matemáticos pero igualmente arquitectónicos (confort, visuales, conectividad...). La necesidad de expresar un valor determinado es inevitable para poder comparar los resultados estableciendo de esa manera A es mejor B, pero si además esos valores dependen de más de una variable también tendrá que establecerse una relación entre esas variables. Resulta imposible establecer una norma universal para relacionar metros cuadrados e intensidad lumínica, o cantidad de material con la orientación del edificio. Con todo la necesidad de un fitness único⁶⁴⁵ nos urge a decidir la ecuación que pone dichas variables en relación. En estos casos es prudente experimentar con los resultados y adecuar las relaciones progresivamente hasta que los proyectos generados parecen estar en equilibrio con la importancia de las variables.

Por supuesto, un ES es más útil cuando el caso implica muchas piezas relacionadas (demasiadas para lanzarse a probar sus combinaciones manualmente) o cuando la "respuesta" es incierta (no resoluble matemáticamente). Se listan algunos ejemplos de relación entre valores (además de otro caso puntual en el foro con la intervención de Rutten⁶⁴⁶):

1. *If all numbers in A are higher than all numbers in B, A is better. If all numbers in A are lower than all numbers in B, B is better. Otherwise A and B are indistinguishable.*

⁶⁴⁴ Navarro, Diego. "Evolutive Algorithms." Estévez, Alberto T. (ed.). *2nd International Conference On Biodigital Architecture & Genetics*. Barcelona: Bubok Publishing S.L., 2014. pp. 280-288.

⁶⁴⁵ Más adelante en esta tesis se introducirán ES que permiten varios fitness.

⁶⁴⁶ Niels. "Galapagos multiple fitnesses best workaround." *Grasshopper*. Consultada 30 de febrero 2011. <http://www.Grasshopper3d.com/forum/topics/galapagos-multiple-fitnesses>

2. Only compare the highest number in A to the highest number in B.
3. Only compare the lowest number in A to the lowest number in B.
4. Compare the average of all numbers in A to the average of all numbers in B.
5. Compare the sum of all numbers in A to the sum of all numbers in B.
6. Compare the product of all numbers in A to the product of all numbers in B.
7. Compare the first number in A to the first number in B. Then compare the second number in A to the second number in B etc. etc. Afterwards whoever has won the most partial comparisons, wins the war.
8.⁶⁴⁷

Por defecto, muchos de estos ES (no es el caso de Galápagos pero si de Octopus) tienden a minimizar el resultado, es decir, tienden a 0. Si por el contrario la intención del diseño es maximizar un valor es suficiente con invertir el valor del fitness deberemos aplicar la fórmula $1/|x|+1$. Deben usarse valores absolutos para evitar datos negativos y sumarse un número mínimo para evitar la imposibilidad de dividir por cero. Si se busca un valor específico, por ejemplo 35, deberemos aplicar Y-X y minimizar el resultado, que será cero cuando el valor de adaptabilidad sea igual al objetivo.

Tendencias y geografías de poblaciones (‘fitness landscape’)

Entender el mundo de los “solucionadores evolutivos” es entender también la tipología (o la topología) de los problemas matemáticos que plantean. Para el arquitecto, versado en la habilidad de lo geométrico y lo visual, resultará más fácil entender los siguientes gráficos^{648 649} para lograr plantear la mejor pregunta posible para determinado problema. Entender y plantear un problema son partes fundamentales para su resolución, y estos gráficos son excelentes ejemplos de una rica variedad en maneras de abordar diferentes estrategias.

Estos gráficos se basan en solamente dos incógnitas que delimitan un espacio bidimensional. Al cruzar cada una de sus posibles combinaciones basado en su relación determinada por el enunciado del problema, podemos añadir un

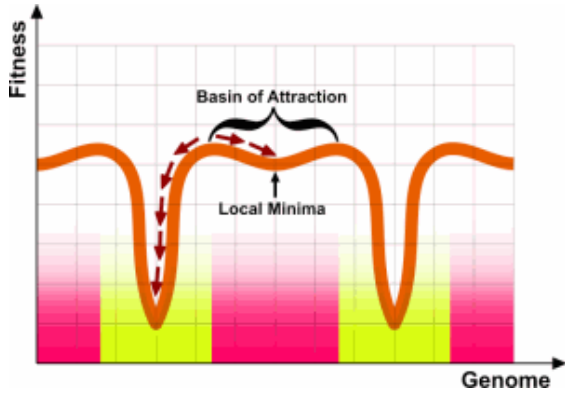
⁶⁴⁷ Kory “Easy Galapagos.” *Grasshopper*. Abril, 2013. <http://www.Grasshopper3d.com/forum/topics/easy-galapagos?x=1&id=2985220%3ATopic%3A832242&page=1#comments> (Possible comparisons between values to be considered for fitness).

⁶⁴⁸ Rutten, David. “Architectural design magazine publication.” *I eat bugs for breakfast*. Consultada 30 de octubre, 2012. <http://ieatbugsforbreakfast.wordpress.com/2012/10/23/architectural-design-magazine-publication/>

⁶⁴⁹ Id., “Illustrations for my ICGG2014 paper.” *I eat bugs for breakfast*. Consultada 30 de febrero, 2014. <http://ieatbugsforbreakfast.wordpress.com/2014/02/17/illustrations-for-my-icgg2014-paper/>

tercer valor Z , formalizándose una topología tridimensional que representa la ecuación de adecuación. Si las incógnitas fueran 3 o más, la función del fitness sería de 4 o más dimensiones y por tanto irrepresentable de manera gráfica (al menos sobre papel⁶⁵⁰). Una topología virtual de adecuación ('fitness Landscape') ayuda a entender las posibles soluciones y el comportamiento evolutivo del algoritmo que propaga sus generaciones en la superficie de esa topología.

048. /// David Rutten, *Fitness Functions*, 2011. Extraído del blog "I Eat bugs for breakfast". Esquema de las partes de un 'Fitness Landscape'.



Estas topologías pueden ser complejas en accidentes topográficos, algunos de los cuales pueden convertirse en "trampas" para el ES. Planos llanos que no tienen inclinación de mejora, picos de adecuación con cuencas de atracción muy pequeñas, discontinuidades en la topología, irregularidades muy pronunciadas que dificultan la movilidad...⁶⁵¹. Muchos de estos casos pueden llevar a lo que se llama una 'local optima' (asociada a la convergencia): picos de atracción que no llevan a la mejor solución y que producen un estancamiento de la población⁶⁵².

049. /// David Rutten, 2011. Extraído del blog "I Eat bugs for breakfast". Dibujos explicativos de diferentes 'Landscapes'.

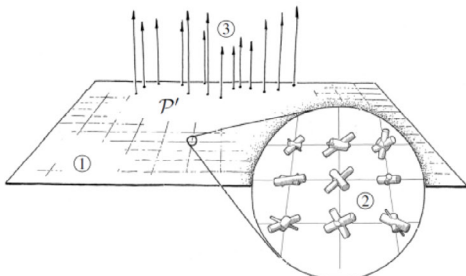


Figure 1: \mathcal{P} as the set of all tensors

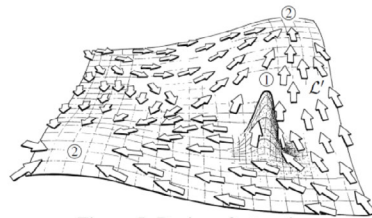


Figure 5: Basins of attraction

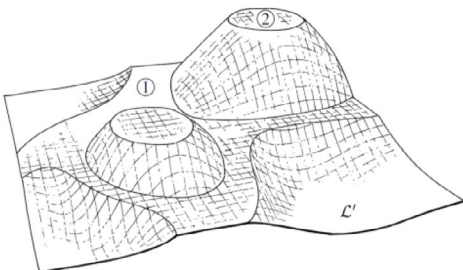
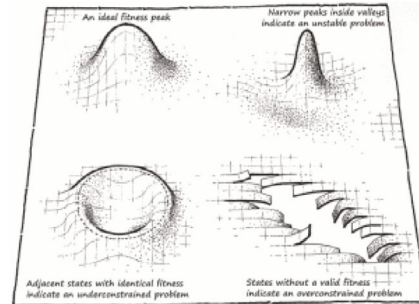


Figure 8: Geometry of under-constrainedness

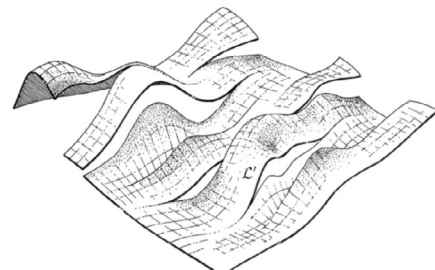
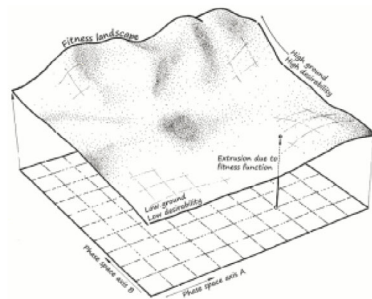


Figure 7: Landscape with few discontinuities

⁶⁵⁰ Se menciona el papel como medio bidimensional en el que no pueden haber cambios en el tiempo.

⁶⁵¹ Rutten, David. "Evolutionary solver: fitness functions." *I eat bugs for breakfast*. Marzo, 2011. <http://ieatbugsforbreakfast.wordpress.com/2011/03/04/fitness-functions/>

⁶⁵² Id., "Multiple local optima." *I eat bugs for breakfast*. Diciembre, 2011. <http://ieatbugsforbreakfast.wordpress.com/2011/12/01/multiple-local-optima/>

En este ejemplo/problema⁶⁵³ sobre optimización en la organización de geometrías en Galápagos se mencionan:

1. Una de las carencias de Galápagos: la ausencia de 'hard constraint'⁶⁵⁴ (restricción dura), que es solventada mediante la penalización de los valores si entran en las áreas que debieran considerarse de restricción dura.
2. Por cada nivel adicional de variables el número de dimensiones del problema crece exponencialmente. En los comentarios se hace referencia a valorar la organización de una serie de objetos geométricos en el espacio y como ello implicaría la adición de los valores XYZ en posición y rotación. Con 3 tipos de objetos (suponiendo que tuviésemos 3 de cada (9 en total)), la gráfica resultante sería un espacio de $3+(9*6)=57$ dimensiones. Un espacio además que debería ser variable, pues estaría en constante cambio. Recaltar que solamente se están valorando 9 meros objetos.

Esta valoración da noción de que este tipo de solucionadores requieren mucho control a la hora de enunciar los problemas. Geométricamente podemos describir y aplicar gran número de restricciones. Pero un exceso en esas restricciones y en el detalle de la situación puede ser altamente contraproducente. La velocidad y la capacidad de cálculo son un recurso muy valioso en los solucionadores evolutivos.

La arquitectura es inequívocamente una disciplina que requiere de ese componente geométrico (¡e incluso físico!), dificultando la elaboración de definiciones con gran flexibilidad y número de dimensiones para su resolución en Galápagos. Genomas más largos deberían juzgarse sobre poblaciones más grandes que permitan una variedad inicial mucho mayor (hay más posibilidad de combinaciones). Respecto al número de población inicial, cuan mixta tiene que ser su recombinación o el impacto de las mutaciones adecuado, no hay reglas o soluciones fáciles. Cada caso y situación requerirá unos valores propios y por ello, una fase preliminar de experimentación con los mismos es importante para ahorrar tiempo en estadios más tardíos de los ejercicios de diseño y procesado. La decisión de que números son los más adecuados se deciden en gran medida a la luz de los primeros resultados y el análisis de las poblaciones.

Si se tiende hacia una rápida convergencia quizá se requiere una población mayor o incrementar el ratio de mutación, si se observan agrupaciones o clusters (con poca variedad entre ellos) el aumento del 'inbreeding' sería aconsejable. Por el contrario, un avance lento del valor de adaptabilidad puede darse a un excesiva frecuencia de mutación... la mutación, siempre ha de tenerse en cuenta, puede abrir caminos pero siempre ralentizará el paso⁶⁵⁵.

⁶⁵³ Id., "Another Galapagos Tutorial." *I eat bugs for breakfast*. Septiembre, 2013. <http://ieatbugsforbreakfast.wordpress.com/2013/09/17/another-galapagos-tutorial/>

⁶⁵⁴ Restricción que hace que ciertas partes de la ecuación se consideren nulas/ inválidas/inexistentes.

⁶⁵⁵ Rutten, David. "Another Galapagos Tutorial." *I eat bugs for breakfast*. Septiembre, 2013. <http://ieatbugsforbreakfast.wordpress.com/2013/09/17/another-galapagos-tutorial/>

Algoritmos Multiobjetivo de Octopus ES

En el capítulo “Enunciados para ES (fitness)” se ha considerado la posible -y frecuente- situación en la que el algoritmo cuente con más de una variable (más de un gen con diferentes valores). En un problema sencillo, todos esos genes trabajarán en la misma dirección para lograr el mejor resultado, en un problema real lo más probable es que esas variables sean contradictorias. El caso más sencillo es un punto que oscila en la recta entre otros dos puntos. Si se valora la distancia a ambos puntos, cualquiera de las posiciones en la recta es igual de buena al resto. Un ejemplo más elaborado puede ser escoger un vehículo: no puede tenerse un coche potente y barato, porque la potencia suele influir en un incremento del precio. Este es uno de tantos problemas irresolubles, no hay respuesta a ¿cuál es el coche perfecto? Elegir uno, dependerá de muchos otros parámetros: ¿Qué importancia le asignamos a cada uno de los criterios? ¿existe un mínimo o un máximo en alguno de ellos fuera de alcance? ¿hay otros factores externos a tener en cuenta?

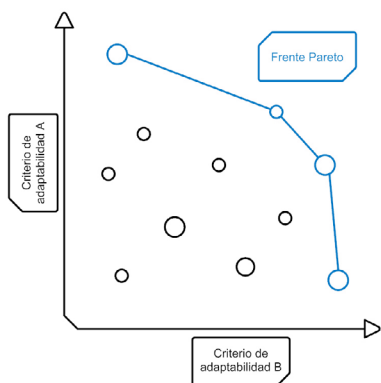
050. /// Gráfica pentagonal⁶⁵⁶. Diagrama de Diego Navarro. Cada uno de los vértices del pentágono representa una característica, su distancia al centro su valor cuantitativo.



La integración de diferentes paradigmas evolutivos, así como el reto asociado de encontrar una solución a múltiples objetivos conflictivos, llevará a un nuevo brote de algoritmos evolutivos, cada uno haciendo pequeñas variaciones de su interpretación del modelo evolutivo para obtener el conjunto de soluciones más óptimo en un marco de tiempo más eficiente. Los principios básicos evolutivos de selección y variación seguirán siendo la parte más importante en la mayoría de ellos. Las estrategias evolutivas han progresado en la eficacia para aplicar estos dos principios básicos para lograr los objetivos fundamentales de la optimización multi-objetivo:

- Aplicación de la evaluación más eficiente y los métodos de selección para lograr el conjunto óptimo que define el frente de Pareto.
- Mantener la diversidad de la población para disminuir la probabilidad de una convergencia prematura.

051. /// Gráfica sobre el Pareto front. Diagrama de Diego Navarro. Los elementos situados en el frente representan los mejores elementos presentando cantidades diferentes en las respectivas características.



La incorporación de los algoritmos multi-objetivo requerirá adoptar también nuevos conceptos matemáticos como el frente de Pareto. Este frente puede estar definido por una curva, una superficie o geometrías multidimensionales (dependiendo del número de objetivos, al igual que en los ‘fitness landscapes’) La geometría del frente designa aquellos individuos con diferentes valores pero “igualmente” adaptados en base a criterios contradictorios. Es decir, sus valores totales de adaptabilidad son igualmente altos, pero las variaciones de sus características los hacen distintos y son distribuidos en diferentes

⁶⁵⁶ En una gráfica pentagonal que valora 5 aspectos diferentes -y opuestos-, ningún vehículo podría conseguir un pentágono completo (regular en tamaño máximo).

puntos del frente. Algunos algoritmos evolutivos como el NSGA-2 o el SPEA-2 demuestran unas excelentes capacidades para desarrollar un frente de Pareto amplio en un tiempo razonable⁶⁵⁷. El ‘Strength Pareto Evolutionary Algorithm 2 (SPEA-2) servirá para alimentar el add-on Octopus 3D, software que se utilizará en los experimentos a describir más tarde.

Las implicaciones de la adaptabilidad multi-objetivo van mucho más allá de funcionar con objetivos conflictivos. A nivel de diseño permiten abordar el mismo problema en diferentes direcciones sin tener que tomar decisiones prematuras (y posiblemente erróneas). Como la población se mantiene diversa al mismo tiempo que aumentan los extremos hacia los objetivos del fitness, la variedad de individuos a elegir es mucho mayor. La investigación, el proceso de desarrollo avanza “objetivo y neutral” durante todo el proceso evolutivo sin que las asignaciones de importancia del diseñador subjetivo influyan en él. Así, el proceso de intervención, de selección personal, se retrasa hasta el final. Los errores posibles en la enunciación inicial de un único fitness no se dan. **

The most significant advantage of using evolutionary search lies in the gain of flexibility and adaptability to the task at hand⁶⁵⁸. HAMMEL

Así pues, los algoritmos suponen una herramienta robusta y poderosa en mecanismos⁶⁵⁹ cuya ventaja más significativa del uso de buscadores evolutivos reside en la flexibilidad y adaptabilidad de la tarea, gran valor para con la arquitectura y todos los parámetros que simultáneos que implica.

Algunos de los experimentos de esta tesis se han llevado a cabo mediante el software de ES multi-objetivo Octopus, un add-on para GH, publicado por primera vez el 8 de Enero de 2014⁶⁶⁰ como parte de un set de herramientas desarrollado por Robert Vierlinger en la universidad de Artes Aplicadas de Vienna y la ingeniería Bollinger+Grohman. Se describen a continuación algunos de los términos y variables que incorpora Octopus frente a Galápagos:

- Mutation probability (% de que ocurra). Mutation ratio (como de fuerte ocurre).
- Selección de algoritmos evolutivos (SPEA-2 es peor que HypE por ser más antiguo).
- Este programa no maximiza por lo tanto han de considerarse las reglas mencionadas en el capítulo de “Enunciados para ES”.
- Pareto front (como repercusión del uso de multi-fitness).
- Permite seguir en una dirección específica a partir de una elección de fitness en medio del proceso evolutivo (isotropic selection, exclusive selection, biased selection).

⁶⁵⁷ Luke, Sean. *Essentials Of Metaheuristics: a Set of Undergraduate Lecture Notes*. Place of publication not identified: Lulu, 2009.

⁶⁵⁸ Back, T., U. Hammel, y H.-P. Schwefel. “Evolutionary Computation: Comments on the History and Current State.” *IEEE Transactions on Evolutionary Computation* 1, nº 1. Abril, 1997. pp. 3-17.

⁶⁵⁹ Zitzler, *Evolutionary Algorithms for Multi-Objective Optimization: Methods and Applications*, Ph.D. Thesis, ETH, 1999.

⁶⁶⁰ Food4rhino. “Octopus.” Consultada 9 de abril, 2015. <http://www.food4rhino.com/project/octopus?etx>

- El tipo de combinación de los genes (crossover coalescence, blend coalescence, blend with preference coalescence).
- Exportación de fenotipos y poblaciones, así como de datos en diferentes maneras.

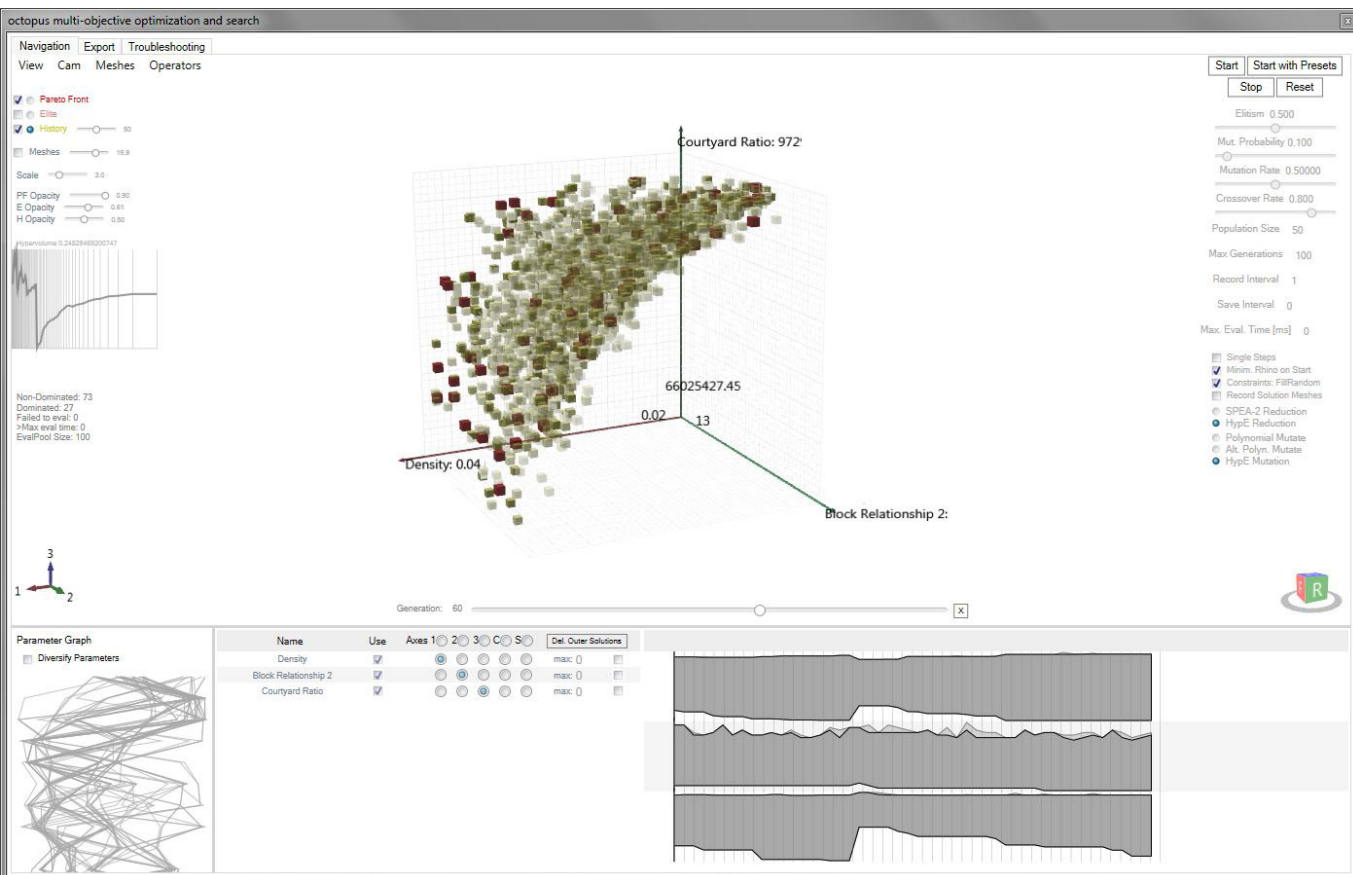
Durante los experimentos se advirtió de que la población de los individuos se dobla con frecuencia cuando se trata de extraer los resultados:

SPEA-2 and most other MOEA work with an elite (resp. an 'archive'), where the best are stored to not lose them. for single objective GAs this could also be just one individual, although losing diversity is easier then too. Anyway, one half (=population size) is used to 'experiment' and breed, the other half ('archive', 'elite') is used to maintain quality.

...elitism is measured, in percent, if to breed new individuals from the population or the elite.⁶⁶¹

Una versión alternativa de Octopus (Octopus-e) permite una mayor personalización de los valores y factores que afectan al algoritmo evolutivo. No ha sido necesario su uso en la tesis pero se recalca su futura utilidad.

052. /// Interfaz de Octopus. Captura de pantalla de Diego Navarro. Los cubos rojos definen el frente de Pareto. Se observan otros gráficos similares a la interfaz de Galápagos.



Consideraciones sobre ES **

Considerar los defectos y áreas de expansión de estos algoritmos es fundamental para que la arquitectura u otros procesos de diseño puedan aproximarse paulatinamente a funciones verdaderamente naturales. Estas consideraciones, que serán trasladadas a las conclusiones de la tesis son también parte de los objetivos (pues algunas se resuelven en los experimentos) y el análisis de la situación actual de los algoritmos. Estos puntos han sido discutidos con Mike Weinstock y otros doctorandos en el seminario de Emergencia (Emergent Technologies, AA, Londres).

- La excesiva abstracción matemática, probablemente debido a la carga computacional. Se ha descrito como los ‘genpools’ o genes de una definición están compuestos por rangos numéricos que afectan la variedad de una modificación, cuando en realidad la modificación de los genes en el ámbito biológico implica qué modificaciones se dan -qué genes se expresan, no cuanto se expresan-. Esto también se aplica a una ausencia absoluta en relación a los ‘body plans’ y la dificultad de asociar la evolución en tiempo real a otros parámetros exteriores.
- La precariedad y estado embrionario de estas herramientas, aún muy alejadas de su madurez. La imposibilidad de habilitar ‘fitness negativo’⁶⁶² o ‘hard constraint’ que ha de simularse mediante valores negativos y condicionales dentro de la definición. Tanto GH como Octopus se encuentra en versión WIP, piezas de software con poco respaldo e impacto económico. Producen errores con frecuencia y aún tienen un margen de mejora muy considerable de cara al usuario no-programador.
- La dificultad para plantear y mostrar ‘fitness landscapes’, agravado por la problemática de la multidimensionalidad y la imposibilidad de leerla para comprender el problema.
- Valorar cual es el objetivo a cumplir. ¿Estamos buscando un individuo súper eficiente o se trata de crear una población diversa aunque de media elevada? Asociado a la arquitectura esta pregunta puede traducirse en la búsqueda de un único edificio (un rascacielos por ejemplo) o de varios (una urbanización, un grupo de viviendas heterogéneas pero que comparten similitudes). ¿Nos interesa pues alimentar el mejor individuo o la población entera? ¿Tratamos de resolver una incógnita o de formar variedad? Biológicamente las especies que trabajan en grupo suelen fomentar la adaptabilidad de la población (herbívoros que se muevan en manadas), mientras que las especies más individuales (normalmente cazadores, animales territoriales) buscan la mejor adaptabilidad del individuo más destacado.
- La convergencia es otro término descriptivo para definir una población.

⁶⁶² Rutten, David. “Another Galapagos Tutorial.” *I eat bugs for breakfast*. Septiembre, 2013. <http://ieatbugsforbreakfast.wordpress.com/2013/09/17/another-galapagos-tutorial/>

Normalmente, una población convergente es negativa evolutivamente a no ser que estemos muy seguros de la solución al problema y dónde se haya. Una población convergente implica que la mayoría de los individuos están cerca de la media y tienden hacia una única solución. Es frecuente un ‘breeding’ masivo con la pequeña elite de individuos más adaptados, hecho que llevaría a la aceleración del proceso pero que agudizará la convergencia. Ello conlleva dos peligros: el primero caer en una “local optima”. Es decir, que se alcance la máxima optimización mediante una solución pero que esa solución no sea la mejor al problema. La reducción de los extremos aumenta la dificultad de que la población encuentre otro pico de optimización, atascando a la población en la “local optima”. El segundo, de carácter más biológico, es la debilidad frente a los cambios de entorno. Una población rica en variedad tiene más probabilidad de que alguno de sus individuos sea adaptable a un nuevo cambio (meteorológico, social, epidémico...).

- Opuestamente la divergencia también tiene uno contrapunto: requiere más tiempo para encontrar la solución a cambio de garantizar una mayor probabilidad de éxito. Hay dos métodos de alimentar la divergencia: procurando una estrategia de emparejamiento flexible -no centrada alrededor de los miembros más óptimos-, y potenciando las mutaciones para que los individuos más radicales puedan desarrollar propiedades aún más alejadas de la media (‘feed the monsters’). Puede resultar tentador utilizar la elite -los mejores individuos- para evolucionar rápidamente, pero este es el motivo principal de caer en la convergencia. Anecdóticamente, Galápagos -el plug-in de GH- utiliza entre sus ajustes los términos zoofílico e incestuoso para describir un emparejamiento más próximo o más lejano entre los individuos. Afortunadamente las matemáticas y el diseño carecen de restricciones morales o éticas que puedan afectar la mejora de la especie.
- A priori puede parecer que introducir elementos aleatorios pueden incrementar la flexibilidad y heterogeneidad de una definición que busca explorar libremente un número de posibilidades. Lo aleatorio introduce esa variedad tan “orgánica”. Sin embargo introducir componentes de aleatoriedad en las definiciones perjudica gravemente el proceso evolutivo: los componentes aleatorios están asociados a una semilla (seed) que varía normalmente con el uso de un deslizador (slider) que pertenece a una reserva genética (genpool). La relación entre el valor de la semilla y la información extraída por el componente es inexistente y por lo tanto el algoritmo evolutivo no puede predecir la causalidad de los números. La posición de este slider con un resultado muy propicio o muy negativo afectará a la valoración final del algoritmo y distorsionará la verdadera repercusión del resto de genes en la ‘genpool’. Por otro lado, también es cierto que ayuda a mantener un grado de inestabilidad que puede evitar una convergencia prematura.

*To try and evolve anything complicated will almost certainly result in frustration*⁶⁶³. DAVID RUTTEN

3.3.2. Diseño evolutivo (y cibernética) en arte e ingeniería

Como es lógico, el uso y comprensión de los algoritmos evolutivos difiere según el campo en el que se usa. La arquitectura, reconocida por ser una disciplina mixta, puede aprovecharse del entendimiento de otros ámbitos como el arte o la ingeniería, de los cuales se describirá a continuación su postura hacia lo evolutivo y sus algoritmos.

Si bien el ámbito de lo cibernético se aleja de la propuesta de la tesis, su origen y puntos en común con los aspectos evolutivos de la arquitectura son ineludibles y por ello se esbozan algunos puntos de interés. Ha de comprenderse que uno de los factores clave en lo cibernético es la interactividad con el entorno, es decir, hay una vertiente dinámica que reacciona en tiempo real y uno o varios agentes externos al sistema que afectan de la misma manera. Evolutivamente el tiempo real desaparece por completo -el propósito es resumir años de selección en pocos minutos- y si bien parece que el sistema está cerrado, la valoración de la adaptabilidad de esos individuos no es sino el vivo reflejo de su interactividad con el entorno. Ciertamente ese entorno es en la mayoría de los casos fijo, no cambiante. ¿pero puede plantearse una definición con inputs cambiantes a lo largo de la evolución?

Diseño evolutivo en el arte

Introducir una herramienta “auto”mática en el proceso creativo siempre sacude las ideologías establecidas y arroja dudas sobre el papel de los diseñadores y la importancia de los procesos. Diseñar algoritmos para que diseñen por sí mismos se une a este tipo de disyuntivas. Ranulph Glanvill enfatizará el papel del observador activo en el diseño, un proceso cibernético donde se realiza una interacción o conversación entre el diseñador (el arquitecto) y el ejecutor del diseño (lo cibernético). Los diseñadores no son observadores del mundo, sino observadores en el mundo⁶⁶⁴.

El neuropsicólogo William Grey Walter⁶⁶⁵ fue uno de los primeros en desarrollar la interacción entre diferentes agentes artificiales. La emergencia de estas interacciones mostraba patrones no lineales que exhiben características

⁶⁶³ Rutten, David. “Evolutionary principles applied to problem solving.” *I eat bugs for breakfast*. Marzo, 2011. <http://ieatbugsforbreakfast.wordpress.com/2011/03/04/epatps01/>

⁶⁶⁴ Glanville, Ranulph. “Try Again. Fail Again. Fail Better: The Cybernetics in Design and the Design in Cybernetics.” *Kybernetes* 36, n° 9/10, 2007. pp. 1173-1206.

⁶⁶⁵ Walter, William Grey. *The Living Brain*. Nueva York: Norton, 1953.

similares a las de la vida (el proyecto de Elmer y Elsie es considerado los primeros robots autónomos de la historia)⁶⁶⁶. Estas leyes sociales crean una especie de arquitectura proto-animalística que evoluciona a través de la negociación de las interacciones. Walter escribió la diferencia entre la imitación de la vida mágica y la científica. En la primera, a la gente le parecía aquello más vivo era lo que más se pareciese; en la segunda se entiende que las funciones son primarias a su forma y que a pesar de sus síntesis geométrica una agrupación de rectángulos con comportamientos sociales están más vivos que un ciborg bien representado.

En un artículo de Roy Ascott, “The Construction of Change”, 1964, el artista define los términos de una relación entre artista, audiencia y entorno:

*Cybernetics was the science of behavior and art was essentially behaviorist*⁶⁶⁷. ROY ASCOTT

y en 1967 en su manifiesto “Behaviourables and Futuribles”:

When art is a form of behaviour, software predominates over hardware in the creative sphere. ROY ASCOTT

Respecto al arte, hay dos vertientes o métodos bien definidos, que no dejan de ser sino readaptaciones de las dos funciones principales que ya se han manifestado en la tesis sobre lo computacional: la optimización y la generación (emergencia):

1. La elección y especificación de sistemas usados para generar trabajo artístico
2. La asignación de “fitness” a individuos en una población evolutiva basada en criterios estéticos o creativos.

En el primero los sistemas dinámicos (swarm intelligence) son bastante populares, puesto que son capaces de producir resultados complejos e inesperados a partir de reglas relativamente simples. Los fractales es otro de los mecanismos más habituales.

En el segundo, la aparición del IGA (interactive genetic algorithm)⁶⁶⁸ supone un avance relevante y poco habitual en los procesos de optimización. En él, el algoritmo hace una selección de los individuos que el artista considera más adecuados para convertirlos en los padres de las próximas generaciones. La IGA o ‘aesthetic selection’ introduce la posibilidad de que la creatividad no este completamente desligada de la intuición del creador. El proceso de búsqueda es simbiótico y colaborativo. Karl Sims⁶⁶⁹ o William Latham⁶⁷⁰ son algunos de los pioneros de este sistema, desarrollando sus obras a principios

⁶⁶⁶ Youtube. “Las tortugas de Grey Walter (1948).” Consultada 11 de mayo, 2015. <https://www.youtube.com/watch?v=ILULRImXkKo>

⁶⁶⁷ Wardrip-Fruin, Noah, y Nick Montfort. *The NewMediaReader*. Cambridge: MIT Press, 2003. pp.128-132.

⁶⁶⁸ Dawkins, Richard. *The Blind Watchmaker*. Nueva York: Norton, 1986.

⁶⁶⁹ Sims, Karl. Consultada 11 de mayo, 2015. <http://www.karlsims.com/>

⁶⁷⁰ Latham, William. “Secret Pasions.” Youtube. Consultada 11 de mayo, 2015. <https://www.youtube.com/watch?v=AN6ngsckRZs>

de los 90. Es también en este momento en el que comienza a desligarse el entendimiento de como se ha llegado a un resultado final. El autor puede no comprender el proceso que ha llevado a un genotipo concreto a producir una serie de fenotipos.

In artistic applications, we observe the importance of “strange ontologies”, whereby the artist forgoes conventional ontological mappings between simulation and reality in order to realize new creative possibilities. In scientific studies, the conceptualization of models is based on our understanding of reality and selectively. Try to preserve as much isomorphic mapping between reality and model as possible. Moreover, in implementing the model as a computer program, the programmer is forced to define basic ontological structures (or at least symbolic representations of them). We talk about individuals and ‘environments’ interacting through well-defined channels of possibility.

*In this mode of artistic enquiry we are no longer trying to model reality, but to use human creativity to devise new relationships and interactions between components*⁶⁷¹. JON MCCORMACK

053. /// Driessens y Verstappen, *Prometal*, 1995-2007. Foto de la web del autor. El algoritmo evolutivo genera formas detalladas bajo la premisa de que pueda ser impresas en 3D.

En contraposición a los estudios de vida artificial, donde “conocer y entender” comportamientos complejos y autoorganizaciones es la base, los artistas están más interesados en el “hacer y ser”, en crear mundos con sus propias reglas, más allá de meros simuladores de realidades físicas⁶⁷². Por ejemplo, en la configuración aleatoria de posibles esculturas, donde un algoritmo de geometría tridimensional basado en una tipología de célula autómatas ha de discernir que descendencia es susceptible de ser transformada en escultura (por ejemplo, no pueden quedar piezas sueltas, o no pueden superar un tamaño determinado)⁶⁷³.

*The concrete and formal approach can now enter into a union with new possibilities of vivification - vivification in the sense of bringing a work of art literally to life*⁶⁷⁴. DRIESSENS y VERSTAPPEN



⁶⁷¹ McCormack, Jon. “Design by Evolution” Hingston, Philip F. *Design by Evolution Advances in Evolutionary Design*. Berlin: Springer, 2008. p.99.

⁶⁷² Driessens, Erwin, Verstappen, Maria. “Natural processes and artificial procedures”, Hingston, Philip F. *Design by Evolution Advances in Evolutionary Design*. Berlin: Springer, 2008. p. 103.

⁶⁷³ Driessens y Verstappen. “Prometal.” Consultada 29 de Julio, 2014. <http://notnot.home.xs4all.nl/breed/prometal.html>

⁶⁷⁴ Driessens, Erwin, Verstappen, Maria, *op. cit.* 2008 p.119.

Durante la ‘Second Iteration Conference’ (Melbourne, 2001)⁶⁷⁵ Jon McCormack introduce el término de “lo sublime computacional”. Establece que un aspecto importante de lo sublime es la tensión entre miedo y placer, donde el placer viene dado por la capacidad de ser conscientes de lo que no podemos experimentar por nosotros mismos, y al mismo tiempo el miedo de que existan cosas tan grandes y potentes que queden fuera de nuestra comprensión. El contemplar procesos incontrolables que tienen lugar en la computadora, que podemos ver y alterar y que nosotros mismos desencadenamos, espectadores abrumados por la sensación de pérdida de control, y sin embargo, disfrutando al mismo tiempo del espectáculo de esta naturaleza artificial. A la luz de esta tesis y los proyectos expuestos en esta tesis, dicho sentimiento de lo sublime también se ha filtrado a la arquitectura.

Diseño evolutivo en ingeniería

Teniendo en cuenta la cronología y acontecimientos relacionados con los ES o Algoritmos Evolutivos en capítulos anteriores se omitirá en esta parte de la tesis una introducción histórica a los algoritmos. Sí ha de tenerse en cuenta, su ventaja sobre los primeros algoritmos optimizadores que aparecen al principio de la década de los 50, cuya eficacia dependía de las circunstancias y las variables del problema⁶⁷⁶. Los algoritmos evolutivos cobran toda su razón de ser ante las situaciones de elevada incertidumbre o gran número de incógnitas. A pesar de una capacidad computacional limitada en los años 80, los algoritmos evolutivos comienzan a usarse de manera regular en el diseño industrial⁶⁷⁷. A día de hoy, las computadoras son 1.000.000.000 de veces más potentes que sus homónimas a principios de los años 50. A pesar de las reticencias de los diseñadores más conservadores el sistema evolutivo se ha abierto camino como un proceso resolutor/solucionador de problemas sólido y extendido.

La ingeniería es una disciplina que ya de por sí lleva embebido un marcado carácter evolutivo. Durante los procesos de diseño (conceptualizar, formalización, y detallar) a menudo se repiten y se testean numerosas variaciones de los prototipos. El diseño evolutivo puede aplicarse a cualquiera de estas fases, ya sea para encontrar la solución óptima o soluciones innovadoras. Los “pros” detallados de la aplicación de los ES (evolutionary solvers) son⁶⁷⁸:

- Los objetivos de las funciones y sus restricciones no son lineales, dificultando la aplicación de métodos standard de optimización.
- Puede haber más de una solución óptima.

⁶⁷⁵ McCormack, Jon. “Art, emergence and the computational sublime.” *Second Iteration*. Melbourne: CEMA, Monash University Melbourne, 2001. pp. 67-81.

⁶⁷⁶ Deb, Kalyanmoy. “Evolutionary Design in Engineering.” AA.VV. *Design by evolution: advances in evolutionary design*. Berlín: Springer, 2008. pp. 273.

⁶⁷⁷ *Ibidem.*, pp. 273.

⁶⁷⁸ *Ibidem.*, pp. 267-268.

- Los problemas pueden considerar valores de diferentes naturalezas al mismo tiempo: esfuerzo, materiales, gráficos...

Los métodos clásicos de optimización fueron desarrollados siguiendo condiciones que son frecuentemente demasiado idealizadas para ser aplicadas a semejantes vaguedades sobre las tareas de diseño industrial⁶⁷⁹. Se listan los 3 casos en los que la aplicación de EO (evolutionary optimization) se considera recomendada:

- En la creación de nuevos diseños, siendo algunos de ellos mejor que los realizados por humanos.
- En optimización: objetivos únicos o múltiples, optimización dinámica vs estática, optimización determinística versus estocástica (stochastic).
- EO based multi-modal, capaz de encontrar diferentes soluciones óptimas en una sola generación.

Se sugieren a continuación algunos de los pasos para preparar el proceso⁶⁸⁰:

1. Prepara el caso:

a. Intentar resolverlo por otras metodologías. El fallo de ellas justifica mejor el uso de EO. La ausencia de resultado, un exceso de tiempo requerido o soluciones poco viables pueden ser motivo de justificación.

2. Desarrollar una metodología de EO:

a. En esta parte tener unos conocimientos sobre literatura de EO y estudios sobre simulaciones puede ser útil. La elección apropiada puede estar motivada por variables propias de la naturaleza, funciones objetivo y los condicionantes del proyecto.

b. Los condicionantes es mejor que sean procesados a través de la propia definición, pero si es necesario pueden introducirse hándicaps o penalizaciones en diferentes sectores.

c. Hibridar el proceso, combinar el algoritmo evolutivo con otros métodos también es francamente útil y recomendable.

3. Realizar un estudio paramétrico:

a. Reducir el número de parámetros al mínimo ayudará a facilitar el estudio. Los típicos valores que se encuentran son tamaño de la población, 'crossover', probabilidad de mutación, 'tournament size', 'niching parameters'.

b. Es importante que los valores no dependan de un número generado aleatoriamente o el valor de su semilla. Si esto ocurre es posible que haya un cambio importante en las características de los resultados.

4. Búsqueda de soluciones óptimas:

a. Tras realizar el estudio, tratar de reemplazar un EO para conseguir

⁶⁷⁹ Resulta curioso, ver como a nivel científico, ya el diseño de una pieza industrial resulta vaga. ¿Qué opinión debe merecer pues la arquitectura que reúne tantos ámbitos y aspectos tan vagos como "lo social, lo visual o lo emocional?"

⁶⁸⁰ DEB, Kalyanmoy, "Evolutionary Design in Engineering." Hingston, Philip F. *Design by Evolution Advances in Evolutionary Design*. Berlin: Springer, 2008. pp. 269-271.

la solución óptima tras un periodo de optimización del propio planteamiento.

5. Verificar y realizar análisis post-optimos.:

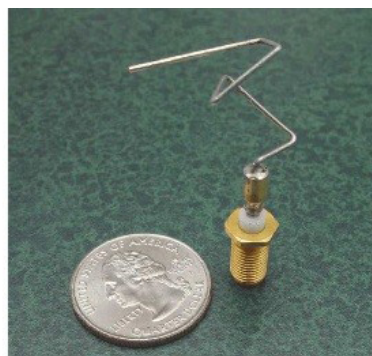
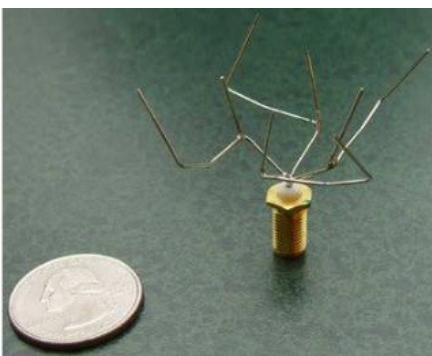
a. Los resultados deberían compararse con diferentes parámetros de EO para validar las opciones escogidas, y quizás arrojar luz sobre futuras decisiones.

Como se ha explicado, en lo que a la resolución de problemas mediante solucionadores evolutivos, el campo del diseño industrial considera su utilidad en situaciones de interminación o vaguedad. La arquitectura, por supuesto, lleva esa vaguedad a nuevos niveles. Pero ello también da más valor a los solucionadores evolutivos por las siguientes razones: si los problemas están bien definidos, y las soluciones son objetivas y únicas, la necesidad de un algoritmo evolutivo es menor. No hay interés en utilizar semejantes procesos para resolver una ecuación cuyo resultado puede ser calculado más rápidamente y con mayor exactitud.

Computers can become creative designers by using evolutionary process. Random variation is a key component of this creativity, for random variation is what provides the element of surprise that can generate something truly novel, something beyond just shifting and sifting through combinations of pieces of existing solutions. It is ironic, perhaps, that so much of engineering is aimed at removing noise and yet noise is an integral of the ingenuity that part engineering requires!⁶⁸¹. DAVID FOREWORD

Se citan en los sucesivos párrafos algunos ejemplos emblemáticos del uso de algoritmos evolutivos para fines industriales junto a otros de carácter experimental, dónde el estudio del propio algoritmo es el motivo del ejercicio.

054. /// AA. VV. 'X-band Antenna, 2003. Lohn, 2003. p. 2314. Fotografías de las antenas que muestran una estructura aparentemente poco lógica.



Primeramente, el sistema para el diseño de antenas desarrollado por la NASA supone uno de los ejemplos más extendidos en el uso de algoritmos evolutivos⁶⁸². Estas antenas que fechan a mediados de los 90, realizan modificaciones -dobles, ángulos y posiciones irregulares- en una antena estandar con el fin de optimizar la captación de patrones inusuales de radiación.

⁶⁸¹ Foreword, David. "Introducción." Hingston, Philip F., Luigi C. Barone, y Zbigniew Michalewicz. *Design by Evolution: Advances in Evolutionary Design*. Berlin: Springer, 2008. p. VI.

⁶⁸² Lohn, J.d., D.s. Linden, G.s. Hornby, W.f. Kraus, A. Rodriguez-Arroyo, y S.e. Seufert. "Evolutionary Design of an X-band Antenna for NASA's Space Technology 5 Mission." *NASA/DoD Conference on Evolvable Hardware, 2003. Proceedings.*, 2003. pp. 2313-2316.

MarI/O es uno de muchos programas basado en redes neuronales y algoritmos genéticos que demuestra un evidente aprendizaje y metodología para igualar y, en muchos casos, mejorar el rendimiento humano^{683 684}.

El carácter estocástico de estos algoritmos supone un papel relevante en el descubrimiento de IA. En el caso de Blondie24⁶⁸⁵, fue capaz de descubrir el concepto de movilidad o aprender movimientos del nivel de jugadores expertos sin que nadie le enseñase nada más que las reglas básicas.

Como último ejemplo, e hilando una vez más con lo biológico, una computadora logró resolver mediante ingeniería inversa un proceso biológico descubierto hace 120 años pero cuyo funcionamiento era desconocido⁶⁸⁶. Este hecho es de notable valor por varias causas: por un lado la computadora logra resolver el problema más allá de lo que originalmente se esperaba; por otro, la metodología permite entender mejor la relación entre genes y forma final, aproximando más el entendimiento biológico gracias a lo computacional.

3.3.3. Arquitectura evolutiva

En esta tesis, se pretende que la palabra arquitectura sea casi indistinguible de los comportamientos que implican el mundo natural a su alrededor. Un mundo donde los cuerpos, organismos, sistemas e incluso disciplinas comparten una cosa por encima de otra: su maleabilidad⁶⁸⁷. Las tendencias fijas y finitas que sirvieron para categorizar el mundo natural y el del hombre han quedado obsoletas. Las intersecciones de información, vida y complejidad material sugieren la posibilidad de una síntesis mucho más profunda.

Precisando, la descripción de complejos algoritmos que establecen las relaciones entre entidades -ya sean componentes, unidades, miembros, edificios individuales o espacios que están ligados en el lenguaje de programación y scripting contemporáneo- que una vez invocadas, pueden ser desatadas para autoorganizarse como pronósticos del comportamiento en los proyectos. Y estos comportamientos -aquellos que describen cambios, evolución, refinamiento, o distorsiones- revelan como un nuevo concepto de diseño emerge hoy. Es esa revolución en la forma -la forma de cómo el proceso

⁶⁸³ Youtube. "MarI/O Machine Learning for video games." Consultada 11 de mayo, 2015. https://www.youtube.com/watch?list=PLrEnWoR732-BHrPp_Pm8_VleD68f9s14-¶ms=OAFIAVgF&v=qv6UVOQ0F44&mode=NORMAL&app=desktop

⁶⁸⁴ Stanley, Kenneth. "Evolving neural networks through augmenting topologies." The MIT press journals. <http://nn.cs.utexas.edu/downloads/papers/stanley.ec02.pdf>

⁶⁸⁵ Fogel, David B. *Blondie24: Playing at the Edge of AI*. San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers, 2002.

⁶⁸⁶ Collins, Katie. "Computer independently solves 120 year biological mystery." *Wired*. Consultada 30 de junio, 2015. <http://www.wired.co.uk/news/archive/2015-06/05/computer-develops-scientific-theory-independently>

⁶⁸⁷ Spyropoulos, Theodore, Brett D. Steele, John H. Holland, Ryan Dillon, Mollie Claypool, John Frazer, Patrik Schumacher, Makoto Sei Watanabe, David Ruy, y Mark Burry. *Adaptive Ecologies: Correlated Systems of Living*. Londres: Architectural Association, 2013. p.4.

de diseño afecta en el tiempo de la vida del proyecto, no la forma del edificio y su apariencia- el descubrimiento más importante aquí⁶⁸⁸. Además de, el modelado 3D y los procesos computacionales están resultando especialmente útiles para comprender y crear verdaderos sistemas Evo-Devo debido a que aún existe una fuerte inercia en tratar los procesos de evolución y desarrollo por separado⁶⁸⁹.

En septiembre de 1969, la revista *Architectural Design* abordará por primera vez con carácter divulgativo la interacción y la computación como medio para la arquitectura. Entre proyectos de Nicholas Negroponte⁶⁹⁰, Cedric Price y Warren Brodey encontramos una cita de Gordon Pask:

*Architects are first and foremost system designers who have been forced to take an increasing interest in the organizational system properties of development, communication and control*⁶⁹¹. GORDON PASK

Estos primeros intentos requieren forzosamente, por necesidad, la incorporación de diversas disciplinas y destacan por su transversalidad, característica que en la actualidad se trata de llevar al extremo, en un intento de unificar valores y estrategias cuando las fronteras entre ellas se han disuelto de tal manera que es imposible delimitarlas. Neri Oxman pretende establecer un esquema de aproximación al proyecto en el reciente artículo "Age of Entanglement"⁶⁹², que hace a su vez referencia al artículo de Daniel Hillis sobre lo digital y la interdisciplinariedad⁶⁹³.

La primera referencia indiscutible y que asienta buena parte de las bases respecto a la arquitectura evolutiva es la figura de John Frazer, que en 1995 realiza una recopilación de sus anteriores proyectos -y nuevo estado de la cuestión- a través de la publicación "An evolutionary architecture", que abarca la investigación de 30 años. La publicación de este libro es coincidente con una exposición de la misma temática en la Architectural Association del 27 de Enero al 25 de Febrero, donde Frazer reitera su proposición del modelo de la naturaleza como la fuerza generativa para la forma arquitectónica⁶⁹⁴.

El prototipado del proyecto de Frazer es emulado a través de modelos creados

⁶⁸⁸ Steele, Brett, "Architecture's Adaptation", Spyropoulos, Theodore, Brett D. Steele, John H. Holland, Ryan Dillon, Mollie Claypool, John Frazer, Patrik Schumacher, Makoto Sei Watanabe, David Ruy, y Mark Burry. *Adaptive Ecologies: Correlated Systems of Living*. Londres: Architectural Association, 2013. p.8.

⁶⁸⁹ Love, Alan. *Session: Evo-Devo, explanatory integration, and physical science*. ISHPSSB 2011 MEETING, Salt Lake City, Utah, USA, 2011. Conferencia.

⁶⁹⁰ Seek, un entorno controlado por ordenador diseñado por The Architecture Machine y presentado en Nueva York en 1970.

⁶⁹¹ Pask, Gordon, "The Architectural Relevance of Cybernetics", *Architectural Design*, September 1969, p. 494.

⁶⁹² Oxman, Neri. "Age of Entanglement." *JoDS Journal of design and science*. Consultada 30 de enero, 2016. <http://jods.mitpress.mit.edu/pub/AgeOfEntanglement>

⁶⁹³ Hillis, W. Daniel. "The Age of Digital Entanglement." *Scientific American*. Vol. 303, 2010. p. 93.

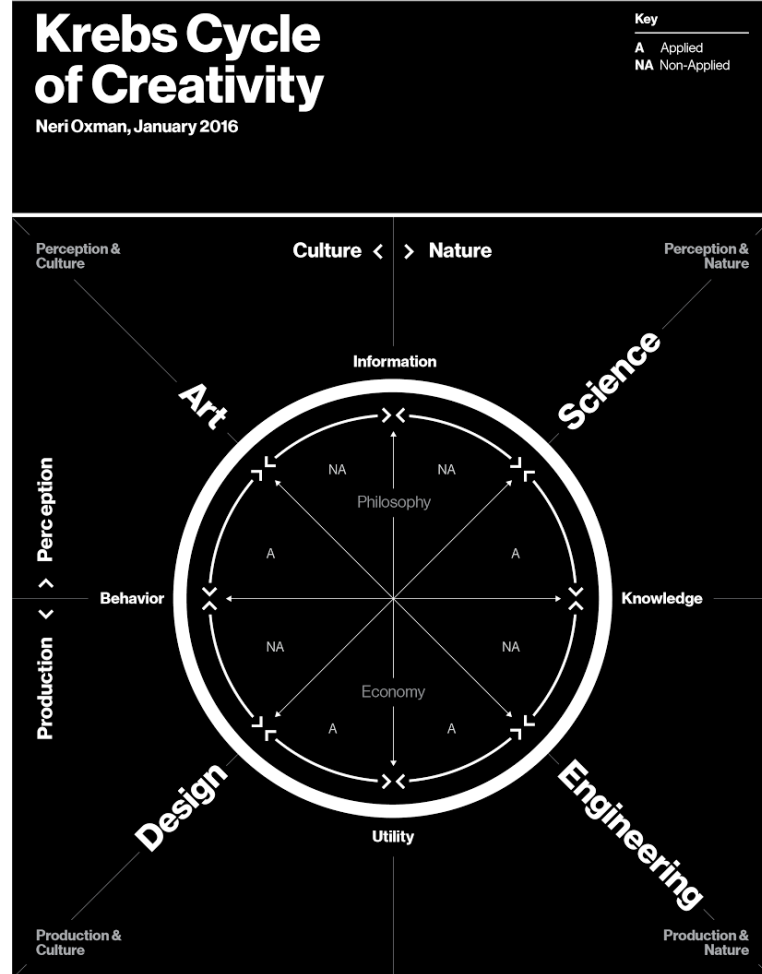
⁶⁹⁴ Frazer, John. *An Evolutionary Architecture*. Londres: Architectural Association, 1995. p. 9.

virtualmente que responden a los cambios del entorno. La arquitectura es tratada como una forma de vida artificial, sujeta a los principios de morfogénesis, codificación genética, replicación y selección. Los conceptos arquitectónicos son expresados como reglas generativas. Estas reglas darán lugar a instrucciones y la generación de forma. El ordenador simula y evalúa el rendimiento y el desarrollo prototípico de estas arquitecturas en un entorno simulado.

055. /// Esquema multidisciplinar. Imagen del artículo-web Oxman, 2016.
Propuesta relacional entre las diferentes disciplinas.

Una de las preocupaciones de John Frazer -y aquí se denota la profesión arquitectónica- es que los 'blueprint'⁶⁹⁵ de la arquitectura no dependen o cambian con el entorno, mientras que en la biología su 'blueprint' se ve alterado en base al contexto. Es cierto que en arte e ingeniería, como ámbitos de diseño de objetos -normalmente- ajenos al entorno, no se había destacado esa problemática que, a la larga, puede desembocar en el diseño responsivo (y de ahí lo cibernético). En 1987, Eindhoven, Frazer presentará en el "Computer-Aided Architectural Design Futures Conference" el concepto de 'soft modeling' aludiendo a una capa superior de información que afectaba a la relación de los elementos. Sin duda una de los beneficios de la integración de la informática en la arquitectura es el carácter más científico y el análisis de datos rigurosos. Frazer hará especial hincapié en el entorno y asoleamiento: dibujar la sombra que proyecta cualquier edificio en cualquier parte del mundo, programar elementos que proyecten sombra sobre el mismo edificio, el cálculo de la penetración de la luz en el interior del edificio... hacer de esos datos la respuesta de la arquitectura⁶⁹⁶.

Otros ejemplos de responsabilidad en la arquitectura son el 'Fun Palace' de Cedric Price (1970), el 'FreshWater pavilion' de NOX y Kas Osterhuis (1997), el 'Blur Building' de Diller Scofidio (2002), la instalación Hylozoic Ground de Philip Beesley, en la vial de Venecia (2010), el 'Lotus Dome' de Studio Roosegaarde (2010), la 'HYPOSURFACE' de dECOi (2011), el 'Smart Shell' en la universidad de Stuttgart (2014), y el 'Furl: soft pneumatic pavilion' de François Mangion y Becky Zhang (2014). En cualquier caso, la mayoría de los



⁶⁹⁵ En este caso John Frazer atribuye el término 'blueprint' a lo que en términos biológicos podrías considerar genotipo.

⁶⁹⁶ Frazer, John. *An Evolutionary Architecture*. Londres: Architectural Association, 1995. p. 36

proyectos llevados a cabo hacen cuenta de comportamientos pre-calculados y no son respuestas evolutivas, adaptativas al cambio del entorno. Es decir, su respuesta es en tiempo real, su comportamiento no.

Por supuesto, huelga decir que Frazer aboga por el proceso libre de diseño condicionado y confía plenamente en los procesos autómatas de emergencia que se han contemplado en capítulos anteriores:

The tendency to invest nature with vitalist forces is common in both science and poetry. In the framework of our analogy, we will sometimes apply the word 'design to nature for convenience of expression: we will also apply it to our new model with purposeful intent. To us the connotations of the term 'design' are very different from the norm: when we 'design', we are clear in our intentions, but perhaps blind to the eventual outcome of the process that we are creating. This 'blindness' can cause concern to those with traditional design values who relish total control. It can alarm those who feel that what we are proposing might get out of control like a computer virus. However we remain convinced that the harnessing of some of the qualities of the natural design process could bring about a real improvement in the built environment⁶⁹⁷. JOHN FRAZER

Lo responsivo se abordará en adelante a través de diferentes figuras, todas ellas intentando solventar la resolución entre arquitectura y contexto, adecuación y adaptación gracias a lo cibernético. En una aproximación histórica, William Mitchell⁶⁹⁸ resalta el estudio de iglesias de Leonardo da Vinci como uno de los primeros ejemplos de arquitectura generativa⁶⁹⁹. Sin embargo Frazer considera estos ejemplos meros sistemas de combinaciones o configuraciones. Y critica a Mitchell la falta de criterio para buscar la solución al problema planteado que ha generado dichas combinaciones. Warren Brodey propone en su artículo de “The Design of Intelligent Environments”, un entorno evolutivo, autoorganizativo, complejo, predictivo, propositivo... ¿Puede enseñarse a un contexto a ser complejo e inteligente organizativamente, para finalmente ser evolutivo?⁷⁰⁰ Brodey acuña estos valores como soft-architecture⁷⁰¹. Y también Negroponte⁷⁰², tratará el tema de la arquitectura responsiva: tratando de “enseñar” el proceso evolutivo a una máquina para entrenarla en crecimiento y resistencia. Lamentablemente ni hardware ni software fueron capaces de dar respuestas en su momento.

⁶⁹⁷ Frazer, John. *An Evolutionary Architecture*. Londres: Architectural Association, 1995. p. 12.

⁶⁹⁸ Mitchell, William J. *The Logic of Architecture: Design, Computation, and Cognition*. Cambridge, MA: MIT Press, 1990.

⁶⁹⁹ Hace hincapié en el concepto de “gramática de formas”, o “combinación elemental de sistemas”. Se reitera en la tesis la temática de ‘shape grammar’ (uno de los temas del eCAADe 2015) y la combinación de elementos y sistemas tratada al comienzo del estilo de la arquitectura paramétrica.

⁷⁰⁰ Brodey, W., *The Design of Intelligent Environments: Soft Architecture, Landscape*, Autumn 1967 pp. 8-12.

⁷⁰¹ Término usado también por Salvador Dalí en conversación con Le Corbusier, haciendo referencia a una arquitectura biológica, blanda, peluda.

⁷⁰² Negroponte, N. *The Architecture Machine*, MIT Press 1970.

Opuestamente a los anteriores, C. Alexander planteará de manera “equivocada” el papel de la computación en la arquitectura, alegando una postura no-emergente:

*A digital computer is, essentially, the same as a huge army of clerks, equipped with rule books, pencil and paper, all stupid and entirely without initiative, but able to follow exactly millions of precisely defined operations... at the moment, there are very few problems we know of in design that could be solved by such a an army of clerks*⁷⁰³.
ALEXANDER

Estas palabras son en ciertas circunstancias totalmente veraces, y si bien algunos asocian una especie de halo mágico a aquellas geometrías producidas por el ordenador, en la mayoría de los casos el ordenador no está haciendo nada nuevo. Solo repite mil veces más rápido lo que nosotros podríamos haber hecho a mano. Cuando esto ocurre, estamos anteponiendo la economía a la emergencia, lo práctico a lo innovador, lo directo por lo inesperado. Ahora bien, cuando el software, la computación, deja de convertirse en una herramienta de proyección para convertirse en el proyecto mismo (o parte de él al menos), cuando se permite la aparición de la Emergencia, el lujo de desconocer el resultado final... en ese momento la computación deja de ser un ejército de delineantes para convertirse en el socio del arquitecto. La evolución es además, una de esas tareas que la armada de delineantes puede resolver.

Provocar esa emergencia depende en gran medida del entendimiento y comprensión de patrones y sus implicaciones, algunos de los cuales se han mencionado en el capítulo “Emergencia y sistemas complejos”. Mientras que la ciencia busca la explicación de dichos procesos, la arquitectura (el diseño) busca la generación de los mismos. Modelos generados para propósitos arquitectónicos podrían ser valiosos si imitan un modelo que los científicos buscan descifrar.

Los procesos, sean cuales sean, por su carácter computacional están restringidos por la capacidad de los procesadores contemporáneos. Empujar las fronteras de lo digital siempre requiere ser eficiente en términos de economía: economía en software y economía en hardware. La dieta en procesos computacionales es primordial para evitar caer en un callejón sin salida. Ello requiere un buen entendimiento de los subprocesos que se dan y cuanto esfuerzo computacional requieren: aún en la actualidad, la mayor parte de los procesos de evaluación son esquemáticos, y solamente al final se producirá la transformación material del output. Este proceso obligará a repensar y poner en duda todos y cada uno de los aspectos que componen el código, y a menudo requerirá desviarse del camino planteado para aproximar el problema desde otro punto de vista. Una vez más, es más importante formular bien la pregunta adecuada que conocer la respuesta.

⁷⁰³ Alexander, C. “*The Question of Computers in Design.*” Verebes, Tom. *Masterplanning the Adaptive City: Computational Urbanism in the Twenty-first Century.* Londres: Routledge, 2014. p. 103. (Publicación original en “*The Question of Computers in Design.*” *Landscape.* Otoño, 1967). .

De la incorporación de lo digital y procesos anteriores, Frazer critica el interés de los sistemas CAD en la detallada descripción y modelado de objetos (como individuos) en lugar de tratar la exploración de alternativas. Menciona dos particularmente: una conocida como “parameterization, the description of a family of parts allows the specification of a range of parameters, usually dimensions” que únicamente crea una implicación flexible de las estructuras de datos existentes. Y otra es “shape grammar”, que permite la combinación de reglas para elementos y la exploración de los mismos a través de sus posibles permutaciones⁷⁰⁴.

En relación al ‘shape grammar’ uno de los experimentos más fructuosos e interesantes a nivel arquitectónico será la evolución de columnas toscanas⁷⁰⁵. Usando las proporciones de los dibujos de James Gibbs para la columna puede encontrarse la columna ideal (su columna) en pocas generaciones, o crear una amplia variedad de columnas que de alguna manera mantienen unas leyes similares y que podrían adaptarse a diferentes situaciones.

Both the data structures and the user-interfaces of CAD systems are designed to develop the geometry of form rather than the geometry of relationships. JOHN FRAZER

Frazer no busca crear una gramática o una sintaxis que sea capaz de resolver o ensamblar cualquier elemento, haciendo alarde de multitud de elementos configurables. Sino la búsqueda de la Adaptación Iterativa. Es decir, un modelo que va respondiendo en pasos a estímulos exteriores. El ‘feedback’, “la selección natural” que afecta a la arquitectura es clave. Las formas geométricas podrían ser plásticas y fluidas⁷⁰⁶.

This is what we are attempting to do at the moment: to evolve architectural life from nothing, with no preconceptions, with no design... just blind tactics. Natural selection has superb tactics, but no strategy - but tactics, if pursued without thought for the cost and for long enough, can get to places which no strategist would dream of⁷⁰⁷. JOHN FRAZER

“The Universal Constructor” mostrado por primera vez en la AA en mayo de 1990 será uno de sus proyectos más importantes, atrayendo considerable atención de la escena mundial. Ese sería uno de las primeras herramientas de explicación y demostración del radical y nuevo proceso de diseño. “The Universal Constructor” implica una sucesión de procesos en los que cubos se van deformando de manera paulatina a través de los transformadores básicos

⁷⁰⁴ Asociado al concepto de sistemas complejos: ‘Minimum inventory-Maximum diversity.’ en Pearce, Peter. *Structure in Nature Is a Strategy for Design*. Cambridge: MIT Press, 1978.

⁷⁰⁵ The evolution of Tuscan columns by genetic algorithms: John Frazer with Peter Graham, research assistant, 1993.

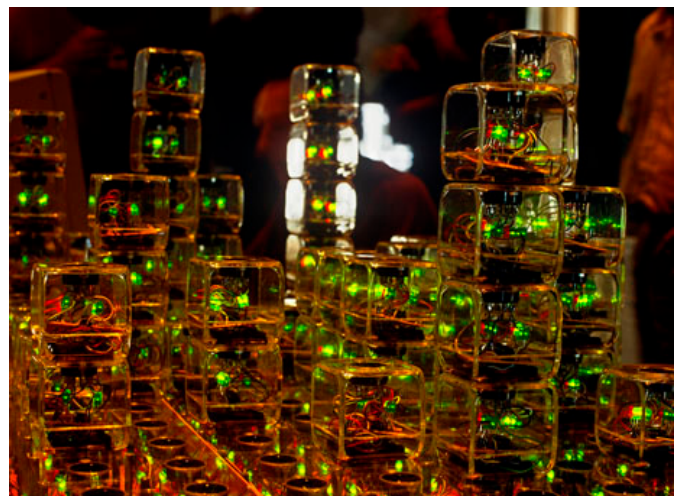
⁷⁰⁶ Maver, Thomas W., y Harry Wagter. *CAAD Futures '87: Proceedings of the Second International Conference on Computer Aided Architectural Design Futures, Eindhoven, the Netherlands, 20-22 May 1987*. Amsterdam: Elsevier, 1988.

⁷⁰⁷ Frazer, John. *An Evolutionary Architecture*. Londres: Architectural Association, 1995. p. 101.

(mirror, non-uniform, scale, move, copy, rotate...). El proceso constituye una serie de loops caóticos que se originan en el marco de un solucionar evolutivo, aunque hubo intervención y selección manual en algunos puntos del proceso la mayor parte de los 2000 pasos que generó el algoritmo fueron automáticos e impredecibles⁷⁰⁸. “The universal constructor” cuenta por su parte una fuerte vertiente a nivel de periféricos que cambian el algoritmo en base a la intervención del usuario, así como una estructura de hardware reordenable que emite, recibe y establece relaciones nuevas. En este proyecto la experimentación a nivel de hardware es tan importante como la de software, aspecto en el que no se profundizará en esta tesis pero que merece reconocimiento.

056. /// Frazer, *Universal Constructor*, 1990. Frazer, 1995. p. 101.

A pesar de que el objetivo original de los algoritmos genéticos es optimizar o solucionar, Frazer verá especial valor en diseñar algoritmos con criterios conflictivos e introducir técnicas mixtas de selección computadora-humano para favorecer la impredecibilidad de los resultados. Sin embargo, estos usos mixtos no resultan útiles en grandes cantidades, lo cual llevará a la creación de un solucionador jerárquico. La interpretación de solucionador jerárquico para Frazer es la intervención de diferentes inputs a diferentes niveles. Estos inputs pueden ser entre otros, el ‘feedback’ del entorno que no afecta al resultado final, sino a una parte intermedia en el proceso de creación.



La evolución jerárquica de los sistemas emergentes en la arquitectura también recibe el interés del filósofo De Landa: advierte que los procesos algorítmicos en la arquitectura están lejos de ser precisos debido al entendimiento y la construcción de los mismos. Se hace en la mayoría de los casos el uso de cualidades extensivas (que pueden ser divisibles o son directamente proporcionales, como el volumen, la longitud...). Con todo son las cualidades intensivas (“intensive thinking”) las que establecen las verdaderas relaciones de la arquitectura. Son las diferencias entre cualidades intensivas las que despiertan los cambios y la emergencia, dirigen los procesos de variación como la embriogénesis^{709 710}. No es suficiente la traducción del código genético digital en un resultado visible, un producto, fácilmente solucionable gracias al software CAD, donde el código genético son la sucesión de órdenes que ya de por sí sirven para visualizar y transformar las matemáticas en geometría.

Si el arquitecto no es capaz de trasladar esos valores intensivos en el algoritmo (estrés estructural, cambios termodinámicos, relaciones sociales incluso...) un

⁷⁰⁸ Frazer, John. op. cit. 1995. p. 46

⁷⁰⁹ Las teorías aquí descritas por De Landa se basan en consideraciones del filósofo Deleuze.

⁷¹⁰ Deleuze, Gilles. *Difference and Repetition*. Nueva York: Columbia University Press, 1994. p. 222.

edificio virtual no será capaz de evolucionar como edificio. Los elementos no han de perder su función, su función es lo que ha de guiarlos en sus cambios y adaptaciones.

Thus, architects wishing to use this new tool must not only become hackers (so that they can create the code needed to bring extensive and intensive aspects together) but also be able “to hack” biology, thermodynamics, mathematics, and other areas of science to tap into the necessary resources. As fascinating as the idea of breeding buildings inside a computer may be, it is clear that mere digital technology without populational, intensive and topological thinking will never be enough⁷¹¹. DE LANDA

En su proyecto ‘metabolism’, Frazer ya trata de abordar ese funcionalismo jerárquico basado en valores arquitectónicos, disfrutando de una relación termodinámica abierta con el entorno, la economía y la sociedad. Responderá en concordancia con el feedback, almacenando información mientras usa un proceso de autopoiesis, autocatalisis, comportamiento emergente para generarse a sí mismo. La relación simbiótica con sus habitantes y el entorno del edificio.

Our new architecture will emerge on the very edge of chaos, where all living things emerge, and it will inevitably share some characteristics of primitive life forms and from this chaos will emerge order: order not particular, peculiar, odd or contrived, but order generic, typical, natural, fundamental and inevitable – the order of life. JOHN FRAZER

Todos estos procesos de automatización y responsabilidad no han de preocupar al arquitecto, pues su importancia no se diluye en la autonomía de la arquitectura. En sus últimas conclusiones, Frazer apunta a la existencia de un ‘extended architect’⁷¹² y define dos nuevos objetivos para la arquitectura evolutiva:

- Evolucionar también las ‘seeds’ (semillas), los códigos que usamos para evolucionar. ¿Puede crearse un sistema que requiera un feedback masivo pero que sea capaz de generar una única semilla como respuesta a toda esa información? Obviando la búsqueda de la maquina universal o el hallazgo de la sopa primigenia, la raíz original de la cual parte todo el abanico Darwiniano, ¿qué ocurre si evolucionamos la evolución? **
- La construcción mediante Autoassembling⁷¹³ y la materialidad en el modelo. Ingeniería molecular, nanotecnología, o ingeniería genética. Ámbitos que retoman el concepto de biología sintética⁷¹⁴ y que deben

⁷¹¹ DeLanda, Manuel. “Deleuze and the use of the genetic algorithm in architecture.” Consultada 11 de mayo, 2015. <http://www.cddc.vt.edu/host/delanda/pages/algorithm.htm>

⁷¹² Frazer, John. op. cit. 1995. p. 100.

⁷¹³ Frazer desconoce la existencia de las impresoras 3D en el momento de formular estos objetivos, y como tal considera el autoensamblamiento como el mecanismo más probable para definir la arquitectura. Frente a la impresión 3D, ofrece más dificultades geométricas pero también más facilidad al cambio y la responsabilidad.

⁷¹⁴ Capítulo en esta tesis (2.4.2): lo biológico como software.

resolver la expresión y supervivencia del genotipo⁷¹⁵.

Históricamente, los personajes más relevantes parecen coincidir en que la meta final es un edificio que crece por sí mismo, materia replicante que se autoorganiza, ya sea a través de ingeniería molecular, nanotecnología o ingeniería genética. Frei Otto sugirió estructuras que se desarrollaban. Doernach y Katavolos imaginaron estructuras orgánicas erigidas a partir de reacciones químicas. Alvy Ray Smith visionó edificios que crecían desde un único ladrillo-huevo. Charles Jencks se refirió a escenas de “Barbarella” mostrando la emergencia de formas humanas y vegetales. Cairns-Smith vislumbra minerales replicantes que progresivamente aumentan en desarrollos más complicados. El último número de la revista Archigram contenía un paquete de semillas de David Greene⁷¹⁶...

‘Wicked Problem’

Nothing is as dangerous in architecture as dealing with separated problems. If we split life into separated problems we split the possibilities to make good building art⁷¹⁷. ALVAR AALTO.

El mismo John Frazer, defensor de la arquitectura evolutiva a través de lo computacional y lo cibernético, advierte del falso halo que los ordenadores pueden ejercer sobre pésimos resultados aparentemente optimizados:

*However computers are not without their power dangers. If unimaginatively, they have a tendency to: dull critical used faculties, induce a false sense of having optimized a design which may be fundamentally ill conceived, produce an atmosphere where any utterance from the computer is regarded as having divine significance distort the design process to fit the limitations of the most easily available program, distort criticism to the end-product rather than to an examination of process, and concentrate criticism and feedback on aspects of a problem which can be easily quantified⁷¹⁸. J. FRAZER***

También el artículo de Liddament’s (enfocado al diseño) advierte de que los algoritmos genéticos, poderosas herramientas para dominar la ingeniería y la lógica, no son suficientemente prácticos para adaptarse a la actividad del diseño. Esto se debe a que el diseño es en la mayoría de los casos, un “problema indefinido”. Incluso una exhaustiva programación por parte del diseñador nunca garantizará la efectividad y éxito del algoritmo por sí mismo⁷¹⁹.

⁷¹⁵ Dawkins, Richard. *The Extended Phenotype: The Gene as the Unit of Selection*. Oxford: Freeman, 1982. p. 233.

⁷¹⁶ Katavolos, W. “Organics.” *Programmes and Manifestoes on 20th century Architecture*. Lund Humphries, 1970.

⁷¹⁷ Kalach, Alberto, y Miquel Adrià. Alberto Kalach. Naucalpan: Gili, 2004.

⁷¹⁸ Frazer, John. op. cit. 1995. p. 18.

⁷¹⁹ Liddament, T. “The Computationalist Paradigm in Design Research.” *Design Studies* 20, no. 1, 1999.

Una vez advertidas las dificultades para formular un criterio de adaptabilidad adecuado y las vías para adaptarlo, se recomienda de nuevo ser especialmente cautos en el procedimiento y lógica usados a la hora de establecer dichos enunciados. Estas consideraciones, que también forman de parte de las conclusiones, destacan los puntos desarrollados por Horst Rittel y Melvin Webber en 1973⁷²⁰ y cuyo artículo da nombre a este subcapítulo. La subjetividad inherente en la disciplina arquitectónica, inevitable, continúa siendo foco de disputas en el presente, tanto en el ámbito profesional como académico. Las consideraciones de Rittel y Webber siguen frescas y actuales, y sirven para mantener alerta al arquitecto formulador de futuros criterios de adaptabilidad.

Un ‘wicked problem’ (“problema retorcido”, no es una expresión propia de la lengua española) es un concepto originalmente usado en planificación social para describir un problema que es difícil o imposible de resolver dado que presenta requisitos incompletos, contradictorios y cambiantes que generalmente son difíciles de reconocer.

...and it makes no sense to talk about “optimal solutions” to social problems unless severe qualifications are imposed first. Even worse, there are no “solutions” in the sense of definitive and objective answers.

Some have arrived at deep pessimism and some at resignation. To them, planning for large social systems has proved to be impossible without loss of liberty and equity. Hence, for them the ultimate goal of planning should be anarchy, because it should aim at the elimination of government over others. Still another group has arrived at the conclusion that liberty and equity are luxuries which cannot be afforded by a modern society, and that they should be substituted by “cybernetically feasible” values...

Optimization relies entirely on being able to quantify the goal we seek, but it then ignores all other considerations. Computational methods in general tend to lend themselves to easily quantifiable phenomena, but it may often be the case that these are not the most important. Brian Lawson terms this a ‘numerical measuring disease’, in which we might be blinded to what is really crucial by that which is simply easy to measure.

What is more certain is that progress in these areas would seem to demand at least two different ways of thinking. A scientific approach generally demands hard, quantifiable hypotheses, and addresses them by examining isolated and repeatable phenomena. A design approach usually requires open speculation, but is embedded in complexity of specific cases. These questions of uncertainty sit in both worlds, and will require both kinds of thinking to answer.

⁷²⁰ Rittel, Horst, y Webber, Melvin, “Dilemmas in a General Theory of Planning”, *Policy Sciences*, 4, Scotland, 1973. pp. 155-169.

La ausencia de soluciones óptimas, la resignación de los resultados, la cuantificación de los objetivos, la omisión de otras consideraciones, la abstracción de los datos -enfermedad de la medición de números-... con el último párrafo se manifiesta claramente que el análisis numérico ha de compaginarse con una lógica y comprensión humana, abierta a la especulación.

En este documento se seleccionan una serie de puntos (de los 10 originales) aplicados al problema de planeamiento de ciudades y problemas sociales, muchos de los cuales coinciden con criterios y aspectos que han de tenerse en cuenta durante el uso de formulación de “enunciados evolutivos” y que a continuación se describen:

As you will see, we are calling them “wicked” not because these properties are themselves ethically deplorable. We use the term “wicked” in a meaning akin to that of “malignant” (in contrast to “benign”) or “vicious” (like a circle) or “tricky” (like a leprechaun) or “aggressive” (like a lion, in contrast to the docility of a lamb). We do not mean to personify these properties of social systems by implying malicious intent. But then, you may agree that it becomes morally objectionable for the planner to treat a wicked problem as though it were a tame one, or to tame a wicked problem prematurely, or to refuse to recognize the inherent wickedness of social problems.

(Punto 1) ‘There is no definitive formulation of a wicked problem.’

El entendimiento del problema y la resolución del problema son dependientes el uno del otro. Así, no es posible anticipar todas las preguntas ni es posible concebir todas las soluciones.

La formulación del problema es en sí el primer problema. Formular el problema y concebir la solución es lo mismo, ya que cada especificación del problema se establece en la dirección en la que el problema es considerado. No puede buscarse información relevante sin una orientación hacia un concepto de solución. No se puede entender y luego solucionar.

Las aproximaciones de “segunda generación” deben basarse en un modelo previo sujeto a argumentación, crítica y juicio, a partir de las cuales puede establecerse un criterio contextualizado.

(Punto 2 y 3) ‘Wicked problems have no stopping rule y Solutions to wicked problems are not true-or-false, but good-or-bad.’

Los problemas retorcidos no tienen un final, no hay una manera de saber si se ha encontrado la mejor solución porque no se sabe cuál es la mejor solución. Simplemente, se agotará el tiempo, o los recursos, o el interés (de alguna forma, dejando la mejor, igual que el solucionador evolucionario). “Es suficientemente bueno”. Igualmente las soluciones no serán falsas o verdaderas, sino mejores o peores.

(Punto 6) ‘Wicked problems do not have an enumerable (or an exhaustively describable) set of potential solutions, nor is there a well-described set of permissible operations that may be incorporated into the plan.’

Si bien es cierto que esta afirmación es una obviedad para toda la arquitectura, no está de más recalcar que la arquitectura originada a través de software más avanzado continúa teniendo los mismos

problemas. Es imposible abarcar el infinito geométrico, si bien resulta más sencillo contrastar las variantes de una sola posibilidad, los ES permitirán al arquitecto explorar muchísimas más soluciones que mediante otros métodos tradicionales (maquetas, croquis, o planos).

(Punto 9) 'The existence of a discrepancy representing a wicked problem can be explained in numerous ways. The choice of explanation determines the nature of the problem's resolution.'

Este debiera ser el punto más a tener en cuenta por el arquitecto debido a que pone de manifiesto su propia profesión propositiva. Elegir la manera de abordar el problema, seleccionar e identificar las causas de la dificultad, es el momento de mayor relevancia para el arquitecto pues definirá su posición y estrategia.

Conceptos susceptibles de ser parametrizados

A continuación se indica una lista de elementos cuantificables y susceptibles de ser incorporados como genes o criterios de adaptabilidad en un proceso evolutivo asociado a un proyecto arquitectónico. Los siguientes conceptos fueron debatidos con los alumnos del Master en Arquitectura Biodigital, a los cuales se les pidió que desarrollasen sus propias listas como ejercicio. Estas listas no presumen ser absolutas y muchos otros conceptos son susceptibles de ser incorporados. Se pretende con ellas crear un abanico de posibilidades al alcance del arquitecto para que sea consciente de las opciones y valores de la arquitectura que pueden ser sometidos a cambios evolutivos.

Este registro reavivará el discurso sobre la objetividad en la arquitectura y la toma de decisiones a medida que los valores que se pretenden cuantificar se alejan de lo puramente matemático o físico para entrar en el ámbito de la arquitectura más etérea o metafísica -valores a los que hacía mención De Landa-. El discurso sobre las decisiones proyectuales y su arbitrariedad podría extenderse indefinidamente, y se es consciente de que los sucesivos párrafos podrían entenderse o juzgarse como pseudo-ciencia. Los siguientes puntos defienden el aspecto positivo de esta aproximación:

1. No se pretende que haya formulas absolutas y perfectas capaces de describir y cuantificar cualquier término. De hecho todas y cada una deberían de ser revisadas en contraste con diferentes contextos.
2. El ejercicio de tratar de cuantificar esos valores/conceptos arquitectónicos arroja preguntas que permiten cuestionarse la naturaleza de los mismos y como los entendemos. En la mayoría de los casos, el diseñador descubrirá que decisiones relativamente sencillas del día a día se tornan increíblemente complejas cuando se pretende llegar al mismo resultado a través de las relaciones matemáticas. Coordinar los 'inputs' que las definen será un trabajo de introspección. Esto ampliará la comprensión de dichos valores/conceptos.
3. La lógica interna del concepto y las pretensiones iniciales del arquitecto pueden llevar a un redescubrimiento del proyecto y sus intenciones iniciales.

Hay dos motivos para insistir en la conversión a fórmulas matemáticas entendibles por la computación:

1. Tratar de optimizar de manera objetiva una serie de resultados en el abanico de las variaciones que puede generar un proyecto arquitectónico, y elegir -o ayudar- uno de ellos como definitivo.
2. Ser capaz de dar respuesta a proyectos que presentan cientos de casos distintos y que no son abordables uno a uno.

Por último, en un ejercicio de autocrítica, el arquitecto no ha de valorar tanto la perfección de este sistema de aproximación numérica, como la fe o la confianza injustificada sobre un criterio propio, subjetivo, e igualmente propenso a errores. El halo de perfeccionismo digital debe ser completamente disipado a la luz de que el diseñador mismo es el que establece los criterios por los cuales se rige el proceso computacional.

La primera lista, indiscutible, recoge algunos conceptos matemáticos que no implican discusión o problemática alguna. Son plenamente objetivos y provienen del sistema internacional de medidas.

BÁSICAS	DERIVADAS	DERIVADAS
<ul style="list-style-type: none"> • Longitud • Masa • Tiempo • Corriente eléctrica • Temperatura termodinámica • Cantidad de sustancia • Intensidad Luminosa 	<ul style="list-style-type: none"> • Área • Volumen • Densidad • Fuerza • Energía y trabajo • Presión • Potencia • (derivadas del campo electromagnético) • Iluminancia y flujo luminoso • (derivadas de la iluminación) • (derivadas de la radiación) 	<ul style="list-style-type: none"> • Frecuencia • Velocidad • Aceleración • Angulo plano • Angulo solido • (Derivadas del movimiento angular) • Viscosidad dinámica • Entropía • ...

Algunas de estas medidas pueden parecer totalmente ajenas a la composición arquitectónica -y probablemente lo son- pero con la incorporación de la computación y el acceso a los comportamientos que las definen la arquitectura puede hacer uso de ellas mediante ejercicios de abstracción. Por ejemplo, los campos magnéticos pueden servir para diseñar flujos de peatones, asignando diferentes cargas (positivas o negativas) a elementos que intervienen en el espacio y aumentando su potencia en relación con su importancia o visibilidad⁷²¹. Los fluidos también encuentran uso para poblar y definir diseños que se enfrentan a entornos preexistentes: los fluidos colisionan e interaccionan con su contexto, dependiendo de la presión o viscosidad de los fluidos simulados⁷²². Por supuesto, la luz, como elemento básico de la arquitectura define muchos de estos proyectos paramétricos, normalmente

⁷²¹ Genetic Architecture Office, *Train station park & parking*, Cornellà, 2013.

⁷²² Realflow. "Advanced simulations in architectural design." UCL Bartlett school of architecture. Consultada 11 de mayo, 2015. <http://www.realflow.com/product/production/casestudies/38/>

a través de una relación del vector normal de la superficie en cuestión en relación con una fuente de luz como podría ser el Sol.

La segunda lista implica relaciones conceptuales que hacen uso de algunas de las magnitudes anteriores y comienzan a incorporar incógnitas asociadas comúnmente a la arquitectura:

<ul style="list-style-type: none"> • Bordes, perímetro • Conectividad en una red • Exposición • Curvatura • Gravedad • Humedad • Espacio personal • Localización • Orientación • Subdivisión superficial 	<ul style="list-style-type: none"> • Cantidad • Coste de materiales • Circulación • Tensión o esfuerzo • Usos • Angulo de visión • Visibilidad • Zonificación • ...
--	--

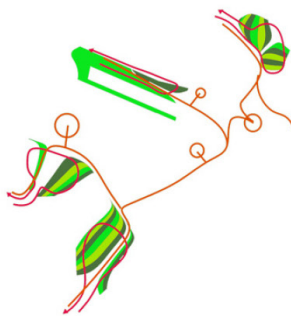
057. /// Estévez-Navarro, Genetic Architectures Office, *Train station park & parking*, Cornellà, 2013. Diagramas de Diego Navarro. Propuesta cuya distribución se basa en el uso de campos electromagnéticos.



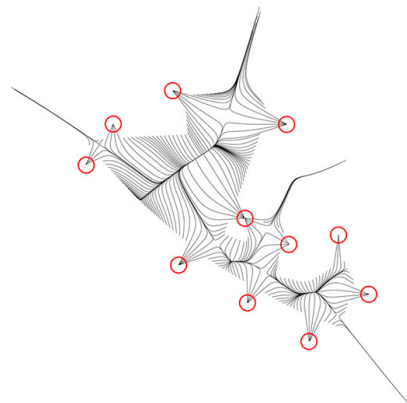
Bandas de plantas aromáticas



Flujos peatonales de pavimento no vegetal



Flujos rodados y bandas de parking



Todos estos valores pueden ser combinados para optimizar (máx. o min.) cualquier tipo de necesidad en la arquitectura: reducción de ruido, minimizar gasto de material, análisis estructural (para optimización estructural⁷²³ o minimizar la curvatura de una superficie en cubierta⁷²⁴), infraestructuras y su distribución efectiva de recorridos, triangulación óptima o eficiencia topológica, impacto medioambiental en ecosistemas, distribución urbana en pos de una mayor conectividad, organización de espacios públicos, exposición solar en la fachada⁷²⁵, proporción de la envolvente respecto a espacios

⁷²³ Herzog & De Meuron. *Estadio olímpico de Beijing*. China, 2008.

⁷²⁴ Ito, Toyo. *Crematorio de Kakamigahara*. Japón, 2004.

⁷²⁵ Besserud, K. "Architectural Genomics." *Silicon + Skin: Biological Processes and Computation: Proceedings of the 28th Annual Conference of the Association for Computer Aided Design in Architecture (ACADIA)* Minneapolis: ACADIA, 2008. pp. 238-245.

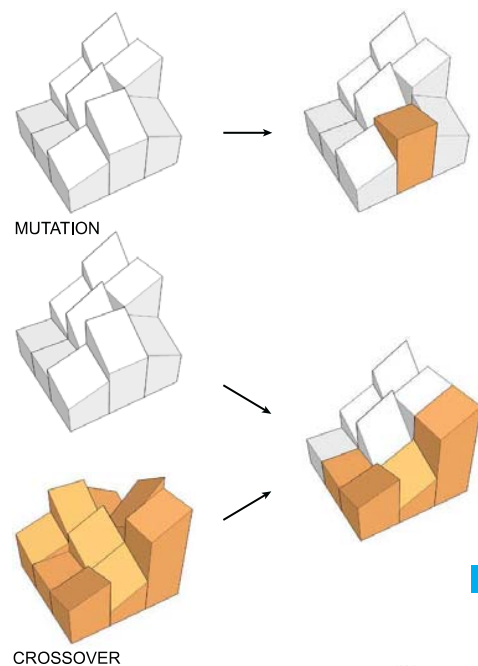
interiores... o una agrupación de los mismo⁷²⁶. Y mientras sean cuantificables debería de ser indiscutible su utilidad y aplicación.

Crearé mayor controversia la intervención (y necesaria cuantificación para su parametrización) de términos como confort, interacciones sociales, estéticamente agradable, inmersión, multifunción... Términos arquitectónicos que se adentran en lo interpretable y lo personal. Se pone de relevancia la ausencia de ejemplos similares y se anima al gremio arquitectónico a aventurarse en la elaboración de una lista de “conceptos subjetivos arquitectónicos parametrizados”. **

058. /// Diagrama evolutivo de los individuos. Nathaniel, 2009. p. 24.
Proyecto experimental que muestra la variación de módulos en la vivienda.

Por el momento, en el foro de Grasshopper podemos encontrar los siguientes ejemplos en los que se ha hecho uso de Galápagos para optimizar un valor arquitectónico: la descripción y análisis de como valorar la calidad de una visual⁷²⁷, de la cual se puede observar su funcionamiento a nivel de bloque en el video de Arie-Willem en la web de GH⁷²⁸; distribución de espacios⁷²⁹, organización de la estructura⁷³⁰, conectividad a nivel urbano⁷³¹...

Respecto a la cuantificación de la arquitectura, el propio David Rutten⁷³² menciona la falta de método científico durante su educación como arquitecto. La frustración de saber si un diseño es mejor o peor, de cómo la mayor parte del diseño está basada en emociones o filosofía. Indudablemente la trascendencia de algunas cosas -intangibles, metafísicas- nunca podrá ser transformada en números y estadísticas pero, ¿puede el parametrismo y los ES ayudar a aproximar la arquitectura hacia su carácter más técnico y objetivo? todo parece indicar que sí. **



⁷²⁶ Jones, Nathaniel. *Architecture as a complex adaptive System*. Cornell University, 2009. Tesis. p.24. http://nljones.scripts.mit.edu/Architecture_as_a_Complex_Adaptive_System.pdf

⁷²⁷ Kory. "Easy Galapagos." Galapagos. Consultada 29 de abril, 2013. <http://www.Grasshopper3d.com/forum/topics/easy-galapagos>

⁷²⁸ De Jongh, Arie-Willem. "View optimization using Galapagos for Grasshopper." *Grasshopper*. Consultada 29 de enero, 2016. <http://www.Grasshopper3d.com/video/view-optimization-using-galapagos-for-Grasshopper>

⁷²⁹ Wouters, Niels. "Thesis - Parametric Design." *Vimeo*. 2011. Consultada 11 de mayo, 2015. <https://vimeo.com/20281163>

⁷³⁰ Voltl, Christopher. "Karamba+Galapagos video tutorial." *Grasshopper*. Consultada 29 de abril, 2015. <http://www.grasshopper3d.com/forum/topics/karamba-galapagos-video-tutorial>

⁷³¹ Kim, Maeva. "Galapagos and DeLaunay edge network optimization." *Grasshopper*. Consultada 29 de julio, 2014. http://www.grasshopper3d.com/forum/topics/galapagos-and-delaunay-edge-network-optimization-1?xg_source=activity

⁷³² Rutten, David. *Computing Architectural Concepts*, Architectural Association. Londres, 2010. Conferencia. Consultada 11 de mayo, 2015. <http://www.aaschool.ac.uk/VIDEO/lecture.php?ID=1212>

Aplicaciones prácticas

Este apartado de la tesis presenta una recopilación de ejercicios prácticos que se han llevado a cabo durante el desarrollo de la tesis de forma paralela. Lejos de profundizar en ellos -ya que no añaden un verdadero valor de innovación- se listan en los sucesivos párrafos para dar fe de la utilidad y la veracidad de los procesos evolutivos en ámbitos profesionales y educativos.

Su aplicación ha servido para resolver problemas de optimización en concursos profesionales (Genetic Architectures Office), proyectos de investigación (Grupo de investigación Arquitecturas Genéticas) y docencia (ESARQ-UIC).

Passive Biodigital Housing, Innsbruck, 2014

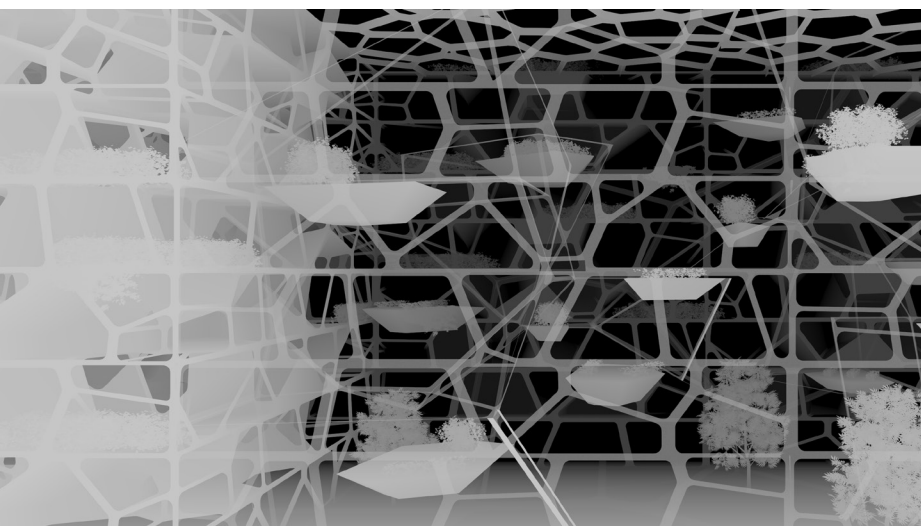
Este proyecto basado en células tridimensionales Voronoi estaba definido por un edificio en forma de C alrededor de un patio. Dicho patio, para permitir el paso de la luz constaba de una cantidad significativamente menor de células que el resto del edificio. Dado que la distribución de los puntos que conforman las células es aleatoria en todo el proyecto, podían aparecer un repartimiento desigualado que daba lugar a células muy grandes o muy pequeñas, dando como resultado barras inviables por su longitud o espacios inútiles por su inaccesibilidad.

059. /// Estévez-Navarro, Genetic Architectures Office, *Passive Biodigital Housing*, 2014. Render de Diego Navarro. Canal de profundidad.

Para controlar el factor de aleatoriedad se introdujo el componente de Galápagos asociado a la posición aleatoria de los puntos y se condicionó su adaptabilidad a unos máximos y mínimos de longitud en base a las aristas que conformaban las células, asegurando así un resultado satisfactorio.

Al mismo tiempo, este proyecto sirvió para mejorar la comprensión del modelado de estructuras voronoi con carácter constructivo (perfiles metálicos) y la aplicación de voronoi jerárquicos condicionados por los planos horizontales que debían definir los forjados del proyecto.

La aplicación de patrones voronoi probó ser verdaderamente versátil para adecuar el contexto a través de una estructura de caminos que se adecuaba a cualquier circunstancia mediante la división de celdas.



Scale System Pavilion, Barcelona, 2015

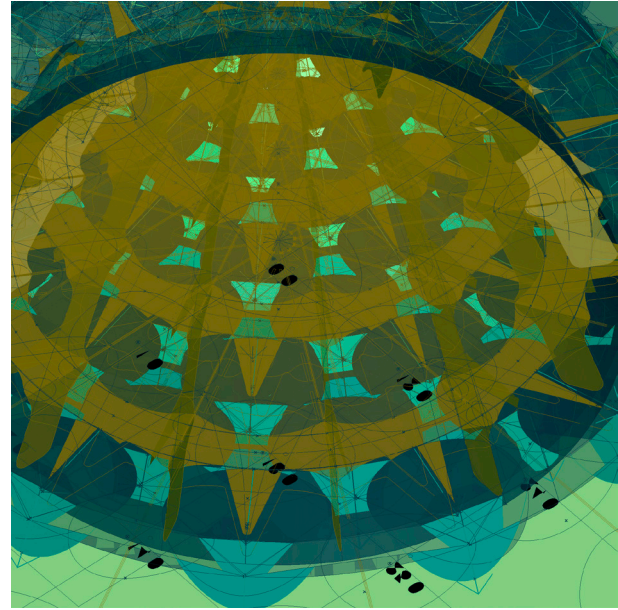
Este pabellón experimental basado en la distribución geométrica de las escamas fue modelado por completo en GH. Parametrizar todos sus elementos (incluido detalles de construcción como maclas o puntos de unión) permitió que cualquier cambio en el diseño repercutiese en los archivos finales de fabricación digital por CNC.

060. /// Alberto T. Estévez (investigador principal) Genetic Architecture Resarch Group, *Pabellón 'Scale System'*, 2015. Render de Diego Navarro. Dibujo superpuesto de la geometría auxiliar del pabellón.

En el desarrollo de este pabellón se usaron algoritmos evolutivos en 2 situaciones:

- Para ajustar el desfase no paralelo de la superficie interior que definía el grueso de las costillas. Considerando los siguientes genes: escala 2D (XY), y escala 1D (Z), movimiento en el eje Z. Los valores de optimización se basaban en: minimizar la intersección de las superficies a 0, igualar la altura de las aristas inferiores, ser lo suficientes gruesas para generar intersecciones con las costillas horizontales.
- Para ordenar dos listas de valores. Como resultado de dos procesos geométricos distintos, la lista de valores de las escamas y las “espinas” que debían sostenerlas no estaban ordenadas de la misma manera, y por lo tanto sus listas no eran combinables. Una ‘gene pool’ que alteraba el orden de los elementos dentro de la lista permitía al algoritmo evolutivo buscar una solución sin errores o intersecciones no deseadas.

Ambas situaciones se generaron a partir de una situación de incertidumbre: un exceso de incógnitas cuyo resultado ideal variaba constantemente en función de las modificaciones y ajustes que se realizaban sobre el pabellón (tamaño, número de escamas, proporciones...). Por esta razón no podía “programarse” una solución única que permitiese el correcto funcionamiento de la definición.



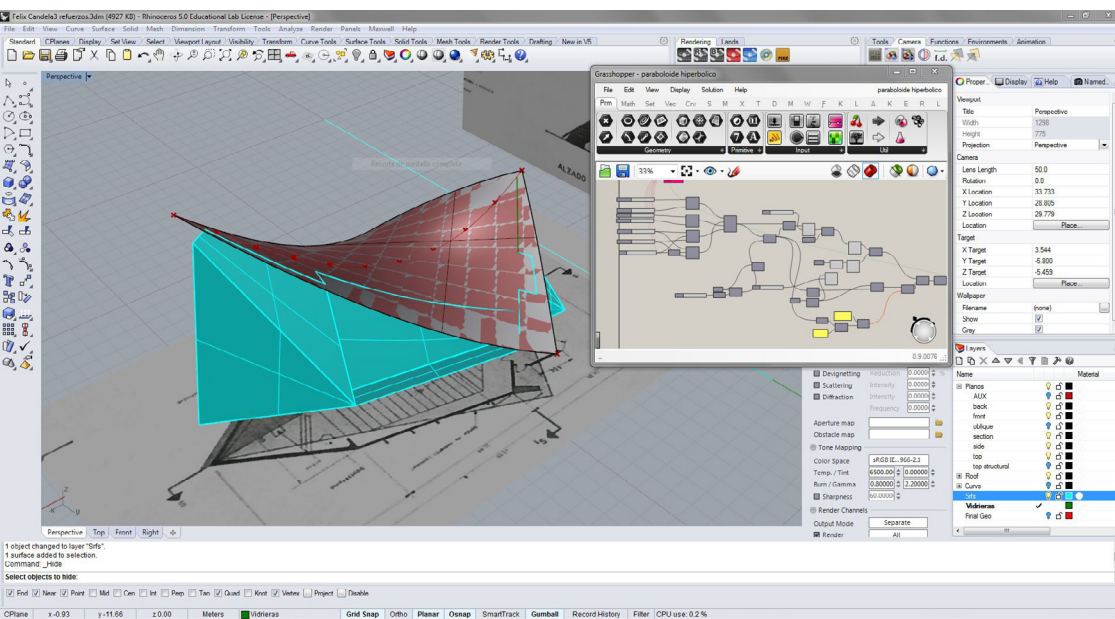
Iglesia Nuestra Señora del Valle, Madrid, 2016

Es costumbre abordar 3 proyectos arquitectónicos de creciente dificultad geométrica -normalmente asociada a la curvatura de las superficies- en la asignatura de Informática, impartida por el doctorando desde 2010⁷³³. El segundo proyecto implica, normalmente, el modelado y estudio de superficies regladas. Hasta el momento: ‘Les escoles’ de la Sagrada Familia de Antoni Gaudí, el pabellón Philips de Le Corbusier, La iglesia del Cristo Obrero de Eladio Dieste, y la iglesia del pico de Felix Candela.

⁷³³ <https://informaticaesarq.wordpress.com/>

Este último proyecto, también conocido por la Iglesia de Nuestra Señora del Valle, en Becerril de la Sierra (al norte de Madrid) y construido en 1968, es el resultado entre la colaboración de Felix Candela y el portugués Fray Coello. La cubierta, una única cascara de superficie mínima y reglada, es el resultado del corte de un paraboloides hiperbólico con la planta del proyecto, un trapecoide deltoide⁷³⁴. Esta superficie tiene las mismas características de muchas de las geometrías desempeñadas en esta tesis (sobre todo en relación al 'form-finding material' y los elementos finitos) la superficie mínima asegura tensiones reducidas en toda la lámina gracias a que las generatrices que la componen son tangenciales a los esfuerzos y dirigen las cargas hacia los cimientos.

061. /// Aproximación a la cubierta de la Iglesia del Pico mediante Galapagos. Captura de pantalla de Diego Navarro.



Ninguna de la documentación consultada explicita la descripción del paraboloides hiperbólico original, sin embargo, debido a la naturaleza curva de los bordes de la cubierta, se deduce que las puntas del mismo no coinciden con las de la cubierta, sino que esta última es sólo una parte de un paraboloides hiperbólico de mayor tamaño. Gracias a la documentación, se tiene la certeza de la ubicación de las cuatro puntas de la cubierta y el perfil de la curva que supondría la limatesa. El siguiente paso es generar un paraboloides hiperbólico (también conocidos como hypars) a partir de cuatro puntos cuyas coordenadas serán una incógnita y que harán el papel de genes. Se puede restringir algunas de esas coordenadas si se tiene en cuenta que las puntas están alineadas dos a dos y que por tanto comparten los siguientes valores:

- En las puntas transversales el valor Z y el X (siendo en una de las dos puntas negativo).

⁷³⁴ Candela, Félix, Cueto Ruiz Funes, Juan Ignacio Del, y Angustias Freijo. *Félix Candela, 1910-2010*. Madrid: Sociedad Estatal De Conmemoraciones Culturales, 2010.

- En las puntas longitudinales el valor Y (el Z podría ser el mismo también pero no había ningún factor que lo asegurase).

El 'fitness' o criterio a seguir por el algoritmo será la distancia entre los elementos conocidos y el resultado del algoritmo. Para calcular esa distancia o margen de error se tienen en cuenta, además de las cuatro puntas, otros diez puntos que pertenecen a la curva de la limatesa. También se simuló un fitness negativo para evitar la correcta intersección del hyper con el trapecio: si la intersección de ambos no resultaba una única curva se añadía una distancia de 1000 unidades al resultado final.

La búsqueda se hace en tres fases:

1. Con genes ('sliders') con números naturales (sin decimales) y un rango muy amplio, de hasta tres veces el tamaño del proyecto.
2. Con números racionales de un decimal y acotando el rango a +/- 10 unidades del valor obtenido en la primera fase.
3. Con números racionales de dos decimales y el mismo rango que en la fase 2.

En la primera fase, el algoritmo se detuvo por estancamiento (50 recursiones sin hallar nuevos resultados) y obtuvo el valor mínimo de 1.3 a los diez minutos.

En la segunda fase:

- En la generación 19 el valor mínimo era 4.9
- En la generación 35 el valor mínimo es 1.18, superando por primera vez el mejor valor de la fase 1.
- Se detuvo el algoritmo de manera manual en 500 generaciones, con valor mínimo de 0.51, obtenido en la generación 327.

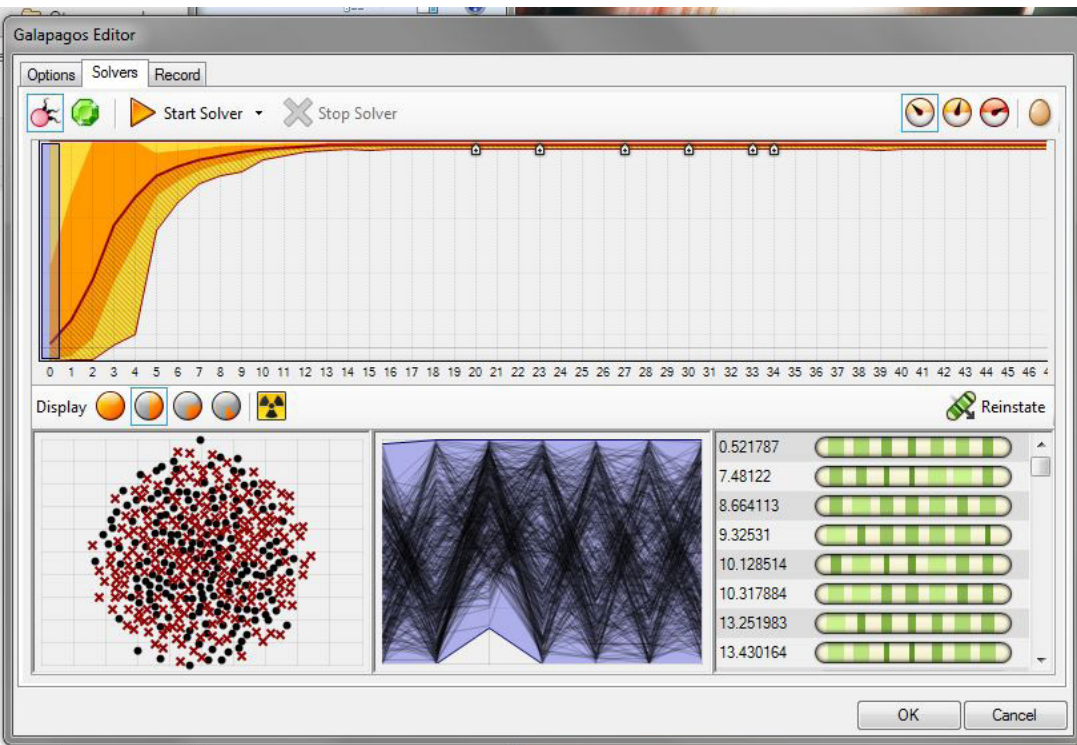
Se aprecia una tendencia de estancamiento hacia 0.5, pues ya en la generación 235 se había obtenido 0.58.

En la tercera fase:

- En la generación 134 se obtuvo el valor mínimo, 0.48.
- Se detuvo el algoritmo en la generación 234 después de 100 generaciones sin obtener mejores resultados.
- La primera generación ya arrojó un valor de 0.52, muy próximo al mejor de la fase 2 (valor que fue superado en la generación 20).

El resultado obtenido supondría un error de +/- 5cm respecto al proyecto. Un valor totalmente despreciable si tenemos en cuenta que la tolerancia debido a las imperfecciones de los planos y el modelado 3D superan este valor considerablemente. Que el aumento de decimales en la fase 3 supusiese una mejora poco sustancial descarta el problema de precisión. Se consideran dos posibles motivos para la ausencia de un resultado perfecto: el primero consistiría en un hyper mayor, fuera de los rangos considerados. El segundo, que la limatesa del plano alzado sólo fuese aproximado y por lo tanto imposible de trazar con un hyper exacto. Este último parece el más probable.

062. /// Gráfica de galápagos en el proyecto de cubierta para la Iglesia del pigo: Fase 3. Captura de pantalla de Diego Navarro.



063. /// Fragmento del código de Galápagos.

```

Generation 1
{
  Bio-Diversity: 0.996
  Genome[0], Fitness=5.31, Genes [10% · 12% · 30% · 28% · 32% · 82% · 17%]
  Genome[1], Fitness=16.68, Genes [27% · 6% · 69% · 61% · 12% · 68% · 33%]
  {
    Record: Multiple fitness values were supplied, fitness is defined as the average.
  }
  Genome[2], Fitness=39.26, Genes [10% · 53% · 64% · 68% · 19% · 63% · 32%]
  Genome[3], Fitness=40.79, Genes [63% · 1% · 4% · 15% · 0% · 85% · 3%]
  {
    Record: Multiple fitness values were supplied, fitness is defined as the average.
  }
  Genome[4], Fitness=42.42, Genes [11% · 80% · 73% · 81% · 24% · 33% · 88%]
  {
    Record: Multiple fitness values were supplied, fitness is defined as the average.
  }
  Genome[5], Fitness=42.69, Genes [9% · 32% · 19% · 22% · 61% · 59% · 80%]
  {
    Record: Multiple fitness values were supplied, fitness is defined as the average.
  }
  Genome[6], Fitness=45.21, Genes [53% · 41% · 4% · 62% · 15% · 32% · 8%]
  {
    Record: Multiple fitness values were supplied, fitness is defined as the average.
  }
  Genome[7], Fitness=45.53, Genes [12% · 86% · 59% · 78% · 6% · 13% · 71%]
  {
    Record: Multiple fitness values were supplied, fitness is defined as the average.
  }
  Genome[8], Fitness=47.20, Genes [7% · 34% · 10% · 24% · 79% · 51% · 15%]
  Genome[9], Fitness=48.62, Genes [0% · 93% · 55% · 34% · 9% · 59% · 78%]
  {
    Record: Multiple fitness values were supplied, fitness is defined as the average.
  }
  Genome[10], Fitness=50.54, Genes [61% · 24% · 7% · 85% · 19% · 45% · 15%]
  Genome[11], Fitness=50.57, Genes [60% · 73% · 31% · 97% · 13% · 74% · 4%]
  Genome[12], Fitness=52.28, Genes [9% · 39% · 38% · 54% · 24% · 39% · 100%]

```

Genome[13], Fitness=53.92, Genes [4% · 57% · 63% · 36% · 16% · 66% · 73%]
 Genome[14], Fitness=55.10, Genes [18% · 6% · 51% · 43% · 51% · 97% · 17%]
 {
 Record: Multiple fitness values were supplied, fitness is defined as the average.
 }
 Genome[15], Fitness=59.05, Genes [23% · 41% · 99% · 97% · 16% · 35% · 56%]
 Genome[16], Fitness=64.97, Genes [16% · 65% · 60% · 36% · 17% · 68% · 9%]
 Genome[17], Fitness=65.53, Genes [16% · 71% · 58% · 99% · 18% · 2% · 49%]
 Genome[18], Fitness=67.44, Genes [4% · 100% · 99% · 75% · 7% · 29% · 73%]
 Genome[19], Fitness=68.28, Genes [24% · 36% · 46% · 67% · 24% · 23% · 84%]
 {
 Record: Multiple fitness values were supplied, fitness is defined as the average.
 }
 Genome[20], Fitness=72.63, Genes [10% · 60% · 47% · 85% · 54% · 28% · 66%]
 Genome[21], Fitness=82.11, Genes [4% · 22% · 99% · 87% · 44% · 50% · 46%]
 {
 Record: Multiple fitness values were supplied, fitness is defined as the average.
 }
 Genome[22], Fitness=84.20, Genes [0% · 8% · 86% · 90% · 99% · 93% · 99%]
 Genome[23], Fitness=89.13, Genes [17% · 68% · 56% · 16% · 13% · 82% · 59%]
 Genome[24], Fitness=93.60, Genes [16% · 22% · 42% · 8% · 18% · 81% · 44%]
 Genome[25], Fitness=96.70, Genes [35% · 55% · 42% · 5% · 4% · 95% · 95%]
 Genome[26], Fitness=102.34, Genes [11% · 34% · 61% · 71% · 23% · 27% · 61%]
 Genome[27], Fitness=103.72, Genes [2% · 35% · 23% · 7% · 43% · 66% · 9%]
 Genome[28], Fitness=106.87, Genes [17% · 30% · 94% · 44% · 12% · 58% · 52%]
 Genome[29], Fitness=109.84, Genes [24% · 39% · 63% · 24% · 10% · 62% · 53%]
 Genome[30], Fitness=113.55, Genes [27% · 13% · 37% · 14% · 0% · 62% · 89%]
 Genome[31], Fitness=115.93, Genes [4% · 93% · 91% · 37% · 21% · 50% · 58%]
 {
 Record: Multiple fitness values were supplied, fitness is defined as the average.
 }
 Genome[32], Fitness=117.94, Genes [20% · 22% · 69% · 92% · 10% · 8% · 92%]
 Genome[33], Fitness=127.48, Genes [12% · 40% · 82% · 67% · 46% · 40% · 55%]
 Genome[34], Fitness=135.26, Genes [88% · 8% · 73% · 66% · 4% · 65% · 67%]
 {
 Record: Multiple fitness values were supplied, fitness is defined as the average.
 }
 Genome[35], Fitness=137.05, Genes [0% · 68% · 43% · 0% · 34% · 72% · 90%]
 {
 Record: Multiple fitness values were supplied, fitness is defined as the average.
 }
 Genome[36], Fitness=138.83, Genes [95% · 13% · 41% · 43% · 24% · 66% · 14%]
 Genome[37], Fitness=142.40, Genes [3% · 11% · 88% · 28% · 74% · 68% · 37%]
 Genome[38], Fitness=142.79, Genes [15% · 43% · 55% · 50% · 52% · 42% · 43%]
 Genome[39], Fitness=144.09, Genes [1% · 15% · 43% · 18% · 73% · 69% · 96%]
 Genome[40], Fitness=156.34, Genes [15% · 72% · 50% · 47% · 42% · 22% · 45%]
 {
 Record: Multiple fitness values were supplied, fitness is defined as the average.
 }
 Genome[41], Fitness=158.38, Genes [90% · 17% · 33% · 58% · 45% · 65% · 93%]
 Genome[42], Fitness=161.00, Genes [5% · 8% · 62% · 1% · 96% · 77% · 71%]

3.4. Modelo de desarrollo computacional

La ingeniería morfogénica (origen y evolución de la forma) se ocupa del diseño, o mejor dicho, del meta-diseño de las habilidades autoorganizativas que resultan en figuras y sistemas visualmente organizados. Este diseño sin embargo, no tiene por qué depender de la tradicional intervención humana, donde el ingeniero decide y moldea estos sistemas. Buena parte de ella puede ser automatizada transmitiendo esa responsabilidad a una búsqueda evolutiva, y por ende uno de los puntos de interés de la tesis. Desde ese punto de vista, la ingeniería morfogénica tiene muchos puntos en común con el desarrollo evolutivo (Evo-Devo). Se discierne entre dos modelos de desarrollo (crecimiento):

- Sistemas genéticos: capítulo de emergencia y sistemas complejos ('Morphogenetic Engineering').
- Desarrollo/Embriología: capítulo de Desarrollo-bio ('Embryomorphic Engineering').

Estos dos sistemas no son exclusivos sino que forman y dependen de sí mismos recíprocamente. No obstante, desde la mirada actual y si se desea realizar la separación, los sistemas genéticos están definidos por reglas muy concretas y se espera un estilo de resultado, están preparados para el desarrollo computacional. Mientras que la embriología mantiene un carácter más biológico, indeterminado aun, sobre la subdivisión, posicionamiento, identificación y agrupación de células. Siendo fiel a los objetivos de la tesis, se profundizará en el último por su abstracción y carácter natural. Se mencionarán algunos sistemas genéticos por su utilidad o porque se han aplicado durante la experimentación de los primeros.

La embriología estudia el desarrollo de los embriones. El embrión es el primer estado de una criatura y forma parte del campo del desarrollo biológico. La embriología computacional se encarga de simular y componer analogías que mimeticen los complejos procesos biológicos que permiten a una simple célula convertirse en un organismo como el ser humano. Una pequeña semilla puede ser expandida a través del proceso computacional en un objeto potencialmente útil⁷³⁵. La embriología computacional se diferencia de los apartados previamente vistos porque enfoca su búsqueda en "subsets" funcionales y/o correctos⁷³⁶. Es decir, en lugar de alternar entre todas las soluciones posibles para encontrar las mejores, parte de una determinada cantidad de reglas (a raíz del algoritmo generador) para producir un abanico de resultados correctos per se. Por lo tanto, requiere de un planteamiento inicial mucho más focalizado. La embriología computacional es entonces útil cuando es posible construir una expresión algorítmica que embeba requisitos

⁷³⁵ Consúltese: Davison, E., *Genomic Regulatory Systems: Development and Evolution*. Nueva York: Academic Press, 2003.

⁷³⁶ Ashlock, Daniel. "Evolutionary Design in Embryogeny." Hingston, Philip F. *Design by Evolution Advances in Evolutionary Design*. Berlín: Springer, 2008. p. 103.

conocidos y principios de diseño. Se caracteriza por los siguientes 3 puntos⁷³⁷:

- Chemical gradient diffusion (providing positional information to the agents)
- Gene regulatory networks (triggering their differentiation into types, thus patterning)
- Cell division or aggregation (creating structural constraints, thus reshaping)

En referencia a los 3 puntos que la caracterizan encontramos que el primero puede asociarse a los patrones de Alan Turing (información y comunicación)⁷³⁸, el segundo a los genes Homeobox (identidad y expresión), y el tercero a la Embriología (forma y organización). 3 aspectos biológicos que son trasladados a la vertiente digital.

3.4.1. Estrategias de Estructuras Formales

Si bien los objetivos de la tesis se fundamentan en los mecanismos -que no las técnicas/estrategias- para desarrollar forma, en este capítulo se hará diversas menciones a dichas técnicas para mejor comprensión de experimentos posteriores. A continuación se describen aquellas estrategias básicas, especialmente por su parentesco con los procesos digitales, pues es en este punto donde las abstracciones biológicas y lo computacional encuentran más similitudes^{739 740}.

Es frecuente considerar a los fractales⁷⁴¹ como una de estas estrategias formales, más se destaca que la fractalidad es una característica, un adjetivo, y por tanto cualquiera de estas estrategias puede desembocar en un resultado fractal. En esta tesis por tanto, lo fractal no es considerado una estrategia formal. Se obviará también en este capítulo la mención a los autómatas celulares o procesos similares por haber sido previamente mencionados en capítulos anteriores (Stephen Wolfram y protocells; cap. 3.1.2).

En la publicación ‘Adaptive Ecologies’⁷⁴² se proponen tres grandes grupos

⁷³⁷ Doursat René, Hiroki Sayama, y Olivier Michel. *Morphogenetic Engineering: toward Programmable Complex Systems*. Heidelberg: Springer, 2012. p.275

⁷³⁸ Fialho, Frederico. “Biology, Real Time and Multimodal design”, AA.VV. *Real Time, Extending the reach of computation*, 33rd eCAADe Conference, 2015, volume 2, p.551.

⁷³⁹ Hensel, Michael, Achim Menges, y Michael Weinstock. *Emergent Technologies and Design*. Oxon,: Routledge, 2010.

⁷⁴⁰ Shiffman, Daniel, and Shannon Fry. *The Nature of Code*. United States: D. Shiffman, 2012.

⁷⁴¹ En 1868 nace Felix Hausdorff, acreditado por la definición de “dimensión fractal”, a pesar de que una de las primeras apariciones de un fractal se considera una pintura del siglo XIX, extraída de una serie de 36 vistas del monte Fuji.

⁷⁴² Spyropoulos, Theodore, Brett D. Steele, John H. Holland, Ryan Dillon, Mollie Claypool, John Frazer, Patrik Schumacher, Makoto Sei Watanabe, David Ruy, y Mark Burry. *Adaptive Ecologies: Correlated Systems of Living*. Londres: Architectural Association, 2013.

que dan cabida al desarrollo y organización de las formas: Morfogenético, Autoorganizativo y de Comportamiento. A pesar de que esta referencia ya había aparecido en el apartado “La repercusión estilística de lo paramétrico en la arquitectura” de esta tesis (cap 2.3.3), merece la pena aproximarse de nuevo con una mirada diferente.

064. /// Células vs Ramificaciones. Theodore Spyropoulos, 2013. p. 63.

De estas estrategias se pueden apreciar dos sistemas formales más generales: el de ramificaciones (lineal) y el de agregación de células (celdas). Por los objetivos de esta tesis y su asociación a la ciencia Evo-Devo la investigación se centrará en el segundo y su abstracción a través de las caras y subdivisión de mallas. Solo se realizará una breve descripción de los sistemas de ramificaciones (‘branching systems’) por su conexión a los sistemas biológicos.

Sistemas de ramificación (L-Systems)

Para nuestro mejor entendimiento y para mejor integración con la computación, se busca sintetizar y abstraer las formas naturales en sistemas medibles y geoméricamente más comprensibles. De dicha abstracción suelen resultar sistemas de puntos interrelacionados, entre otros⁷⁴³:

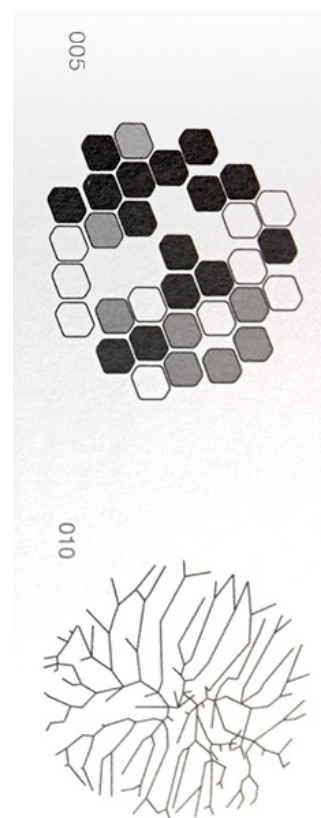
- Direct path System (1^{er} esquema: todos los puntos se unen entre ellos sin considerar intersecciones).
- Minimal Path System (2^o esquema: se busca el mínimo gasto en caminos gracias a la unión de los individuos, pero aumentando el tiempo entre algunos de los individuos)
- Minimal Detours System (3^{er} esquema: se aproxima una solución intermedia, con alto grado de conectividad aprovechando las intersecciones)

Las estructuras ramificadas son sistemas geoméricos basados en la bifurcación que no toman en células cerradas -caso que si se da en sistemas de venación⁷⁴⁴ y que a menudo son confundidos-. Estos sistemas se pueden aplicar a multitud de aspectos tales como estructura⁷⁴⁵ -ya sea a tensión o compresión-, relacionales, de flujo, materiales... cada uno ellos presenta diferentes calidades en los aspectos mencionados (el sistema directo por ejemplo supone gran relación entre los puntos y estructuralmente rígido pero requiere mayores distancias y material). Qué aspectos han de priorizarse es decisión del arquitecto. Una de sus aplicaciones más exitosas y difundidas

⁷⁴³ Kellegias, Alexandros, y Erdine, Elif, “Design by Nature: Concrete Infiltrations”, AA.VV. *Real Time, Extending the reach of computation*, 33rd eCAADe Conference, 2015, volume 2, p. 515.

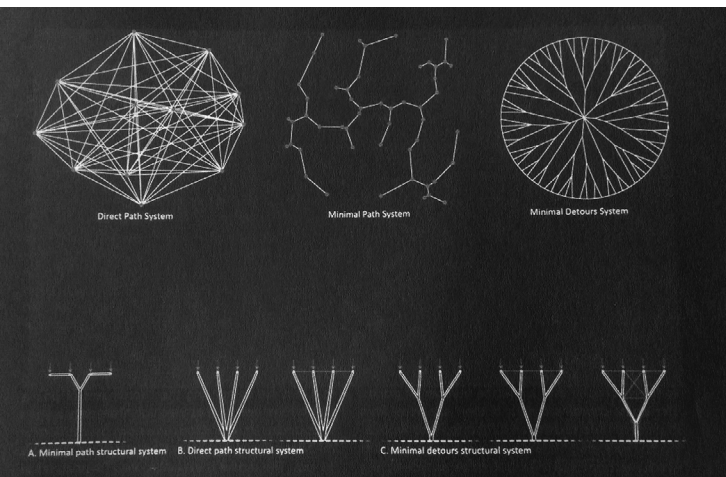
⁷⁴⁴ Klemmt, Christoph, y Bollinger Klaus, “Cell-Based Venation Systems”, AA.VV. *Real Time, Extending the reach of computation*, 33rd eCAADe Conference, 2015, volume 2, pp.573-580.

⁷⁴⁵ Buelow, Peter, *A geometric comparison of branching structures in tension and compression versus minimal paths*, University of Michigan. Consultada 11 de mayo, 2015. http://www-personal.umich.edu/~pvbuelow/publication/pdf/pvb_IASS07.pdf



son sin duda los primeros experimentos de Frei Otto⁷⁴⁶ ⁷⁴⁷ a principios de 1960, (con el permiso de los sistemas de catenarias de Antoni Gaudí). Por su comportamiento en conjunto, y por tanto la dificultad de crear un modelo optimizado a priori, a menudo se abordan estas tipologías mediante metodologías de ‘form finding’ a través de algoritmos genéticos.

065. /// ‘Path systems’. Alexandros, 2015. p. 515. Tres tipologías ramificadas diferentes para interrelacionar puntos.



El sistema computacional más común relacionado con los paths/branching systems son los L-Systems -también conocidos como “string rewriting grammars”-, originalmente visualizados a través de ‘Turtle Graphics’. Los L-Systems han dado lugar a multitud de tipologías fractales y son reconocidos por su facilidad para describir y modelar objetos naturales, particularmente estructuras ramificadas, y modelos botánicos o celulares. Con todo, el uso de su gramática dificulta su exploración, e incluso a aquellas personas expertas en su programación pueden tener problemas más allá de sus áreas de comprensión.

Fractales como la curva de Hilbert, Moore, o Peano -que pueden desarrollares mediante L-Systems- han resultado ser de especial interés en la organización y ocupación del espacio y presentan similitudes con la manera de empaquetar el material genético en los núcleos de las células.

066. /// Ejemplo de la gramática de L-Systems. Captura de Diego Navarro.

Alphabet: $V = \{F, +, -\}$
 Axiom: $w = F--F--F$
 Rule: $P = \{F ::= F+F--F+F\}$

1st Step $F--F--F$
 2nd Step $F+F--F+F--F+F--F+F--F+F--F+F$
 3rd Step $F+F--F+F+F+F--F+F-- F+F--F+F+F+F--F+F-- F+F--F+F+F+F--F+F-- F+F--F+F+F+F--F+F-- F+F--F+F+F+F--F+F$

Los L-Systems se utilizan en la actualidad para el modelado de plantas⁷⁴⁸, redes neuronales⁷⁴⁹, o el diseño de ciudades⁷⁵⁰. Merecen especial interés personas como el matemático Przemyslaw Prusinkiewicz y todo su trabajo desarrollado en el modelado y comprensión

⁷⁴⁶ Otto, Frei, Bodo Rasch, y Sabine Schanz. *Frei Otto, Bodo Rasch: Finding Form: towards an Architecture of the Minimal*. Fellbach: Axel Menges, 2006.

⁷⁴⁷ Otto, Frei, y Winfried, Nerdinger. *Frei Otto: Complete Works: Lightweight Construction, Natural Design*. Basel: Birkhäuser, 2005.

⁷⁴⁸ Prusinkiewicz, P., Lindermyer, A., *The algorithmic beauty of plants*, Springer-Verlag, Nueva York, 1990.

⁷⁴⁹ Kitano, H., “Designing neural networks using genetic algorithms with graph generation system”, *Complex Systems* 4, pp. 461-476, 1990.

⁷⁵⁰ Parish, Y., Muller, P. “Procedural modeling of cities.” *Proceedings of the 28th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*. Nueva York: ACM, 2001. pp. 301-308,

de la botánica^{751 752 753 754}. En arquitectura, uno de los mayores exponentes en el uso de L-Systems son los proyectos de Michael Hansmeyer⁷⁵⁵, inspirados por su relación con Karl S. Chu.

Los branching systems (L-systems) más comunes son capaces de grandes maravillas geométricas, pero implican también un contrapunto habitual en los procedimientos de crecimiento⁷⁵⁶: siguen leyes intrínsecas y no reaccionan o son conscientes de su entorno. Esto lleva a tres posibles resultados: el crecimiento es tan abierto que no se produce intersección, se conoce perfectamente el proceso de desarrollo y se sabe que encaja perfectamente o, se produce un solapamiento de las ramificaciones porque los ángulos de crecimiento son muy agudos. El cálculo de colisiones implica una carga computacional muy notable y es objeto de diferentes estudios para su optimización e implantación en los sistemas de genéticos de desarrollo. La colisión puede falsearse mediante vectores y partículas invisibles⁷⁵⁷, dando la sensación de que el objeto crece “consciente” de sus otras partes esquivándose a sí mismo. Es el caso del proyecto Floraform⁷⁵⁸, donde las tensiones físicas de los bordes y la colisión de los mismos genera las simulaciones florales. Se recogen también algunos de los post en relación a esta temática (‘differential growth’) en la web de GH:

- http://www.Grasshopper3d.com/video/growing-curve?xg_source=activity
- http://www.Grasshopper3d.com/forum/topics/differential-growth-in-curves?xg_source=activity
- <http://www.Grasshopper3d.com/video/differential-growth>
- <http://www.Grasshopper3d.com/video/differential-growth-1>
- <http://www.Grasshopper3d.com/video/growth>

A pesar de que este puede ser el génesis de algunas formas en la naturaleza (guiadas por las tensiones físicas) se considera que el origen geométrico, las leyes de crecimiento internas, que más pueden aportar a la arquitectura son de carácter genético -estructurador y jerárquico en contraposición a la aglutinación de las células-.

Se advierte, que estos últimos ejemplos combinan las estructuras ramificadas de los L-Systems con la adición de células y subdivisión de las mismas, tema

⁷⁵¹ Prusinkiewicz, Przemyslaw, y James Hanan. *Lindenmayer Systems, Fractals, and Plants*. Berlin: Springer-Verlag, 1989.

⁷⁵² Prusinkiewicz, Przemyslaw, y Aristid Lindenmayer. *The Algorithmic Beauty of Plants*. Nueva York: pringer-Verlag, 1990.

⁷⁵³ Algorithmic Botanic at the university of Calgary. <http://algorithmicbotany.org/papers/#abop>

⁷⁵⁴ Algorithmic Beauty of Plants. <http://algorithmicbotany.org/papers/abop/abop.pdf>

⁷⁵⁵ Michael Hansmeyer. “Projects.” Consultada 11 de mayo, 2015. <http://www.michael-hansmeyer.com/projects/project3w.html>.

⁷⁵⁶ Algunos sí pueden incorporar cambios en base a sus vecinos. Se denominan “sensitivos al contexto”.

⁷⁵⁷ Nervous. “Floram System.” *Vimeo*. Consultada 30 de octubre, 2015. <http://n-e-r-v-o-u-s.com/projects/albums/floraform-system/>

⁷⁵⁸ Nervous Systems, Floraform, <https://vimeo.com/130977932>

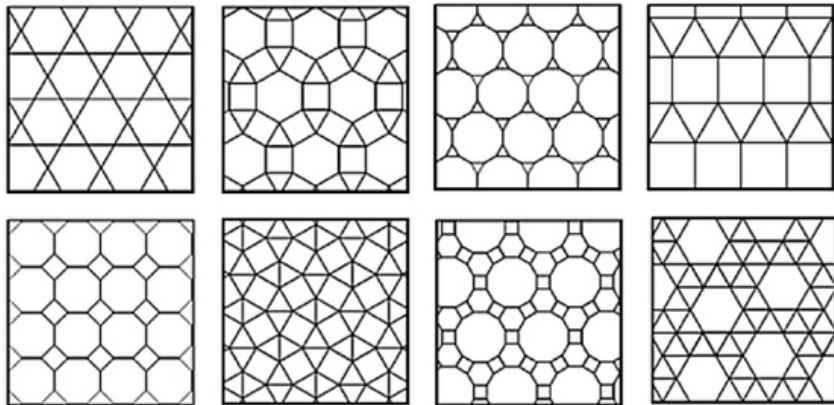
que se abordará en el próximo apartado.

Células: teselación y subdivisión

Desde objetos naturales hasta artefactos humanos, el ‘tiling’ (el despiece), está en todas partes: es el acto de racionalizar formas altamente complejas mediante su ruptura en partes más pequeñas y continuas. La palabra “tesela”, emparentada con el mosaico, supone la repetición de patrones sin solapes o agujeros. Originalmente es el acto de organizar pequeños cuadrados en una matriz regular (como píxeles!), del griego ‘tesseres’, que significa cuatro. Más tarde, culturas tan dispares como arábigos, indios, irlandeses, y chinos han desarrollado este concepto en diferentes niveles de complejidad⁷⁵⁹.

Si se comienza desde los patrones más simples en un intento por clasificarlos, se advertirá que únicamente existen tres patrones regulares (de lados y ángulos iguales): triángulos (equiláteros), cuadrados y hexágonos. Solo estas figuras regulares por si mismas son capaces de cubrir y llenar el espacio bidimensional. Si añadimos más de una figura regular, consideramos el patrón semi-regular (también conocidas como “de Arquímedes” o uniformes, pudiendo encontrar 8 patrones diferentes. El resto, son “aquirales”, y su número es infinito, exponencial, únicamente restringido por las reglas matemáticas.

067. /// Patrones semi-regulares. Coolman, 2015.



A saber, cualquier pieza geométrica convexa de 3 o 4 lados puede ser ordenada para formar un patrón monohedro (de una sola pieza), mientras que solo 14 tipos de pentágonos irregulares y 3 de hexágonos irregulares son capaces de tal característica⁷⁶⁰. Y la lista de características y posibles combinaciones sigue y sigue, en un maravilloso universo que adquiere progresiva complejidad y sorprende en la emergencia de las formas y

su organización⁷⁶¹. Uno de los puntos de inflexión en esta disciplina es la investigación de George Pólya⁷⁶², que inspira los famosos juegos geométricos

⁷⁵⁹ Coolman, Robert. “Tessellation: the geometry of tiles, honeycombs and M. C. Scher.” *Live Science*. Marzo, 2015.

⁷⁶⁰ Pueden observarse en esta demostración del Proyecto Wolfram: <http://demonstrations.wolfram.com/PentagonTilings/>

⁷⁶¹ Grünbaum, Branko, y G. C. Shephard. *Tilings and Patterns*. Nueva York: W.H. Freeman, 1987.

⁷⁶² Taylor, Harold, y Loretta M. Taylor. *George Pólya: Master of Discovery 1887-1985*. Palo Alto, CA: Dale Seymour Publications, 1993.

de Escher, siempre basados en las estructuras básicas regulares.

*Crystallographers have ... ascertained which and how many ways there are of dividing a plane in a regular manner. In doing so, they have opened the gate leading to an extensive domain, but they have not entered this domain themselves. By their very nature, they are more interested in the way the gate is opened than in the garden that lies behind it*⁷⁶³. *ESCHER*

Por último, en lo que se refiere a los patrones a-periódicos, hacen uso de la repetición de la forma, pero no del patrón. Se construyen en tiempo real y la situación de las piezas depende de sus predecesoras. Se han mencionado en numerosos casos a lo largo de la tesis por su relación con la emergencia, los estudios de Wolfram, o la interpretación de patrones, dejando fuera de toda duda que la importancia de estos patrones va más allá del alarde geométrico. Estos patrones basados en simetrías pentagonales han sido básicos en el estudio de campos como la cristalografía que a partir de los años 80 a dado lugar al estudio de 'quasicrystals'. Sorprendentemente, estas organizaciones han demostrado poseer una resistencia inusual a la transmisión térmica y eléctrica debido a esa a-periodicidad. Rodger Penrose es el matemático inglés al cual se le atribuye el descubrimiento del comportamiento cuasi algorítmico de las teselas⁷⁶⁴, aunque se han descubierto ejemplos de los mismos en proyectos árabicos muy anteriores⁷⁶⁵. La cristalografía abarca el estudio y la organización tridimensional de las teselaciones y los patrones que crean los minerales al cristalizar. Su orden impacta directamente en la situación de los electrones, su estabilidad a diferentes reacciones químicas, el balance entre energía superficial y mínimo estrés, termodinámica y entropía⁷⁶⁶.

A la luz de las relaciones presentadas se entiende que el campo de los patrones posee un potencial enorme, pero una aproximación excesivamente geométrica de formas, organización, y tamaños predefinidos ha perjudicado la evolución de este campo que se a veces se tilda de "decorativo". En la actualidad, logra avanzar a través de la optimización y la visualización en el mundo computacional. Los procesos se centran en la representación de superficies y en los métodos para interpolar las partes para lograr una representación suave y continua ('smooth') de la misma, reconstruyendo los puntos en un sistema que contiene el mismo número de vértices⁷⁶⁷. Crear, por así decirlo, patrones que se adaptan y se deforman en el espacio no-euclidiano.

⁷⁶³ Guy, Richard K., y Robert E. Woodrow. *The Lighter Side of Mathematics: Proceedings of the Eugène Strens Memorial Conference on Recreational Mathematics & Its History*. Cambridge: Cambridge University Press, 1996. p. 92.

⁷⁶⁴ Penrose, Roger. "Relativistic Symmetry Groups." *Group Theory in Non-Linear Problems*, 1974. pp. 1-58.

⁷⁶⁵ Gunbad-I Qabud, una torre-tumba en Maragha, 1197.

⁷⁶⁶ Ghyka, Matila C. *The Geometry of Art and Life*. Nueva York: Dover Publications, 1977. pp. 86.

⁷⁶⁷ Turk, Greg. "Re-Tiling Polygonal Surfaces." *Computer Graphics*, Vol. 26, No. 2, (SIGGRAPH 92). July, 1992. pp. 55-64. Consultada 11 de mayo, 2015. http://www.cc.gatech.edu/~turk/my_papers/retile.pdf

En términos biológicos, Wolpert⁷⁶⁸ advierte que las células pueden usar la información sobre su posición para determinar su función. Superponer los procesos requeridos⁷⁶⁹ por la embriología computacional en las estructuras de células plantea una de las mayores dificultades. Los modelos de crecimiento de células suelen usar un sistema iso-espacial de coordenadas⁷⁷⁰, facilitando la difusión de información, pero introduciendo problemas para la subdivisión de las células. Normalmente, se utiliza la sustitución cuando se dan casos de solapes a raíz de dicha subdivisión. Sin embargo la mayoría geometrías biológicas no atienden a estructuras fijas. La computación resolverá este problema mediante el espacio no-euclidiano y el aprovechamiento de las topologías de mallas.

Equivalentemente, las mallas (o ‘meshes’) permiten conservar ordenes topológicos (relación entre los elementos) al mismo tiempo que cambia la forma de las partes que lo componen. Así, una superficie puede expresarse mediante la adición de diferentes patrones, ya sean cuadrados, triángulos, la combinación de varios, regulares o irregulares, dependientes de la curvatura o no. En el capítulo de crítica hacia la arquitectura digital⁷⁷¹ se describe la preocupación por el uso irracional de las estructuras complejas en pos de la vistosidad de las mismas. Michael Parsons⁷⁷² hace especial hincapié en las estructuras Voronoi, las más famosas y extendidas, quizá por su apariencia orgánica y su flexibilidad en su aplicación. Es sin duda uno de los sistemas de teselación más recurrente en la naturaleza (alas de libélulas, subdivisión en hojas, células, manchas de jirafa, grietas en terrenos secos, el caparazón de las tortugas, burbujas...). Y sus aplicaciones (por sus implicaciones geométricas) se extienden a prácticamente todos los campos. Por esta razón, el mal uso de este algoritmo es doblemente grave ya que se está influenciando de manera negativa un recurso de gran utilidad. El funcionamiento y organización de las regiones de Voronoi depende del centro de su masa respecto a una densidad preestablecida⁷⁷³. La teselación se convierte a su vez en un análisis y expresión de las fuerzas presentes en la superficie.

Specifically, the properties of Voronoi regions and the associated Delaunay triangulation are relevant to establishing heterogeneous sizing hierarchies between triangular elements in the depiction of highly complex 3-D form⁷⁷⁴. DE FLORIANI

⁷⁶⁸ Wolpert, L. “Positional Information and the Spatial Pattern of Cellular Differentiation.” *Journal of Theoretical Biology* 25, no. 1. Diciembre, 1969.

⁷⁶⁹ Doursat René, Hiroki Sayama, y Olivier Michel. *Morphogenetic Engineering: toward Programmable Complex Systems*. Heidelberg: Springer, 2012. p.275

⁷⁷⁰ Bentley, P., Kumar, S. “Three ways to grow designs: a comparison of embryogenies for an evolutionary design problem.” *Proceedings of the 1999 Genetic and Evolutionary Computation Conference*, Morgan Kaufmann, 1999. pp. 35-43.

⁷⁷¹ En esta misma tesis: “Pluralismo frente Pseudo-digital.” Cap. 2.3.3.

⁷⁷² Parsons, Michael, “Tolerance and customization: A question of value”, *Australian Design Review*. Consultada 29 de abril 2014. <https://www.australiandesignreview.com/architecture/41321-tolerance-and-customisation-a-question-of-value>

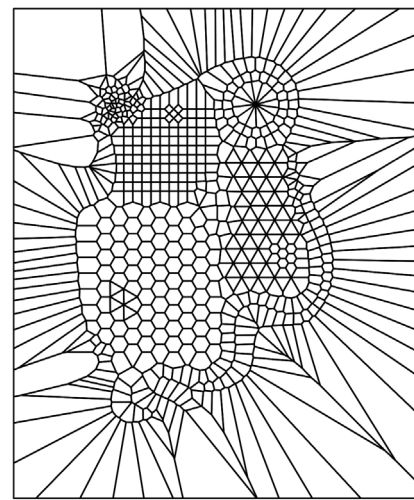
⁷⁷³ Du, Qiang, Vance Faber, y Max Gunzburger. “Centroidal Voronoi Tessellations: Applications y Algorithms.” *SIAM Review* 41, nº 4. Enero, 1999. pp. 637-676.

⁷⁷⁴ Oxman, Neri. *Material-based design computation*. Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology, 2010. p.115.

Acostumbrados a su expresión habitual, heterogénea, de pentágonos y hexágonos irregulares, muchos parecen olvidar la belleza matemática de su aplicación en situaciones ordenadas y estructuradas. Las estructuras Voronoi son, de alguna manera, una regla universal para crear celdas, la expresión del orden y distribución de un orden más simple y sintético (normalmente puntos). Podemos encontrar descripción sobre esas estructuras (particiones regulares) y su impacto a nivel geométrico en la obra de Ghyka⁷⁷⁵.

068. /// Distribución de puntos y diagrama Voronoi. Dibujo de Diego Navarro. Diferentes patrones convergiendo a través de una estructura Voronoi. Se distinguen patrones tanto regulares como irregulares.

En los experimentos materiales de Neri Oxman se usan un algoritmo de recompresión UV (bidimensional) para expresar superficies Voronoi en geometrías tridimensionales. Concretamente, aplica este algoritmo para geometrizar nubes de puntos no-uniformes sobre superficies tridimensionales hechas con Nurbs. La dificultad de ello radica en que la estructura Voronoi es plana cuando es bidimensional y tridimensional (células con volumen) cuando sus centros se hayan en las tres dimensiones del espacio cartesiano. La obtención de células planas sobre una superficie 3d es pues una readaptación de los principios de Voronoi y un ejemplo de geometría no-euclidiana. El uso de elementos finitos es frecuente para adaptar estas teselaciones y lograr mejores distribuciones, ya sea en base a la densidad, la curvatura -piezas más pequeñas donde la curvatura es mayor y más grande donde es casi nula-, el rendimiento -ya sea en carga estructural o disipación de calor-, la flexibilidad, el tamaño -si se pretender restringir mínimos o máximos-, o incluso establecer un número determinado de familias⁷⁷⁶.



También el proyecto de Biodigital Pavilion⁷⁷⁷, en un evidente caso de biomimicry, cuya estructura se basa en seres llamados radiolaria, donde la expresión de la teselación es absolutamente heterogénea a pesar de que se cimienta en reglas geoméricamente puras (la subdivisión y triangulación de un icosaedro en el caso del proyecto).

Tanto Neri Oxman como Alberto T. Estévez plantean nuevas formas de representar la estructura de las superficies por subdivisión. Son evoluciones evidentes de estructuras más abstractas y puristas como son las geodésicas de Buckminster Fuller las cubiertas de Robert Le Ricolais, que tampoco ignoraban los descubrimientos de Ernst Haeckel o D'Arcy Thompson. Sus primeras

⁷⁷⁵ Ghyka, Matila C. *The Geometry of Art and Life*. Nueva York: Dover Publications, 1977. pp. 73-86.

⁷⁷⁶ Oxman, Neri. op. cit. 2010, p.175.

⁷⁷⁷ Genetic Architectures. *Biodigital Pavilion*. UIC, Barcelona, 2008-2009.

obras en relación al uso de barras y división del espacio son de 1940 y 1949 respectivamente, y ambos se les asocia con el entendimiento geométrico de lo natural y universal. Sobre la estructura interna de los huesos, Le Ricolais comenta:

Consistía en una malla tridimensional de gran complejidad formal, cuya geometría se revelaba ante cualquier cálculo, debido al gran número de barras por junta y a su gran variabilidad⁷⁷⁸. LE RICOLAIS

3.4.2. Mallas poligonales como topología

Se describirá en lo sucesivo las características que hacen al sistema de modelado por malla ('meshes') el idóneo para el modelado y representación de los modelos embriológicos. Se aportará una detallada descripción de su funcionamiento, así como ejemplos que lo soporten. Como hilo conductor, se referenciarán add-ons de GH que unifican los conceptos tanto computacionales como embriológicos y que permiten la posibilidad de llevar a cabo los ulteriores experimentos.

Las mallas poligonales o 'polygon meshes' son matrices de puntos interconectadas que definen vértices, aristas y caras. Comprenden uno de los métodos más extendidos en los gráficos por computación y el modelado 3D tal y como se ha descrito en la tesis, en el capítulo sobre CGI y CAD (cap. 2.2.3). Se reitera en estas líneas que a pesar de su inexactitud, encierran una ligereza computacional que permite extraer todo el potencial de su topología⁷⁷⁹, de la interconexión de sus partes. Los sucesivos subapartados de este capítulo indicarán en detalle las cualidades y aplicaciones más relevantes para el modelado en malla y su aplicación a procesos embriológicos.

Flexibilidad en 'Meshes Remeshing'

Siguiendo el concepto de adaptabilidad, es básico que las caras de las mallas puedan readaptarse, ajustando su densidad y tamaño dependiendo de los esfuerzos estructurales, materiales, o cualquier otro valor arquitectónico. Ello crea una relación directa entre los patrones de la malla y el fenotipo

⁷⁷⁸ Le Ricolais. "Robert, 1935-1969, Etudes et Recherches." *Zodiac*, núm. 22, Milán, 1973. p. 18.

⁷⁷⁹ La topología es un concepto matemático que estudia las propiedades y relaciones de las partes de un sistema complejos y que permanecen inmutables a pesar de transformaciones externas.
Ricolais, Robert Le. *Introduction to the Notion of Form*. Philadelphia, PA: University of Pennsylvania, Graduate School of Fine Arts, Department of Architecture.

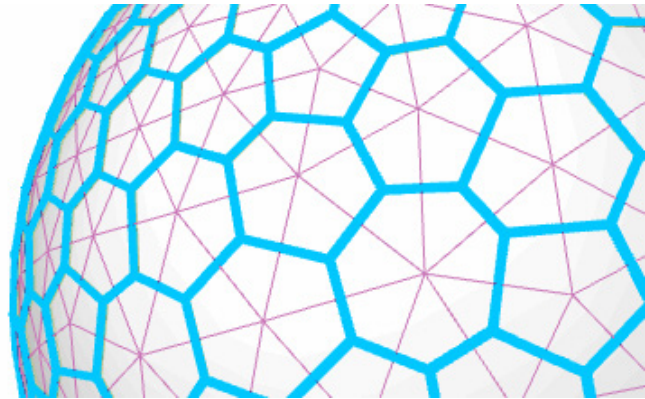
geométrico. Daniel Piker aborda en este artículo de 2012 estos temas⁷⁸⁰: En los ejemplos que se dan, se modifica la malla alterando las interacciones locales, la conectividad de las células y la consecuente topología.

- Relajación ('relaxation') ajusta la tensión de la malla
- Remallado ('remeshing') aumenta o disminuye el número de celdas
- Cambio de tipo malla: varía la forma de las células

Convertir una malla triangular en una hexagonal es relativamente sencillo, pero ello no conlleva la coplanicidad de todas las aristas que lo componen, efecto que si requiere un proceso de aproximación y optimización -a través de elementos finitos, por ejemplo-.

069. /// Relación hexágono-triángulo. Dibujo del artículo web Piker, 2012. El esquema hexagonal puede deducirse a través del triangular.

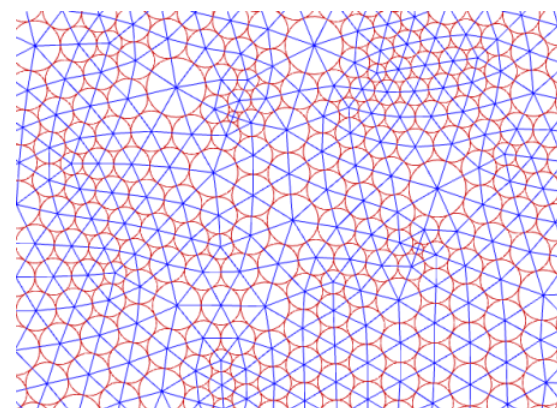
Igualmente, hay connotaciones directas entre el "empaquetamiento de círculos" y mallas triangulares. El empaquetamiento de círculos se basa en la disposición de círculos (de igual o diferente tamaño) de tal manera que todos los círculos vecinos se toquen entre sí, maximizando así la resistencia de toda la estructura y distribuyendo las cargas⁷⁸¹. Debido a esta relación el posicionamiento final de los círculos es equivalente a un diagrama de Delaunay -los puntos son los centros de los círculos- y por ende, existe un patrón de Voronoi asociado al mismo, óptimo estructural y geoméricamente.



070. /// Relación triángulo-círculo. Dibujo del artículo web Piker, 2014. La agrupación de círculos tangenciales se deduce a través de la estructura triangular.

De profundizarse en este aspecto habría que valorar diferentes aspectos de configuración en base a las necesidades del enunciado, pudiendo ser estos:

- Restricción en los tamaños de los círculos.
- Definición de límites.
- Asociación por imágenes.
- Recursividad en el sistema Voronoi.



Se listan a continuación plug-ins y definiciones en relación a esta

⁷⁸⁰ Piker, Daniel. "Mesh Mash!" *Space Symmetry Structures*. Consultada 30 de septiembre, 2012. <https://spacesymmetrystructure.wordpress.com/2012/09/20/meshmash/>

⁷⁸¹ Piker, Daniel. "Circle packing definition." *Grasshopper*. Consultada 30 de agosto, 2014. <http://www.Grasshopper3d.com/group/kangaroo/forum/topics/circle-packing-definition>

estrategia dentro del ecosistema Rhino-GH:

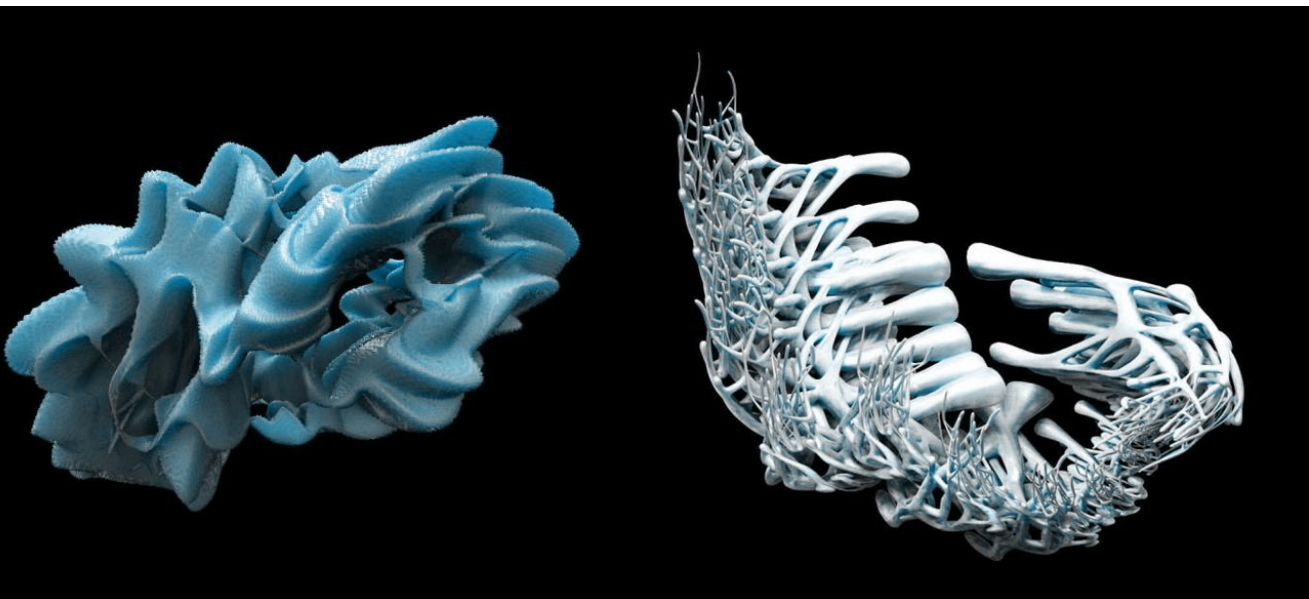
- Entrada en el foro por Daniel Piker, usando GH y Kangaroo. <http://www.grasshopper3d.com/group/kangaroo/forum/topics/circle-packing-definition>
- Script para Rhinoceros. <http://blog.rhino3d.com/2008/05/circle-packing-rhinoscript-new-version.html>
- Script para Rhinoceros 'image-based'. <http://jarek-rhinoscripts.blogspot.com.es/2010/01/image-based-circle-packing.html>
- Plug-in para Rhinoceros basado en VB.NET. <http://wiki.mcneel.com/developer/sdksamples/2dcirclepacking>

También pueden consultarse otros programas en relación a la adaptabilidad de las mallas así como reconstrucción de las mismas en el listado de plug-ins de esta misma tesis (cap. 2.2.5, subapartado de mallas/topológicos).

Subdivisión y Continuidad topológica

Uno de los procesos -si no el que más- idenfificativos de las mallas es la subdivisión de las mismas hasta que deriva finalmente en un aspecto orgánico. La progresiva subdivisión de una geometría facetada puede traducirse en una forma redondeada, continua, si se realizan suficientes subdivisiones. Estas subdivisiones implicarán un aumento de caras exponencial con repercusiones directas sobre el tamaño del archivo. Las imágenes de Michael Pryor no dejan lugar a dudas sobre la capacidad orgánica del modelado por malla.

071. /// Pryor, '*soft brandges*', 2015. Fotos del perfil del autor en Grasshopper3d.com. Geometrías orgánicas modeladas con GH.



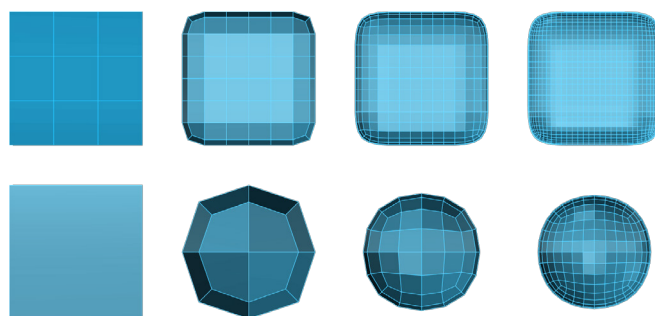
A este tipo de modelado se le acuña poligonal u orgánico. Frente al modelado por NURBS, más constructivo y directo, el modelado poligonal requiere más práctica y habilidad ya que mientras se modela no puede observarse el

objeto final como resultado de las múltiples subdivisiones. A tener en cuenta múltiples factores como la unión entre ejes (las aristas pueden estar unidas, pero no soldadas), la distancia de los mismos, la orientación de las caras, el tipo de subdivisión, o el número de lados.

Por su arquitectura, la subdivisión se aplica a todas y cada una de las caras, manteniendo así la misma jerarquía topológica que tenían sus geometrías primitivas. Esta transformación del conjunto es lo que hace de la subdivisión una herramienta tan potente.

072. /// Subdivisión de mallas. Capura de pantalla de Diego Navarro. El número de subdivisiones en geometrías “iguales” tiene una gran influencia en el suavizado de las mismas.

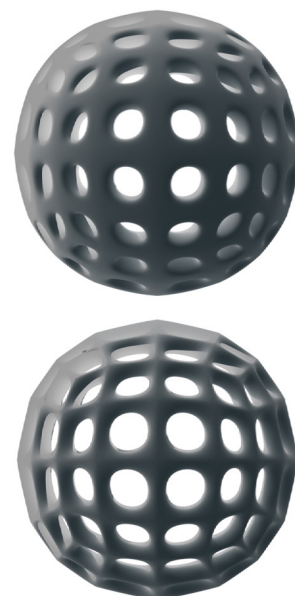
Habitualmente, el diseño y modelado gana complejidad a medida que avanza el proceso de diseño. Es fácil encontrar nubes de puntos, estructuras lineales, o simples superficies al comienzo de los proyectos que luego requieren post-procesos. Por ejemplo, procesos mencionados a lo largo de la tesis: celular automático (puntos o células), L-Systems (líneas), Voronoi (celdas), etc. pueden servir como punto de partida para estructurar el proyecto y más tarde son sometidos a procesos de “meshificación” y subdivisión.



Intuir los resultados finales depende también del proceso de subdivisión, donde algunas de las técnicas para dicha subdivisión en pos de una geometría continua y más orgánica dan resultados poco satisfactorios, enfatizando la superficie original sobre la tensión de los agujeros y provocando así un efecto de “perforación” más que de “esqueleto orgánico”. A modo de pequeño experimento se ha aproximado personalmente el problema desde la modificación y orden de las partes de una malla tratada con el plug-in Weaverbird. Como puede apreciarse en la imagen, el segundo resultado ofrece una notable mejoría y da una sensación más próxima a un sistema estructural (de líneas con grosor) que superficial (una esfera con agujeros).

073. /// Subdivisión estandar vs subdivisión del doctorando. Render de Diego Navarro. La segunda subdivisión muestra un aspecto más orgánico que la primera.

Otros plug-ins como el Exoskeleton pueden desempeñar esta función con mayor eficacia y rapidez, pero el interés del ejercicio se haya en averiguar por qué y demostrar el dominio de las técnicas requeridas. En este caso, se trata de crear una estructura romboidal frente a la usual cuadrada, cuyas caras superior o inferior está compuesta por dos planos. Esta subdivisión inicial es la que provoca la excesiva planitud de la superficie original respecto a los huecos.



En un intento por mantener los niveles de computación en baremos asumibles, los procesos complejos simplifican y abstraen lo máximo posible la geometría del problema. Por complejos en esta situación consideramos cuando varios agentes intervienen entre ellos, alterándose a sí mismos y adecuándose en, por ejemplo, los puntos de unión o límites dependiendo de sus vecinos. Es una mera cuestión de economía computacional: la mayoría de los simuladores trabajan únicamente con curvas y puntos. La meteorología se basa en partículas sometidas a vectores, las plantas son estructuras lineales “revestidas de superficies”, incluso cuando la volumetría es importante (simulación de colisiones y físicas, animaciones...) se simplifica la geometría a prismas interconectados.

Si bien hay que ser consciente de que esta abstracción nos permite realizar cálculos que de otra manera no serían posibles, no hay que olvidar que algunos de los factores dejan de tomar parte y por lo tanto nunca serán un retrato 100% veraz. Esa ausencia es la que se suple a modo de parche posteriormente al proceso original. Se añaden capas que aproximan dicho proceso a la realidad simulada. Por ejemplo, el tamaño y peso de la hoja que seguro interviene en el crecimiento de una rama y su curvatura no se tiene en cuenta. Sería “difícil” calcular el crecimiento de dicha rama en el tiempo a medida que se añaden hojas que a su vez varían constantemente su peso afectando al resto del sistema. En su lugar, se calculan las ramas independientemente y luego se añaden las hojas que, por cierto, suelen ser superficies sin grueso. Se pretende explicar con esto que las simulaciones (o copias de los procesos) naturales están increíblemente lejos de ser totalmente fidedignos, más lejos aun de simular la interacción de elementos químicos⁷⁸² entre las células del ser vivo. Por lo tanto las estrategias que se aplican a posteriori para aproximarse a la realidad son de vital importancia. Como se falsea el proceso y la creatividad para hacerlo de una manera que sea computacionalmente accesible viene siendo la clave de toda representación digital.

En la búsqueda de crear estructuras continuas, uno de los mayores retos es el trato de los nudos de las barras de una estructura. Normalmente estas estructuras se forman originalmente a partir de un tramado de líneas sin ningún tipo de grosor que simplemente se unen en sus puntos finales. Darles grueso implica diferentes intersecciones en su base dependiendo de la orientación y por tanto, requieren de nudos a medida. El sistema propuesto ha de ser suficientemente flexible para adaptarse a una infinidad de situaciones. Las barras han de superponerse lo suficiente para que su unión no deje huecos, pero no tanto como para sobresalir por el lado opuesto del nudo.

El auge de la estructuras Voronoi (la estructura sin lugar a dudas más replicada en el ámbito bio-digital) aumentará la oferta por la necesidad de crear estructuras con volumen a partir de líneas. Otros ejemplos de

⁷⁸² Fialho, Frederico. “Biology, Real Time and Multimodal design”, AA.VV. *Real Time, Extending the reach of computation*, 33rd eCAADe Conference, 2015, volume 2, p.551.

estructuras lineales son crecimiento de venas⁷⁸³, entretejidos⁷⁸⁴, DLA (diffusion-limited aggregation)⁷⁸⁵, L-systems, estructuras de Delaunay, redes de proximidad, etc. Las siguientes entradas en el foro de GH arrojaron las primeras aproximaciones al método, la mayoría de la mano de Daniel Piker y David Stasiuk que abordarán el problema a través de las meshes gracias a los siguientes inputs: el ‘paper’ de Ergun Akleman: *Solidifying Wireframes*⁷⁸⁶, que aproxima la solución del nudo con una geometría limpia; al uso de Plankton⁷⁸⁷, que permite ejecutar los n-gonos necesarios para los nudos en GH; y otros plug-ins como Weaverbird y Kangaroo para la subdivisión y relajación de la malla resultante.

Los resultados se manifestarán principalmente a través de los plug-ins Cytoskeleton y Exoskeleton. De manera simplificada este es el proceso llevado a cabo:

1. take a random cloud of points
2. generate the 3d Voronoi
3. scale the edges of the cells towards their centers, and also towards the centers of the faces.
4. connect these 2 sets of scaled edges with mesh quads and join
5. cull some of the outer faces
6. subdivide and smooth city Weaverbird

Entradas del foro de Grasshopper:

- Creating a 3D Voronoi Skeleton (March 2012) Kcerv <http://www.Grasshopper3d.com/forum/topics/creating-3d-voronoi-skeleton>
- Introducing “Exoskeleton” - A wireframe thickening tool (Dec 2012) Daniel Piker + David Stasiuk <http://www.Grasshopper3d.com/profiles/blogs/introducing-exoskeleton-a-wireframe-thickening-tool#comments>
- Skeletal mesh (March 12) Daniel Piker <http://www.Grasshopper3d.com/forum/topics/skeletal-mesh>
- Voronoi Skeleton (March 2012) Michael Pryor <http://forumarch.blogspot.com.es/2012/03/Grasshopper-voronoi-skeleton.html>
- Cytoskeleton⁷⁸⁸ (Jan 2014) Daniel Piker <http://www.Grasshopper3d.com/group/plankton/forum/topics/cytoskeleton>
- Exoskeleton + Cytoskeleton Components (May 2014) Daniel Piker + David Stasiuk http://www.Grasshopper3d.com/profiles/blogs/exoskeleton-cytoskeleton-components?xg_source=activity

⁷⁸³ Drinnan, Jak. “3D venation growth.” *Grasshopper*. Consultada 29 de diciembre, 2012. http://www.Grasshopper3d.com/photo/3d-venation-growth-1?xg_source=activity

⁷⁸⁴ Kidziak, Wiktor. “Looking for threads/wooly paths definition.” *Grasshopper*. Consultada 28 de septiembre, 2011. <http://www.Grasshopper3d.com/group/kangaroo/forum/topics/looking-for-threads-wooly-paths-definition>

⁷⁸⁵ Piker, Daniel. “Diffusion limited aggregation.” *Grasshopper*. Consultada 29 de marzo, 2010. <http://www.Grasshopper3d.com/profiles/blogs/diffusion-limited-aggregation>

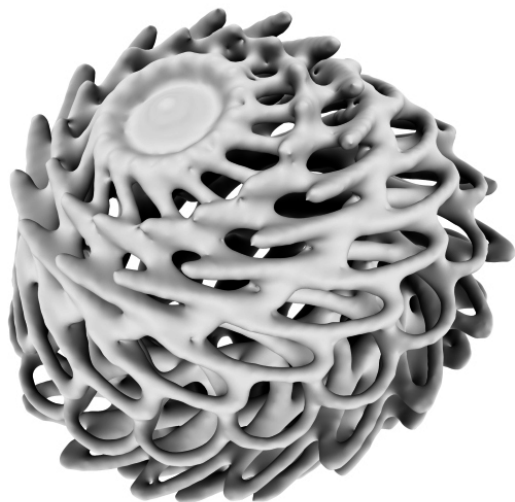
⁷⁸⁶ Vinod Srinivasan, Esan Mandal y Ergun Akleman. *Solidifying Wireframes*. s.l.: Texas A&M University College Station, 2005.

⁷⁸⁷ Mencionado en el capítulo anterior de esta misma tesis.

⁷⁸⁸ En 1903 Nikolai K Koltsov propuso que las formas de las células estaban determinadas por una red de tubos que llamo Cytoskeleton.

- Exoskeleton2 (group) (no se encuentra disponible en la web food4rhino) <http://www.Grasshopper3d.com/group/exoskeleton>

074. /// Geometría modelada mediante Exoskeleton en GH.
Autordesconocido, imagen de la galería de la web de Grasshopper3d.com.



Los primeros intentos de 2012 con frecuencia daban lugar a estructuras solapadas o finales de nudos abiertos. Estos errores fueron solucionados en 2014 con la aparición del plug-in⁷⁸⁹ Exoskeleton 2, disponible como código abierto⁷⁹⁰, que supone a día de hoy la mejor solución para este tipo de estructuras gracias a la incorporación de Plankton. Esta segunda versión de Exoskeleton permite entre otras cosas incorporar diferentes radios a la estructura, controlando la resistencia no solo a través de la densidad de línea, sino también a través del grueso. Obvia recalcar el interés de esta variable en la arquitectura. A nivel de código, sus mayores avances están en la flexibilidad para ejecutar los nudos de manera más fiable.

Agregación de células y fusión de mallas

En el curso 2014-15 de la School of Architecture (originalmente conocida como ESARQ) el doctor Alberto T. Estévez propone la incorporación de estrategias digitales impartidas por el doctorando en la asignatura de Composición 1. Dichas clases ofrecen a los alumnos la posibilidad de establecer los primeros contactos con técnicas verdaderamente digitales (es decir, no usar el ordenador como herramienta para desarrollar arquitectura pre-ordenador) y fabricación CAD-CAM. Si bien las horas son obviamente insuficientes para transmitir la teoría, explicar las herramientas, y ponerlas en práctica de una manera profunda; las clases logran mostrar las posibilidades y potencial de este proceder para con la arquitectura.

Durante el curso 2015-16 se puso especial interés en el modelado por malla. Primero poniendo atención al carácter facetado de las mallas (y así relacionarlo con el Cubismo) y la posibilidad de aplicar color en base a información introducida por el diseñador (y así relacionarlo con el Fauvismo). Este ejercicio inicial sirvió como prefacio para familiarizarse con las mallas y GH. El segundo ejercicio -sin duda la más valorada por los alumnos- se presentaba como asociación al movimiento Futurista (aerodinámico y continuo) y por lo tanto requería de tratamientos superficiales que asegurasen la suavidad de las superficies, tal y como lo hace la subdivisión de mallas.

⁷⁸⁹ En este punto no está claro si uno o dos componentes añadidos a GH deberían considerarse como un plug-in o simplemente "componentes".

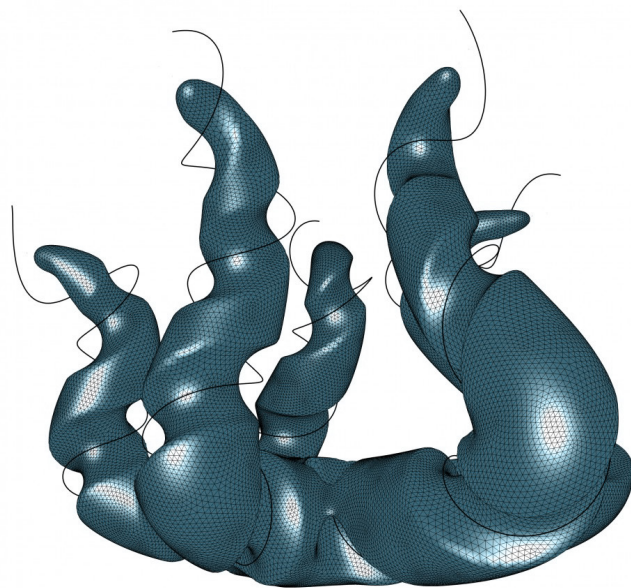
⁷⁹⁰ Github. "Exoskeleton2." Consultada 20 de junio, 2014. <https://github.com/davestasiuk/Exoskeleton2>

La práctica se estructuró entorno al plug-in Cocoon y sorprendió por su potencial y su enorme flexibilidad para generar geometrías que mediante el modelado corriente serían tremendamente complicadas. El valor de este plug-in en relación a la asignatura de Composición 1 viene dado por su capacidad para unificar diferentes geometrías -puntos, curvas, superficies o 'brepes'- en una único sólido cuya superficie delimitadora es absolutamente continua y homogénea sin pliegues o aristas de ningún tipo. Continuo, orgánico, aerodinámico... Si la mayor dificultad de esos adjetivos es procurar la correcta ejecución de las superficies, cuando se automatiza el proceso de unión en una única piel gracias a Cocoon el alumno únicamente ha de preocuparse por los espacios a generar y su organización.

En esta parte de la tesis se extenderá la explicación sobre el proceso subyacente y a posteriori se aplicará a los experimentos. Se procede pues a describir el marco computacional que permite la aparición en Julio de 2015 de un plug-in como Cocoon en GH, cómo funciona y qué ofrece en tres apartados: 'Half-edge System', 'Implicit surfaces' y 'Marching Cubes'.

075. /// David Stasiuk, geometría modelada por Cocoon, 2015. Imagen de la web del autor: bespokegeometry.com.

Cocoon⁷⁹¹ es una traslación al ecosistema de scripting visual de GH de los llamados 'Marching Cubes' y que se publica por primera vez en Julio de 2015 en el blog de David Stasiuk. El plug-in convierte iso-superficies en mallas poligonales dentro de GH basándose en los scripts desarrollados por Paul Bourke 'marching cubes'⁷⁹² y 'implicit surfaces'⁷⁹³ los cuales se detallaran más adelante. Frente a anteriores intentos de incorporar esta herramienta en GH, Cocoon incorpora y considera por separado la influencia y la fuerza de cada carga, lo cual permite introducir cargas negativas así como su influencia, sus límites, con el resto del sistema. Las cargas negativas se traducen en espacios vacíos, operación de gran interés para los arquitectos que desvela con frecuencia formas inesperadas. La influencia da lugar a geometrías más afiladas, menos orgánicas y más aerodinámicas cuando se tratan mayores valores numéricos. También permite manejar con cierta facilidad diferentes tipologías geométricas a la vez o añadir gradiente a los gruesos de las curvas.



'Half Edge System'

⁷⁹¹ Be spoke geometry. "Cocoon." Consultada 11 de mayo, 2015. <http://www.bespokegeometry.com/2015/07/22/cocoon/#more-871>

⁷⁹² Bourke, Paul. "Polygonising a scalar field." *Paulbourke*. Mayo, 1994. <http://paulbourke.net/geometry/polygonise/>

⁷⁹³ Bourke, Paul. "Implicit surfaces." *Paul Bourke*. Junio, 1997. <http://paulbourke.net/geometry/impliciturf/>

Cocoon necesita también de Plankton⁷⁹⁴ ⁷⁹⁵, una Librería C# desarrollada por Daniel Piker en 2013 que implementa estructura de datos de media-rista (half-edge) para mallas poligonales en Grasshopper. Plankton se usa en otros plug-ins de vital importancia en el ecosistema GH como Kangaroo, Exoskeleton, Mesh Machine... Cabe mencionar la existencia de múltiples estructuras para organizar las mallas poligonales entre las cuales se encuentra la que nos ocupa. Solo se hará una breve mención y descripción del listado para contextualizar la situación, pero pueden encontrarse más detalles en el ‘paper’ de Colin Smith⁷⁹⁶.

- *Face-vertex meshes: A simple list of vertices, and a set of polygons that point to the vertices it uses.*
- *Winged-edge meshes, in which each edge points to two vertices, two faces, and the four (clockwise and counterclockwise) edges that touch them. Winged-edge meshes allow constant time traversal of the surface, but with higher storage requirements.*
- *Half-edge meshes: Similar to winged-edge meshes except that only half the edge traversal information is used. (see OpenMesh)*
- *Quad-edge meshes, which store edges, half-edges, and vertices without any reference to polygons. The polygons are implicit in the representation, and may be found by traversing the structure. Memory requirements are similar to half-edge meshes.*
- *Corner-tables, which store vertices in a predefined table, such that traversing the table implicitly defines polygons. This is in essence the triangle fan used in hardware graphics rendering. The representation is more compact, and more efficient to retrieve polygons, but operations to change polygons are slow. Furthermore, corner-tables do not represent meshes completely. Multiple corner-tables (triangle fans) are needed to represent most meshes.*
- *Vertex-vertex meshes: A “VV” mesh represents only vertices, which point to other vertices. Both the edge and face information is implicit in the representation. However, the simplicity of the representation does not allow for many efficient operations to be performed on meshes.*

La teoría de ‘half-edge’⁷⁹⁷ permite simplificar las relaciones de los subelementos de la malla (cara, arista, vértice) estableciendo la arista como elemento principal: todos las aristas están definidos por 2 vértices y se contienen entre dos caras. Además, incorporan la dirección de la arista,

⁷⁹⁴ Piker, Daniel. “Plankton.” *Grasshopper*. Consultada 11 de mayo, 2015. <http://www.Grasshopper3d.com/group/plankton>

⁷⁹⁵ Descarga de Plankton. Consultada 30 de agosto, 2015. <https://github.com/meshmash/Plankton>

⁷⁹⁶ Colin, Smith. *On Vertex-Vertex Meshes and Their Use in Geometric and Biological Modeling*. <http://algorithmicbotany.org/papers/smithco.dis2006.pdf>

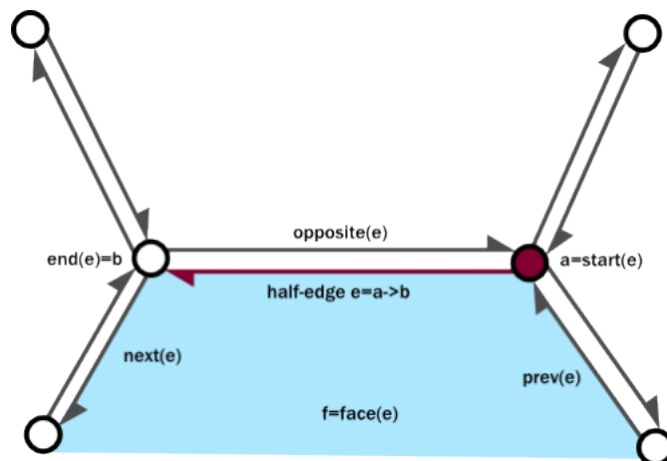
⁷⁹⁷ Foley, James D., y James D. Foley. *Computer Graphics: Principles and Practice*. Reading, MA: Addison-Wesley, 1990.

basándose en el orden de los vértices. Por supuesto, las aristas están divididas en dos longitudinalmente (cada una dando a una cara) para permitir todas las relaciones anteriores. Gracias a ello, se facilita la gestión de mallas con 'Ngons' (N-gonos) hecho que supone esencial para el desarrollo de este y otros plug-ins para abordar determinadas geometrías. Los 'Ngons' habilitan a la malla para superar el máximo de cuatro aristas por cara pudiendo crear pentágonos y sus sucesivos polígonos.

076. /// Esquema de 'Half-edge system'. Imagen de Fabian Giesen, 2012.⁷⁹⁸

Otros artículos que hacen referencia a la estructura de media-arista:

- S. Campagna, L. Kobbelt, H.-P. Seidel, Directed Edges - A Scalable Representation For Triangle Meshes , ACM Journal of Graphics Tools 3 (4), 1998.
- Lutz Kettner, Using Generic Programming for Designing a Data Structure for Polyhedral Surfaces, in Proc. 14th Annual ACM Symp. on Computational Geometry, 1998.



'Implicit surfaces'

También conocidas como 'isosurfaces', las 'implicit surfaces'⁷⁹⁹ en gráfica computacional son objetos n-dimensionales de aspecto orgánico que fueron renderizados (visualizados) por primera vez gracias a Jim Blinn en 1980⁸⁰⁰. Explicado de otra manera, son superficies que son contornos -la suma de varios objetos- en un espacio tridimensional. Es decir, las superficies son resultantes de un objeto primigenio -una esfera lo es de un punto, por ejemplo, un cilindro de una línea- que tiene un valor de carga asociado y que repercute en el campo tridimensional. Si varios puntos estuvieran próximos, la superficie resultante sería aquella que englobase todas las zonas del espacio tridimensional con el mismo valor de carga. Algo semejante puede considerarse de manera bidimensional de las líneas de cota en una topografía: siempre habrá una línea cerrada que represente una altura determinada.

Hay tres procesos diferentes para el cálculo de isosuperficies⁸⁰¹: el primero y más antiguo es 'Blobbies', desarrollado por el ya mencionado Jim Blinn. Más tarde, y aligerando enormemente la carga computacional, se desarrollaron las

⁷⁹⁸ The ryg blog. "Half edge based mesh representations theory." <https://fgiesen.wordpress.com/2012/02/21/half-edge-based-mesh-representations-theory/>

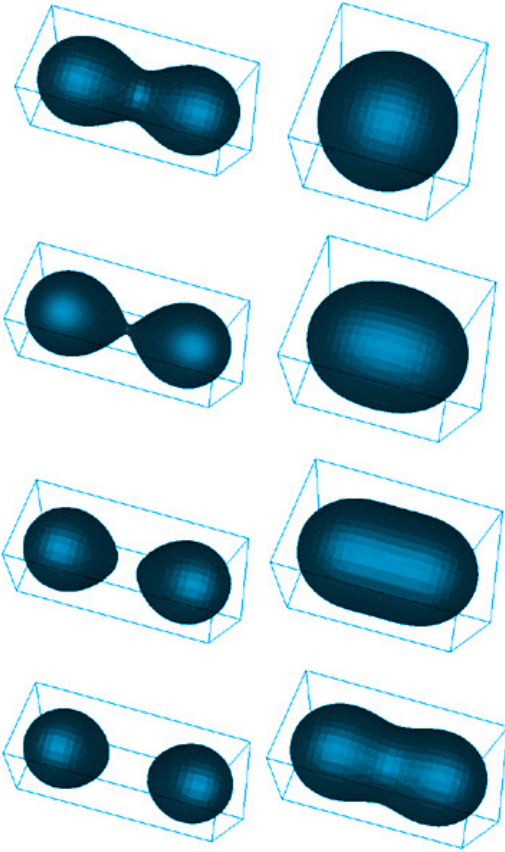
⁷⁹⁹ Bourke, Paul. "Implicit Surfaces." *Paulbourke*. Junio, 1997. <http://paulbourke.net/geometry/implicitsurf/>

⁸⁰⁰ Bloomenthal, Jules, y Chandrajit Bajaj. *Introduction to Implicit Surfaces*. San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers, 1997.

⁸⁰¹ Ricci, A. "A Constructive Geometry for Computer Graphics." *Computer-Aided Design* 6, no. 1, 1974. p. 53.

Metaballs⁸⁰² y los Soft Objects, siendo el segundo ligeramente más rápido que el primero porque evita el cálculo de raíces cuadradas. Las Metaballs son el proceso que se usa en GH por defecto.

077. /// Progresión de 'Implicit surfaces'. Imagen del artículo-web Paul Bourke, 1997. La separación de los puntos generadores muestra la separación "orgánica" de la superficie.



El problema añadido de las Metaballs es su output geométrico: curvas cerradas bidimensionales en un espacio tridimensional. Como se puede apreciar en los sucesivos post, existe una dificultad notable para trabajar a posteriori esas geometrías. En la mayoría de los casos, los mejores resultados se obtienen extrayendo puntos de dichas curvas y trazando una malla poligonal.

- Metaballs in 3D in GH: <http://www.designcoding.net/metaballs-in-3d/>
- Metaball Meshing: <http://www.Grasshopper3d.com/profiles/blogs/metaball-meshing>
- Panelling Metaballs: <http://www.Grasshopper3d.com/group/kangaroo/forum/topics/panelling-metaballs?commentId=2985220%3AComment%3A852058&groupId=2985220%3AGroup%3A120977>

'Marching Cubes'

Los 'Marching Cubes' (o Polygon scalar field/3d cotouring/surface reconstruction) es uno de los algoritmos de 'rendering' de volúmenes más difundido y utilizado es el denominado marching cubes, propuesto por Lorensen y Cline en 1987⁸⁰³. En el mismo se busca extraer una superficie umbral a partir de una matriz volumétrica de datos escalares. Una celda en el espacio está delimitada por los ocho valores de sus vértices. Cada celda se clasifica según los valores de sus vértices respecto al valor umbral. Una celda contiene un trozo de la superficie umbral si por lo menos uno de sus vértices está por debajo del valor umbral y por lo menos otro está por encima. En este caso, cada uno de los ocho vértices de una celda puede asumir un valor por debajo o por encima del umbral. El total de todos los casos posibles es $2^8=256$, pero por consideraciones de simetría se reducen en principio a solo 15. Resumiendo, el algoritmo analiza una rejilla ortogonal tridimensional y valora que celdas -células- están ocupadas para unificarlas en único sólido delimitado por sus límites.

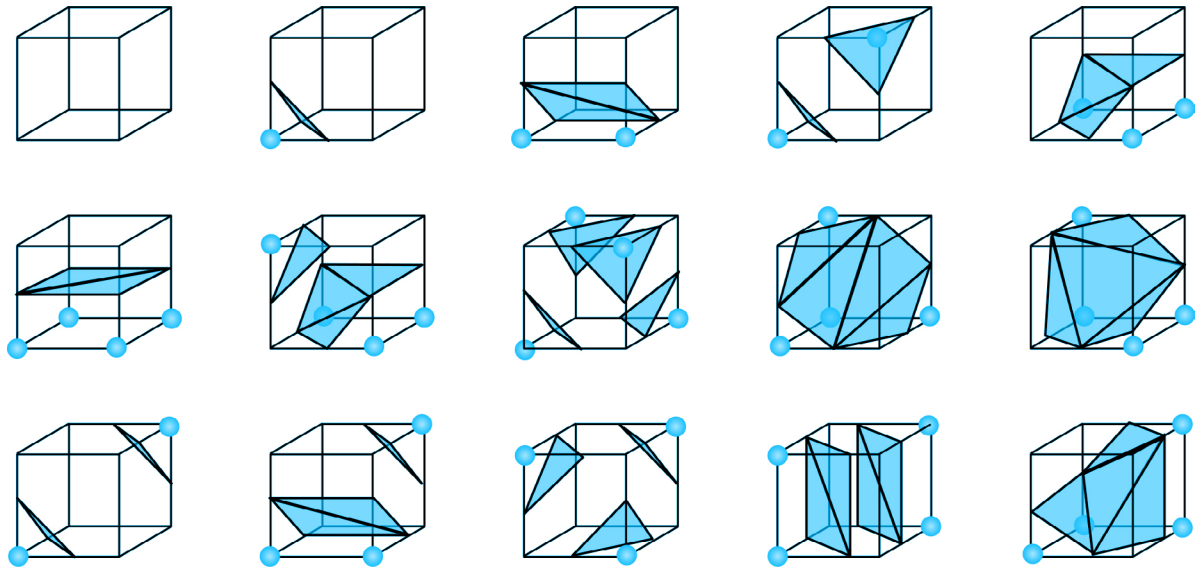
Aunque la temática de los 'Marching Cubes' ha estado presente en los foros

⁸⁰² Siggraph. "Metaballs." Consultada 11 de mayo, 2015. <http://www.siggraph.org/education/materials/HyperGraph/modeling/metaballs/metaballs.htm>

⁸⁰³ Lorensen, W. E., Harvey Cline. "Marching cubes: A high resolution 3d surface construction algorithm." *ACM Computer Graphics* 21, 1987. pp. 163-169.

de GH desde sus inicios (comprensiblemente ya que se trata de algo básico y relativamente antiguo), merece la pena mencionar la publicación en Enero de 2014 (año y medio antes de la publicación de Cocoon), que el mismo David Satsiuk inició y que marcará los primeros intentos de ejecutar 'Marching Cubes' dentro de GH⁸⁰⁴.

078. /// Variables de los 'marching cubes'. Lorensen, 1987. p. 164. Cada situación de intersección se abstrae en unos vertices concretos.



A nivel práctico, los marching cubes son una herramienta excepcional para aplicar volumetría -solidez- sobre situaciones muy heterogéneas compuestas por múltiples tipos de geometrías. Esto permitirá trabajar a nivel abstracto con diferentes estructuras funcionales para aplicar, en el último momento, una capa "materializadora" que las unifique y, potencialmente, otorgar un aspecto orgánico a todo el conjunto. Es frecuente advertir su uso en la representación de topologías en ámbitos virtuales, así como en el campo de la medicina para la representación y modelado de prótesis.

⁸⁰⁴ Stasiuk, David, "Marching Cubes: Curve Wrapping & More Metaballs" *Grasshopper*. Consultada 31 de enero, 2014. <http://www.Grasshopper3d.com/profiles/blogs/marching-cubes-curve-wrapping-more-metaballs>

3.5. Repercusiones embriológicas en el modelo evolutivo

El modelo embriológico justifica el problema de la escala en la traducción del genotipo al fenotipo⁸⁰⁵. Actualmente el traspaso de información a individuo en la arquitectura o en muchos de los ejemplos realizados con algoritmos evolutivos es 1:1. Es decir, la cantidad de información ha de ser la misma que la de elementos expresados en la realidad, creando una relación directa.

Si uno de los objetivos es lograr mayor capacidad para tratar proyectos que cada vez son más complejos esta relación 1:1 haría imposible la navegación y control de la información en el fenotipo. El modelado embriológico introduce una conexión indirecta entre genotipo y fenotipo, eliminando el problema de la escalaridad y la asociación de tamaño^{806 807}. Si bien este es uno de los valores positivos de la embriología, también hay que alertar de que introduce dos saltos entre los individuos: el salto de información en su abstracción, y el de la relación entre los fenotipos vecinos cuyos valores pueden no ser necesariamente preservados⁸⁰⁸. En el siguiente párrafo Chris P. Bowers expone claramente una de las virtudes de la redes neutrales como consecuencia de un aparente defecto, no solo por su relación con la embriología, pero sino también porque resulta totalmente válido para los algoritmos evolutivos multiobjetivo⁸⁰⁹.

A further side effect of a computational model of embryogeny, due to the complex nature and potential redundancy within the mapping, is the existence of many individuals which, while genetically diverse, perform identically when evaluated. These individuals are considered to be "neutral" relative to each other. Such neutrality has important implications for computational search processes because it changes the nature of the search space. Local optima become much rarer with most individuals belonging to networks of individuals of equal fitness (neutral networks) which can be vastly distributed across the entire search space. CHRIS P. BOWERS

El texto refleja ese hecho de vital importancia propio del mapeo⁸¹⁰ indirecto

⁸⁰⁵ Stanley, K., Miikkulainen, R. "A taxonomy for artificial embryogeny." *Artificial Life*, 2003.

⁸⁰⁶ Menon, Anil. *Frontiers Of Evolutionary Computation*. Boston: Kluwer Academic, 2004.

⁸⁰⁷ Bentley, P., Gordon, T., Kim, J., Kumar, S.: New trends in evolutionary computation. *Proceedings Of the 2001 Congress on Evolutionary Computation: CEC2001: May 27-30, 2001, COEX, Seoul, Korea*. Piscataway: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2001.

⁸⁰⁸ En esta tesis, se soluciona a través del uso de meshes, visible en los experimentos 1, 4 y 5.

⁸⁰⁹ En esta tesis, capítulo: Algoritmos Multiobjetivo (Octopus ES, cap. 3.3).

⁸¹⁰ tr. *Biol.* Localizar y representar gráficamente la distribución relativa de las partes de un todo; como los genes en los cromosomas.

-la lectura de datos-: que es necesario tener en cuenta la abstracción de la información, su falta de contexto, los peligros de su comparación y valoración sin contemplar sus efectos, sus fenotipos. Como se verá en el experimentos, individuos totalmente opuesto contemplan valores semejantes y no reflejan esa variedad en según qué herramientas de análisis y control de poblaciones. Los algoritmos multi-objetivo mantienen la neutralidad pero su cuantificación puede ser engañosa. Por tanto se requiere no solo considerar los valores de análisis (que pueden ser entendidos como fenotipos en los experimentos más abstractos) sino también los fenotipos reales-geométricos. Ya que estas redes neutrales (poblaciones cuyos individuos son muy parecidos cuando se les evalúa pero que en realidad contienen material genético muy diferente) pueden inducir a error al aparentar caer en “Local óptima”.

Wagner y Altenberg enfatizan el valor del mapeado de la información, la transformación de los valores de los genes respecto a su expresión de adaptabilidad, mediante la analogía del mono de Émile Borel⁸¹¹; argumentan que es mucho más probable que el mono logre su objetivo si se le da una máquina de escribir, que si se le da papel y lápiz. Escoger las transformaciones adecuadas de información puede ser extremadamente exitoso en la dirección de la investigación.

Como contrapunto, la evolución neutral por definición, no puede ser dirigida. Ello no quiere decir que siga habiendo un proceso de selección⁸¹². Actualmente se baraja la posibilidad de que la evolución neutral sea un proceso mejorado con diversos beneficios: prevención de convergencia prematura⁸¹³, curvas de búsquedas más suaves, pre-adaptaciones⁸¹⁴, etc. Estas consideraciones sobre el análisis de los fenotipos cobrará especial interés durante la interpretación de resultados y selección de individuos en el experimento #3 del apartado de desarrollo de esta tesis.

⁸¹¹ Borel, Émile. *La mécanique statique et l'irréversibilité*. J. Phys. Theor. Appl., 1913. pp.189-196.

⁸¹² En los experimentos aplicados en esta tesis se escogen varios objetivos sin definir prioridad por ninguno.

⁸¹³ Ebner, M. Shackleton, M., Shipman, R. “How neutral networks influence evolvability.” *Complexity* 7, 2001. pp. 19-33.

⁸¹⁴ Miglino, O., Nolfi, S., Parisi, D. “Discontinuity in evolution: How different levels of organization imply pre-adaptation.” R. Belew, M. Mitchell (eds.) *Adaptive Individuals in Evolving Populations: Models and Algorithms*, 1996. pp. 399-415.

Q4

4. DESARROLLO DE EXPERIMENTOS PRÁCTICOS

*It's difficult to jump into the unknown*⁸¹⁵. ERNESTO BUENO

El desarrollo de la tesis consiste en la recopilación de una serie de experimentos llevados a cabo por el doctorando. Como se ha explicitado en la introducción de la tesis -objetivos y metodología-, estos experimentos aplicarán los conceptos descritos en el estado de la cuestión. Los experimentos consisten en:

- Demostrar y aplicar el uso de estrategias biológicas en diseño arquitectónico y/o geométrico a través de lo computacional mediante un uso de software que excluya el uso de código y que gira entorno al ecosistema de Rhinoceros-Grasshopper.
- Evaluar y profundizar en dichas estrategias evolutivas, así como recopilar implicaciones y consideraciones sobre su aplicación en el diseño de arquitectura.
- Mejorar los sistemas computacionales para aproximarlos más a las lógicas y procesos emergentes de la ciencia Evo-Devo. Paliar al mismo tiempo algunas de las carencias del estado actual expuestas en el estado de la cuestión.

A pesar de que algunos de los experimentos se fundamentan en principios de la arquitectura, el objetivo de los mismos no es ningún caso considerar los resultados como proyectos validos en su vertiente constructiva y/o proyectual. En cambio, sí se pretende validar y analizar las analogías empleadas en su desarrollo para que estas puedan servir en proyectos posteriores. Es decir, se testa la metodología y el proceso, no la validez del resultado.

En lo que se refiere a los archivos requeridos para llevar a cabo los experimentos (principalmente archivos 3D de Rhino y definiciones de GH) no serán descritos de forma exhaustiva. Tal y como se describió en la metodología, no es uno de los objetivos de esta tesis hacer un compendio de ejercicios-tutoriales para el aprendizaje de Rhino y GH. Aun así, si que se dispondrá el libre acceso a los archivos vía web en el siguiente link una vez la tesis haya sido defendida con éxito:

<https://drive.google.com/drive/folders/0B2B3x9cjrTYkUVBvUS1YamtTNmM?usp=sharing>.

Además de su indudable utilidad y contribución a futuras investigaciones, esta acción se justifica adicionalmente debido a la imposibilidad de hacer capturas de las definiciones a un tamaño que permitiese su lectura y comprensión (superficies superiores a un DIN A1).

Los experimentos consistirán en:

- Elección de los procesos Evo-Devo más relevantes a digitalizar.
- Transformación y simulación de dichos procesos a través de GH (elección de los componentes y el flujo de datos).

⁸¹⁵ Clase teórica en el máster de Arquitectura Biodigital, Febrero de 2011.

- Progresiva incorporación de elementos para enriquecer la definición. Testeo de dichas incorporaciones/versiones.
- Formalización de resultados y su correspondiente análisis.
- Valoración y consideraciones sobre el proceso y sus resultados. Consideraciones sobre su aplicación (a nivel arquitectónico o geométrico) y futuras aplicaciones y/o alternativas.

Los experimentos se presentan en orden cronológico, por lo que algunas de las carencias detectadas en los primeros experimentos serán resueltas en los últimos, logrando una abstracción más fidedigna del proceso Evo-Devo. Los experimentos consistirán en los siguientes temas:

1. La implementación de metodologías emergentes descritas en las referencias Evo-Devo (tales como ‘switches’) a través de GH. Consideraciones sobre la transmisión de información y su expresión, es decir, el aspecto genotipo-fenotipo.
2. La incorporación de técnicas Evo-Devo siguiendo los parámetros del Seminario de Emergencia en la Architectural Association de Londres. Genes como modificadores, ‘body-plan’, ‘crossovers’, ‘fitness’, etc. La definición de un proceso fiel a pesar de sus incompatibilidades con las herramientas digitales actuales.
3. El uso de algoritmos multi-objetivo en tejidos urbanos existentes. Profundizar y contrastar la metodología a través de MOEA aplicada a casos reales e icónicos de urbanismo. En el caso presente, ‘Eixample’ de Cerdà.
4. La interpretación de la fórmula Cerdà como ejemplo de arquitectura proto-paramétrica. Someter dicha fórmula a procesos evolutivos para comprobar su comportamiento ante diferentes criterios de adaptabilidad.
5. La incorporación de ‘body plans’ en el proceso de simulación evolutivo-digital. La inclusión de un flujo de información en GH que permita entender los genes como diferentes acciones (modificadores) en lugar de diferentes intensidades (números, ‘sliders’).

Los experimentos 2 y 3 presentan una versión más desarrollada y reorientada de ejercicios que se plantearon originalmente en la Architectural Association de Londres (AA) e incluyen algunas de las partes allí realizadas. El doctorando participó como “Guest PhD” (doctorando invitado) en el seminario de ‘Emergence y Design Seminar Course’ dentro del master de ‘Emergent Technologies’ dirigido por Mike Weinstock. La motivación inicial para cursarlo era el dominio de nuevos algoritmos evolutivos (Octopus, un add-on que ofrece ‘fitness’ multi-objetivo), profundizar en las metodologías para aplicarlo a un perfil arquitectónico, y la inclusión de las teorías Evo-Devo en los procesos de desarrollo geométrico.

El seminario plantea una serie de ejercicios (secuencias) que se llevaron a cabo junto a otros doctorandos de la AA: Mohammed Makki y Ali Farzaneh, ambos bajo la tutoría de Mike Weinstock. En lo venidero, se acuñará el término “secuencia” para la sucesión de generaciones dentro de una misma línea evolutiva. El seminario cuenta con un total de cuatro ejercicios asociados a sus respectivas secuencias, cada cual introduciendo nuevos aspectos respecto a la anterior.

Exp. 0: 'Radiolara development', 2011

Este ejercicio se llevó a cabo fuera del marco temporal de la tesis, en el Workshop Filogenético, durante la edición del máster de Arquitectura Biodigital de 2011⁸¹⁶. Por los conceptos que intervienen en él, se considera oportuno visitar el ejercicio propuesto por el Dr. Mauro Costa y establecer relaciones a la luz del estudio hecho en el estado de la cuestión.

*No tiene sentido pensar que nuestro cerebro no tiene límites cuando sí que los tiene, necesitamos el ordenador para llegar más lejos*⁸¹⁷.
MAURO COSTA.

El mapa filogenético se asocia a las reglas evolutivas de la naturaleza y al esquema entorno-genotipo-fenotipo. Así, desde una especie inicial se desarrollan un número de derivaciones que comparten rasgos similares. El ejercicio supone un preludeo proto-digital a los procesos Evo-Devo descritos en la tesis en relación a los conceptos de genotipo y fenotipo. Las diferentes expresiones de los individuos se modelan con software, pero las deducciones lógicas son manuales. En una segunda fase, se construye un mapa filogenético en forma de definición de Grasshopper, capaz de albergar todas las posibles variables (fenotipos) de la especie en cuestión, apareciendo en el proceso nuevos individuos por la intersección de sus antecesores.

Algunos de esos rasgos pueden continuar en el tiempo mientras que otros pueden eliminarse o extinguirse. Dichos cambios o evoluciones no se aplican de única y estrictamente a priori -por reglas genotípicas-, sino que pueden expresarse como respuesta a un entorno, es decir, producir un fenotipo extendido⁸¹⁸. Al introducir el juego del elemento fenotípico propio de la genética se añaden dos conceptos: primero la dependencia del entorno que ya decíamos, un factor más que puede variar; segundo, la posibilidad de que el fenotipo se exprese o no dependiendo de la relación entre el entorno y el genotipo -reglas teóricas a priori que definen la especie inicial-. El entorno en este caso, se definía de forma arbitraria por los alumnos del máster.

Se formula a modo de comienzo para que intervengan en el mapa filogenético una serie de posibles "estrategias de evolución":

- Repetición (suma, p.e. la piel)
- Intercambio (partes combinadas, p.e. una mosca)
- Parametrismo (p.e. vertebras humanas frente otros mamíferos)
- Función Dual (interfieren en más de un resultado)

El resultado, si se lleva con suficiente rigurosidad hasta un punto lejano, es un objeto que se expresará en variaciones que no se habían previsto, un

⁸¹⁶ Navarro, Diego. *Random May Not Be Random*. Barcelona: s. e., 2011. Tesina en máster de Arquitectura Biodigital. p.30.

⁸¹⁷ Clase teórica dentro del 'workshop' de GH, durante la edición del Máster Arquitectura Biodigital. Barcelona, 2011.

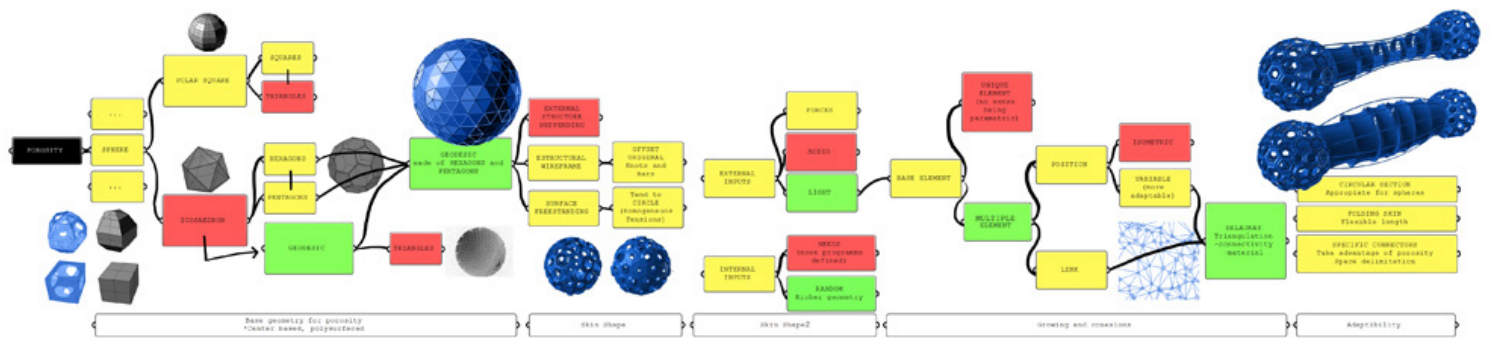
⁸¹⁸ Dawkins, Richard. *The Extended Phenotype: The Gene as the Unit of Selection*. Oxford: Freeman, 1982. p.233.

resultado en el que la intervención define los primeros inputs y los factores externos que le afectan, pero no el resultado que genera finalmente.

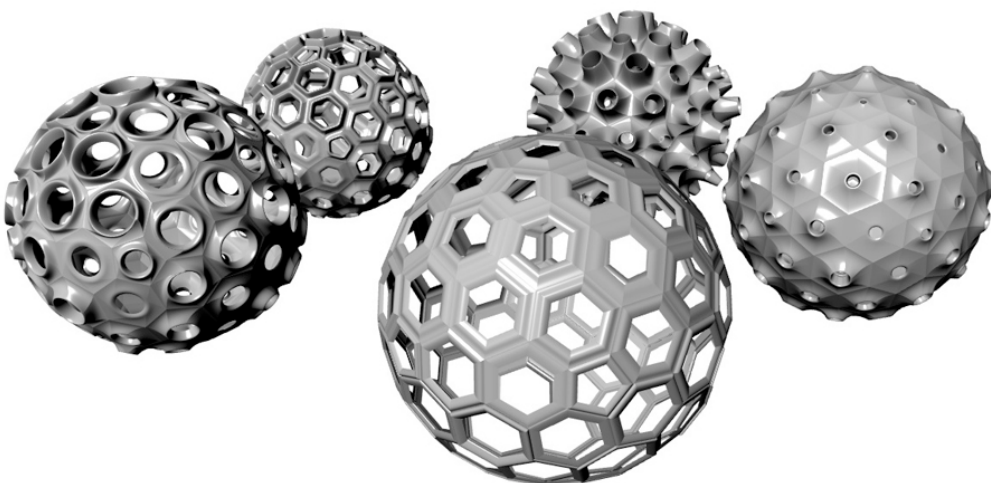
El ejercicio en cuestión pretende replicar el pabellón biodigital en la Universitat Internacional de Catalunya, ejecutado por el grupo de investigación Arquitecturas Genéticas. Esto condicionaba un final menos inesperado, pero también arrojaba luz sobre la progresiva complejidad de elementos extremadamente simples y las posibles variaciones expresadas tras la combinación de los apartados del mapa filogenético.

Este ejercicio temprano de conceptualización de los procesos biológicos pone de manifiesto la importancia de un pensamiento lógico, creativo, que posteriormente -si es posible- habrá de parametrizarse. Felizmente, coincide con el mismo flujo de trabajo llevado a cabo en el seminario de Emergencia de la AA (Architectural Association), donde muchos de los conceptos aquí esbozados han sido exitosamente incorporados a las definiciones paramétricas de los posteriores experimentos.

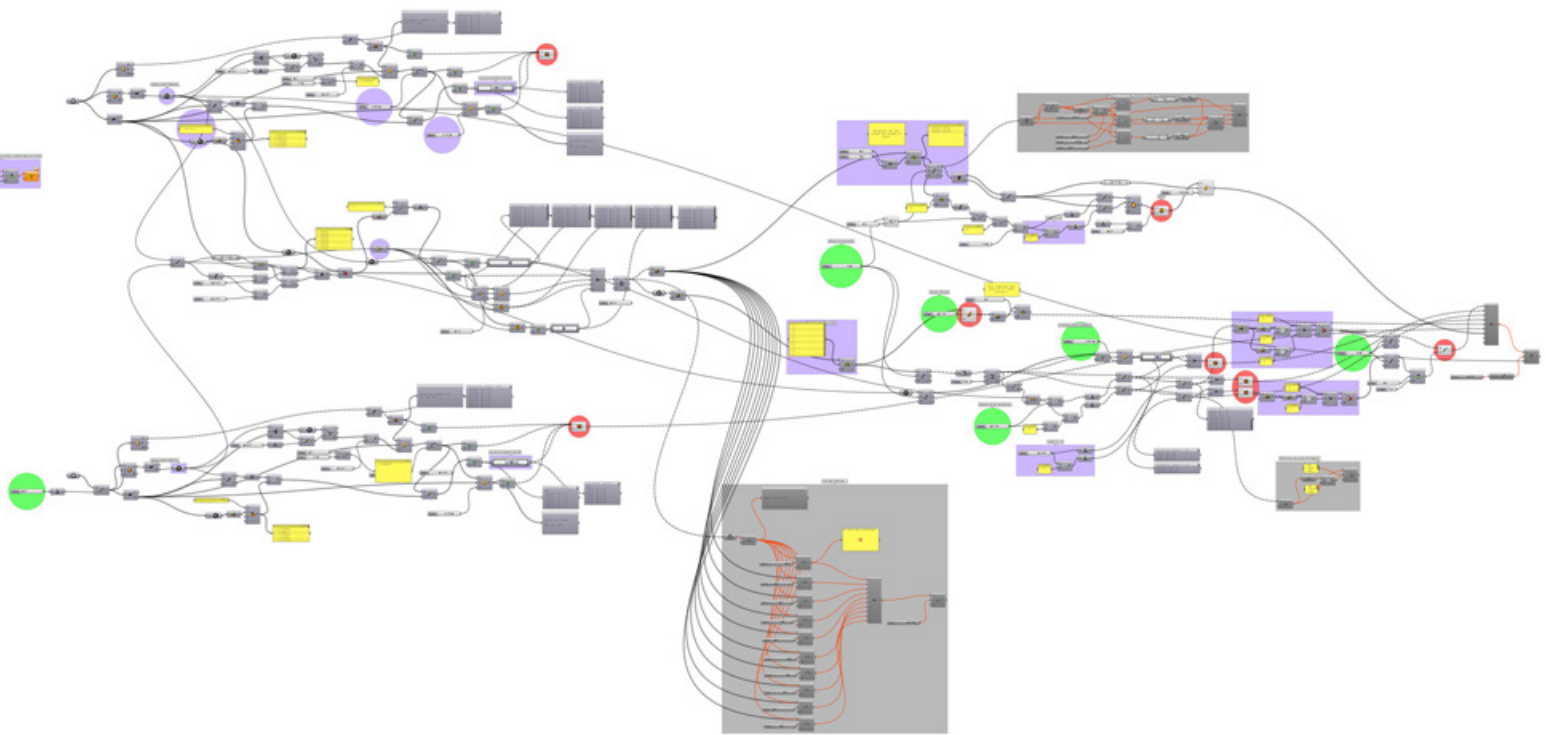
006. /// Mapa fenotípico con la evolución de la “radiolarización”. Navarro, 2010. p. 30.



007. /// Radiolarias paramétricas. Navarro, 2010. p. 31. Variedad de esferas posibles alternando los valores de sus agujeros.



008. /// Definición del mapa filogenético en GH para la variación de estructuras radiolarias. Navarro, 2010. p. 32



4.1. Exp. 1: Superposición de patrones

La realización de este experimento pasa por contrastar los siguientes conceptos del estado de la cuestión:

- La creación de patrones a través de reglas simples aludiendo al “Nuevo tipo de ciencia” de Wolfram (cap. 3.1.2).
- La expresión de determinados genes en diferentes lugares de un mismo cuerpo y el uso de ‘switches’ aludiendo a la ciencia embriológica (cap. 3.2.2).

Los patrones -compuestos por varias familias- se configuran a través de ‘switches’ gracias a la estructura de datos de GH, para luego aplicarse sobre mallas en forma esférica. El objetivo principal es provocar aleatoriedad en complejidad creciente no a través de procesos más complejos, sino enriqueciendo las estructuras -simples- originales. Es decir, no se añadirán nuevas herramientas o procesos sino que únicamente se ampliarán las capacidades de las estructuras organizadoras mencionadas. En pos de un alarde parametricista, todos los factores aleatorios que se dan en la definición beben de un único ‘slider’ (semilla, ‘seed’) que los controla y que por lo tanto al cambiar su valor modifica todos los aspectos de la definición.

Las herramientas son:

- Subdivisión del individuo en número mayor de partes.
- División/Agrupación de información.
- Superposición de información.
- Interrelación numérica de las partes.

A nivel de GH han sido necesarios los siguientes conceptos:

- Creación de grupos aleatorios con valores aleatorios⁸¹⁹.
- Subdivisión de grupos y el uso de máscaras.
- Redistribución de grupos en base a condicionales booleanos.
- El uso de colores en mallas⁸²⁰.
- La construcción de ‘paths’ de manera paramétrica⁸²¹.

Se ha escogido la esfera como figura geométrica por su propiedad volumétrica -cerrada-, caras desiguales -que permitan ver la adaptación a diferentes tamaños-, pero de superficie única. Se ha considerado oportuno que dicha esfera sea una malla poligonal por las siguientes razones y en contraposición

⁸¹⁹ Usai, Sylvain. “Random true false pattern controlling items.” *Grasshopper*. Consultada 31 de agosto, 2013. En: <http://www.Grasshopper3d.com/forum/topics/random-true-false-pattern-controlling-n-items>

⁸²⁰ El lector puede profundizar sobre el uso de colores en la web de GH. Consultada 11 de mayo, 2015. http://Grasshopperprimer.com/en/1-foundations/1-3/4_domains-color.html

⁸²¹ Secondsky. “Join string into the format function.” *Grasshopper*. Consultada 28 de agosto, 2012. <http://www.Grasshopper3d.com/forum/topics/join-string-into-the-format-function>

a las NURBS:

- Las geometrías ‘mesh’ llevan embebida la información de color en su geometría.
- Son más ligeras, lo cual nos permitirá experimentar a una mayor escala.
- Resulta más fácil partirlas y subdividir las (comandos SPLIT y SUBDIVIDE).

Por supuesto, el software paramétrico nos permitirá aplicarlo a cualquier superficie a posteriori, una vez la definición este diseñada. No obstante la topología de esa geometría afectará enormemente la manera en que se desarrolla la definición. Al contrario que las superficies de Rhino (siempre divididas en una matriz bidimensional U y V) una ‘mesh’ puede resultar mucho más caótica y desordenada, más aún cuando ha sido resultado de múltiples cambios. Esto no tiene por qué ser una desventaja, sino un factor más a tener en cuenta que otorga un nivel más de complejidad.

El experimento consta de tres versiones: la primera versión del experimento logró la creación de “manchas aleatorias”, “colores aleatorios” y “agrupaciones aleatorias” -refiriéndose al tamaño de esas agrupaciones-. En la segunda versión se aumentó el número de posibles agrupaciones así como su longitud o valor máximo, y la incorporación de colores aleatorios en relación a los grupos (anteriores experimentos solo constaban de dos grupos). También se incorporó la subdivisión geométrica de algunas caras y su identificación mediante la asignación de un color distinto. La tercera versión añadió un número aleatorio de colores que no se asocia necesariamente a los grupos. También se incorporó una nueva capa de franjas que se solapa con la anterior en un proceso de “multiplicación de colores”. Este proceso hace referencia a la activación de patrones de melanina sobre otros colores (cap. 3.1.2).

Color, información, y voxels (‘meshes’)

Hablar de colores es hablar de lo visible. Su expresión, dependiendo de su origen, entraña de por sí toda una serie de estrategias y usos⁸²². Ya sean pigmentos, luz, materiales, o monitores, los colores son una característica inherente a la arquitectura pero, sobre todo, son un valor diferenciador: pocas características permiten la separación visual de tan amplio abanico de valores, convirtiéndolos en un elemento idóneo para el análisis y la comparación científica. En esta misma tesis, el blanco y negro han sido el tono habitual para distinguir patrones como los generados por las células autómatas. Para este primer experimento, se busca traspasar esa complejidad inicial de llenado añadiendo múltiples niveles jerárquicos y organizativos.

El uso de color en este ejercicio no alude únicamente al aspecto visual. Se escogió el uso de colores como método ligero capaz de transportar información

⁸²² Lucerne Foundation. *Making Colour*. The National Gallery. Londres, Septiembre, 2014. Exposición.

de estados originales (genes) a una expresión que permitiese distinguir fácilmente sus partes y que a la vez ofreciese suficiente riqueza. También se escogieron los colores por su capacidad de descomponerse en más datos (HSB, RGB, CMYK,...). Esto permite unificar diferentes tipos de información bajo un mismo valor, simplificando en gran medida la complejidad del sistema total. Por ejemplo, cada color podría estar relacionado a valores de transparencia, materialidad y reflectancia, o cualquiera de los sistemas propuestos en la tesis de Neri Oxman sobre el voxel⁸²³. Se propone en esta tesis que el color puede funcionar como fenotipo, expresión de una cualidad, y como genotipo, estructurador y portador de información. En esta definición se construirán esos valores a través del sistema RGB (Red, Green, Blue) cuyo dominio para cada uno de los tres canales oscila entre 0 y 255 (0,0,0 es negro, 255,255,255 es blanco).

Máscaras paramétricas ('switches' genéticos)

Los 'switches' (o interruptores) suponen un 2 o 3% de toda la materia oscura almacenada en nuestro ADN, el resto se considera que una gran parte no es activa o funcional, sino residuos de estados anteriores que ahora resultan inútiles y quedan adormecidos, hoy por hoy las "sobras" acumuladas a lo largo de la evolución. Los 'switches' dan lugar a patrones de actuación, organizan qué elementos tienen que activarse y cuáles no, y en qué momento debe realizarse dicha activación. Estamos hablando de un "mero botón" que se enciende o se apaga en determinados momentos bajo determinadas circunstancias, algo fácil de trasladar en términos digitales.

La parte principal de la demostración computacional es el uso de la gramática en máscaras para definir las reglas (los 'switches') que se aplicarán sobre la definición. Una máscara en informática es el conjunto de datos que, junto con una operación permite extraer selectivamente ciertos datos almacenados en otro conjunto. El término proviene, en sentido figurado, de la capacidad de las máscaras para permitir a través de sus agujeros la visualización de ciertas partes de aquello que cubren, a la vez que ocultan (enmáscaran) aquello tapado por las zonas no perforadas. Los 'switches' funcionan de la misma forma, no son el resultado de la alternancia de diferente información, sino la constancia de un solo tipo que se manifiesta o no. En la demostración la información continua que es enmascarada son las caras que componen la esfera.

La aplicación de estos contenidos durante el experimento se ve afectada por cambios en GH. La gramática de Grasshopper sufre un cambio relativamente

⁸²³ Oxman, Neri, *Material-based design computation*, Massachusetts Institute of Technology, 2010, p.74

tardío⁸²⁴ (3 de Noviembre de 2013) y permite la escritura de símbolos y códigos para definir reglas de selección, evitando un proceso manual que requeriría la definición de la máscara uno por uno, o muy simple en su defecto. Estos cambios, en el momento de realizar la tesis se reducen a tres componentes: ‘Path Compare’, ‘Tree Split’, y ‘Replace Path’. Estos son algunos de los ejemplos expuestos en el post⁸²⁵:

- * Any number of integers in a path
- ? Any single integer
- 6 Any specific integer
- !6 Anything except a specific integer
- (2,6,7) Any one of the specific integers in this group.
- !(2,6,7) Anything except one of the integers in this group.
- (2 to 20) Any integer in this range (including both 2 and 20).
- !(2 to 20) Any integer outside this range.
- < 4 Any number smaller than X. This notation is shorthand for [0 to 3]
- <= 8 Any number equal to or smaller than X. This notation is shorthand for [0 to 8].
- > 10 Any number larger than X. This notation is shorthand for [11 to infinity].
- >= 5 Any number larger than or equal to X. This notation is shorthand for [5 to infinity].

Las operaciones booleanas (lógicas) también pueden ser aplicadas a máscaras.

$\{*\}[(0 \text{ to } 4) \text{ or } (6,11,41)]$ ⁸²⁶

Este cambio también altera la sintaxis del ‘path mapping’, es decir, la manera en la que se define la nomenclatura de la estructura de un árbol (o path). Debido a la introducción del paréntesis para definir aclaraciones y reglas dentro de una máscara los índices de objetos dentro de una rama se escriben entre corchetes.

sintaxis vieja {a;b}[c] *sintaxis nueva* {a;b}(c)

En la definición de Grasshopper se aplicarán varias máscaras en diferentes niveles jerárquicos sobre información aleatoria para generar una sucesión infinita⁸²⁷ de resultados. Con cada nueva definición se aumentará el número de factores que son susceptibles de cambio aleatorio y la variedad de las máscaras para obtener resultados progresivamente complejos. Al mismo tiempo se aumentará el número de caras de la esfera para observar con mayor

⁸²⁴ Rutten, David. “Data tree selection rules.” *Grasshopper*. Consultada 28 de noviembre, 2013. <http://www.Grasshopper3d.com/forum/topics/datatree-selection-rules> . Video con demostración <http://vimeo.com/78886857>

⁸²⁵ Se aprecia en los ejemplos que el sistema elegido coincide con las lógicas estándar en matemáticas y computación, tratando de universalizar el ecosistema.

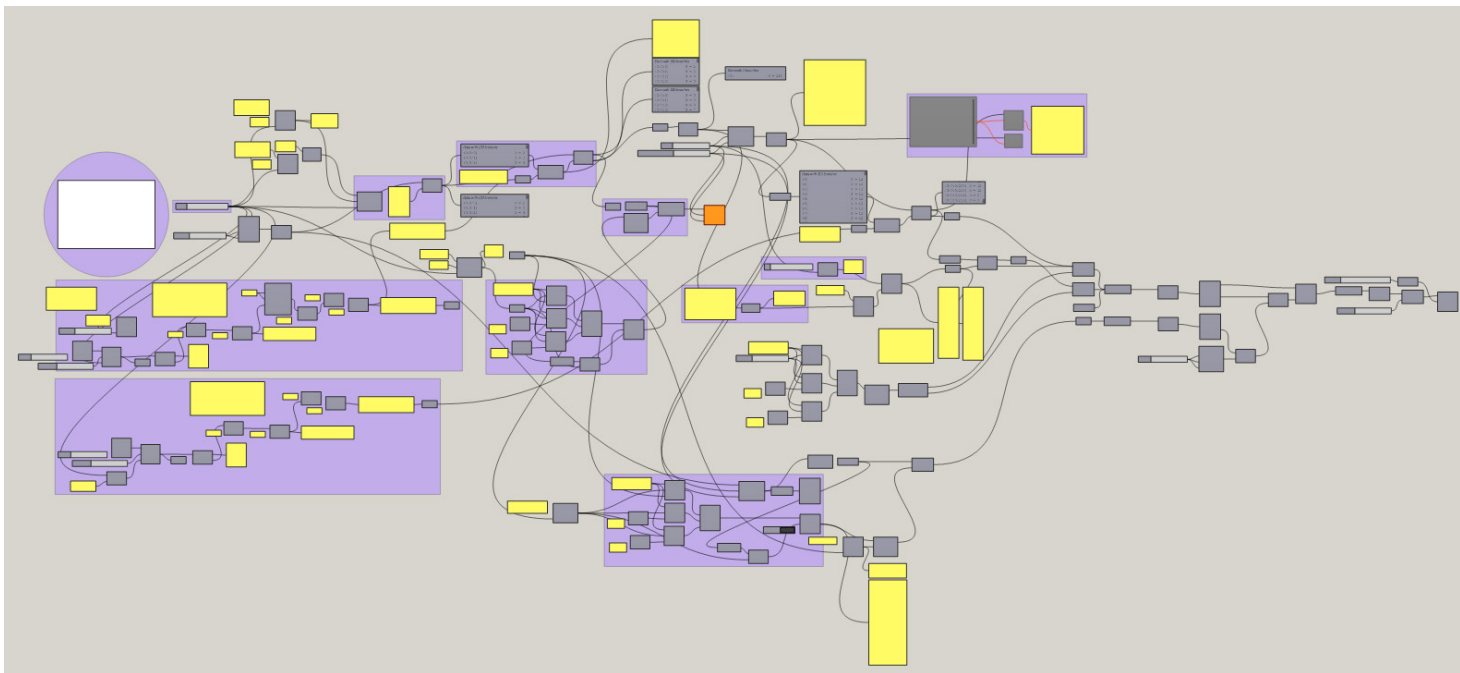
⁸²⁶ Path que incluye el elemento booleano OR. Si cualquiera de las dos condiciones es verdadera, tendrá lugar.

⁸²⁷ Lo aleatorio o lo infinito en computación tienen límites reales que dependen de los algoritmos y la potencia del ordenador, pero que quedan muy lejos de cualquier apreciación humana.

claridad la repetición de los patrones que irán emergiendo, muy en la manera e proceder de Stephen Wolfram.

Para no alargar innecesariamente la tesis en lo que a experimentos prácticos se refiere, solo se incluirán las definiciones/versiones más relevantes con el fin de comparar y entender una evolución. 6 definiciones más fueron desarrolladas en el proceso con el fin de garantizar y contrastar cada uno de los pasos. Se listan en cada una de las versiones sus propiedades, adjuntando una imagen que recopila 101 individuos (del individuo 0 al 100, para ser consecuente con la metodología computacional).

009. /// Captura de la definición de GH para la simulación de 'switches'.



Primera definición.

- La esfera está compuesta de 20x20 caras.
- Solo existe una única máscara que divide la esfera en dos colores (activo e inactivo).
- La longitud de los grupos en los que dividen las máscaras son aleatorios.
- Los colores que se aplican son aleatorios.



Segunda definición.

- La esfera está compuesta de 30x30caras.
- La primera máscara divide la esfera en dos colores (activo e inactivo).
- La longitud de los grupos en los que dividen las máscaras son aleatorios.
- Los colores que se aplican son aleatorios.
- Se introduce un segundo nivel jerárquico (una segunda máscara) mediante la aparición de agentes en las caras que no han sido afectadas por los primeros interruptores.
- La proporción de estos agentes es aleatoria.
- Los agentes se subdividen en varias caras algunas de las cuales mantienen el color de las caras que no han sido afectadas por ninguna máscara.
- La proporción de estas caras es constante, su posición es aleatoria.



Tercera definición.

- La esfera está compuesta de 60x60caras.
- La primera máscara divide la esfera en un número aleatorio de grupos (activos e inactivo).
- La longitud de los grupos en los que dividen las máscaras son aleatorios.
- Los colores que se aplican son aleatorios.
- Se introduce un segundo nivel jerárquico (una segunda máscara) mediante la aparición de agentes en las caras que no han sido afectadas por los primeros interruptores.
- La proporción de estos agentes es aleatoria.
- Los agentes se subdividen en varias caras algunas de las cuales mantienen el color de las caras que no han sido afectadas por ninguna máscara.
- La proporción de estas caras es constante, su posición es aleatoria.
- Se zonifica la esfera en un número de capas aleatorio.
- Los colores de las capas son aleatorios.
- Se introduce un porcentaje aleatorio de mezcla entre dichas capas mediante el componente JITTER.

Detallando con mayor precisión algunos de los cambios introducidos en la tercera definición:

1. La introducción de la última parte en la tercera definición provoca una superposición de información (colores) en la esfera. Para lidiar con ella se han “multiplicado” los valores de los colores dando lugar a un tercer valor que será el definitivo.
2. Construir máscaras aleatorias requiere no solamente el uso de la sintaxis, sino cómo construirla a partir de información fragmentada.

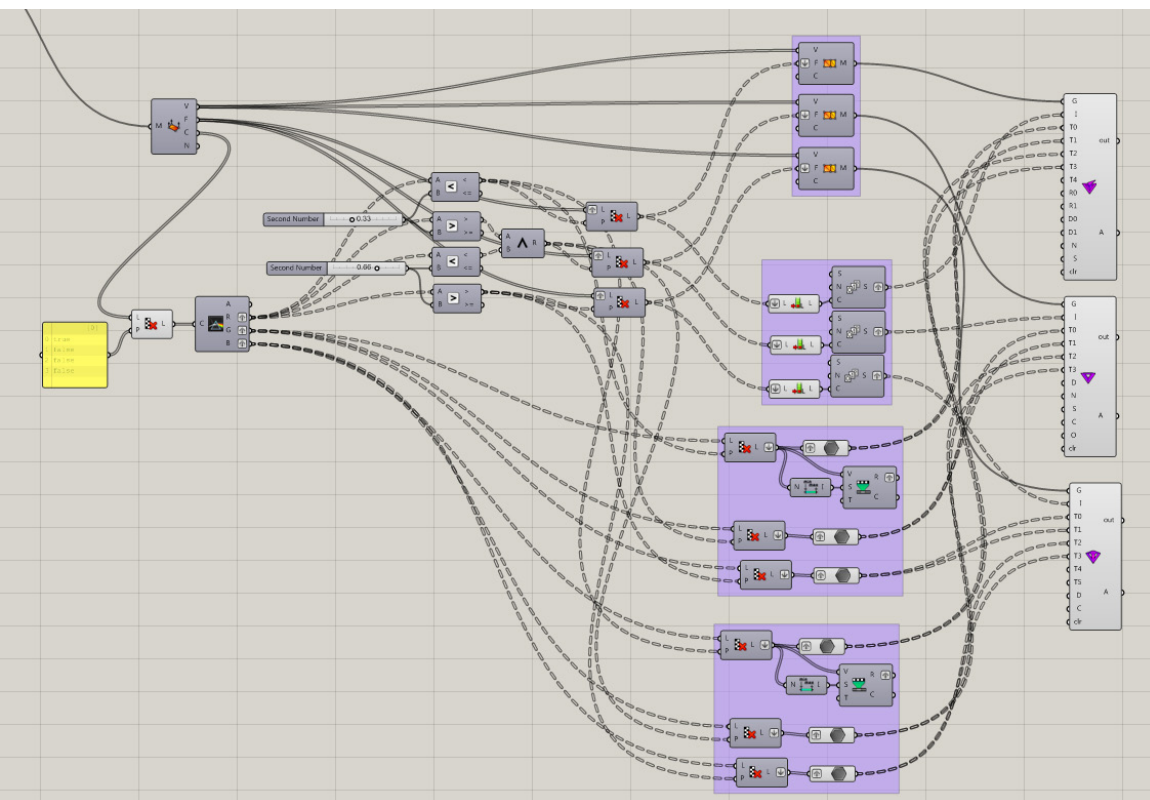


A la luz de los resultados, se demuestra que es posible originar patrones complejos a través de máscaras en GH, así como los procesos biológicos que se pretendían abstraer.

Entre las esferas resultantes se advierten patrones aparentemente aleatorios, algunos periódicos, y otros progresivos (demuestran estructuras en espiral por su relación con las celdas vecinas). Cabe recordar, que el experimento no es un estudio de patrones y que esto hubiese requerido producir y comparar un número mayor de individuos. No obstante, sería posible hacer ese estudio si se tomase la determinación mediante el incremento de la 'seed' que alimenta todo la definición, haciendo posible -y de manera muy sencilla- recuperar cualquier individuo anterior.

Como punto final para el experimento, se escogió una esfera al azar -semilla 518- para trasladar el esquema de colores en formas geométricas. Esta vez siguiendo una subdivisión de 15x30 debido a limitaciones computacionales. Para expresar la geometría se usó el add-on Mesh+ que permite la integración de efectos (diferentes manifestaciones geométricas) en base a un listado de numérico de caras. Para el ejemplo se escogieron tres de estos efectos y se asociaron al color rojo: cada uno de los tercios del dominio de 0-255 se atribuye a un efecto. El color azul se aplicó de manera directa reconstruyendo el dominio 0-255 a 0-1; sus valores intervenían en apertura y anchura. El color verde afectaba giro y altura.

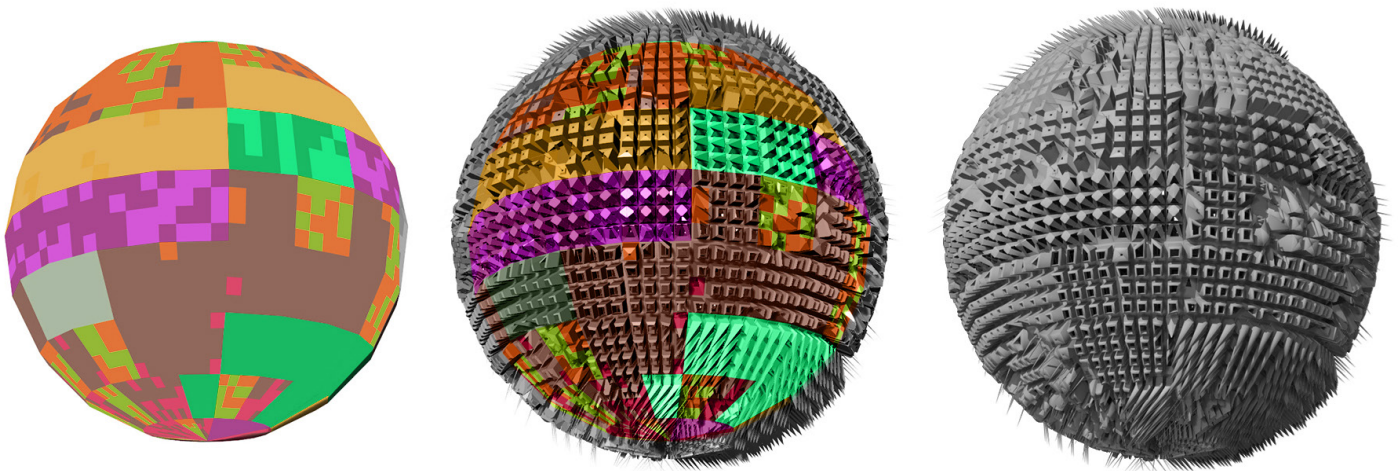
010. /// Captura de la definición en relación a la traducción del sistema e colores.



Consideraciones acerca de la traducción color-geometría:

- Se evidencia que la carga geométrica es considerablemente superior a la información por color. La definición de GH tardó 54.1 segundos en computar el fenotipo-geométrico, mientras que para representar su genotipo-color solo requería 250 milisegundos (un 0.46%). Estos datos ponen de manifiesto la utilidad de utilizar el color como transmisor tri-canal de información (RGB) y mantener su uso hasta el final de la definición para economizar al máximo la carga computacional.
- Respecto a la subdivisión y unificación de los colores se ha resuelto que el sistema usado no refleja continuidad en la información y se ve obligado a compartimentar toda la topología en celdas iguales. Este problema viene heredado por el funcionamiento de las mallas, cuyos vértices deben ser coincidentes. Esta restricción puede omitirse siempre y cuando la malla no requiera modificaciones posteriores, como puede ser una subdivisión orgánica.
- De ser necesario podría incorporarse un cuarto canal de información: la transparencia del color o canal alfa.
- La multiplicación o suma de colores puede alterar la información inicial recogida para construir los colores provocando la pérdida de relación y/o proporción. Según los requerimientos del proyecto deben evitarse dichas operaciones.
- Debido a que los colores aplicados a las mallas se asocian a los vértices y no las caras, es necesario tener constancia de si existen caras con 3 o 4 lados y subdividir la lista de colores consecuentemente para evitar redundancia o desfase en los datos.

011. /// Traducción del sistema de colores RGB en geometría 3d.



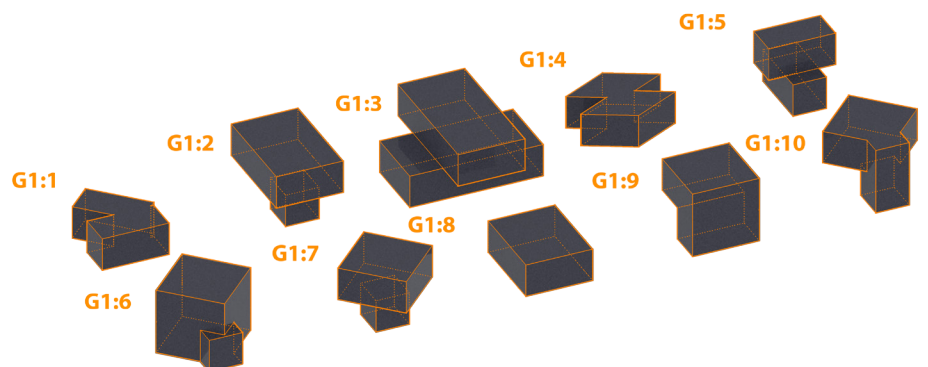
4.2. Exp. 2: Abstracción Evo-Devo en geometría

El siguiente experimento presenta dos de las secuencias desarrolladas en la Architectural Association de Londres (AA) e incluye algunas de las partes allí realizadas. El doctorando participó como “Guest PhD” (doctorando invitado) en el seminario de ‘Emergence and Design Seminar Course’ dentro del máster de ‘Emergent Technologies’ dirigido por Mike Weinstock y desarrollado junto a los doctorandos: Mohammed Makki y Ali Farzaneh. Sobre los algoritmos evolutivos y su traslación conceptual, Mike Weinstock hace énfasis que la aplicación de procesos Evo-Devo no es una metáfora de la evolución, sino una abstracción. Como tal, debe ser correctamente transformada y adaptada para que sus objetivos (ahora distintos) se den con la misma eficiencia. Recalca que este tipo de procesos que manejan grandes cantidades de individuos (poblaciones) tiene particular potencial en el ámbito urbanístico, donde un número elevado de agentes deben trabajar entre sí y adecuarse a un entorno que puede emitir una capa de información que sirva de patrón.

La primera y segunda secuencia se basan en la manipulación de formas geométricas primitivas (cubos, pirámides, esferas...) y sirven para introducir los conceptos biológicos así como la metodología. Los genes a su vez también son una lista de modificadores simples creados al azar aunque con el propósito de crear variedad. Los objetivos -criterios de adaptabilidad- tratan sobre maximizar o minimizar área, volumen, superficie y altura.

Se hace mención al siguiente vocabulario: generaciones, genomas, genes, poblaciones, estrategia cruce, estrategia selectiva, entorno, mutaciones, regulación de genes, y reserva genética (‘gene pool’). Todos estos términos han sido mencionados con anterioridad en la tesis (cap. 3.2) o lo serán en el próximo capítulo durante la explicación de la secuencia 4 dentro del marco del seminario.

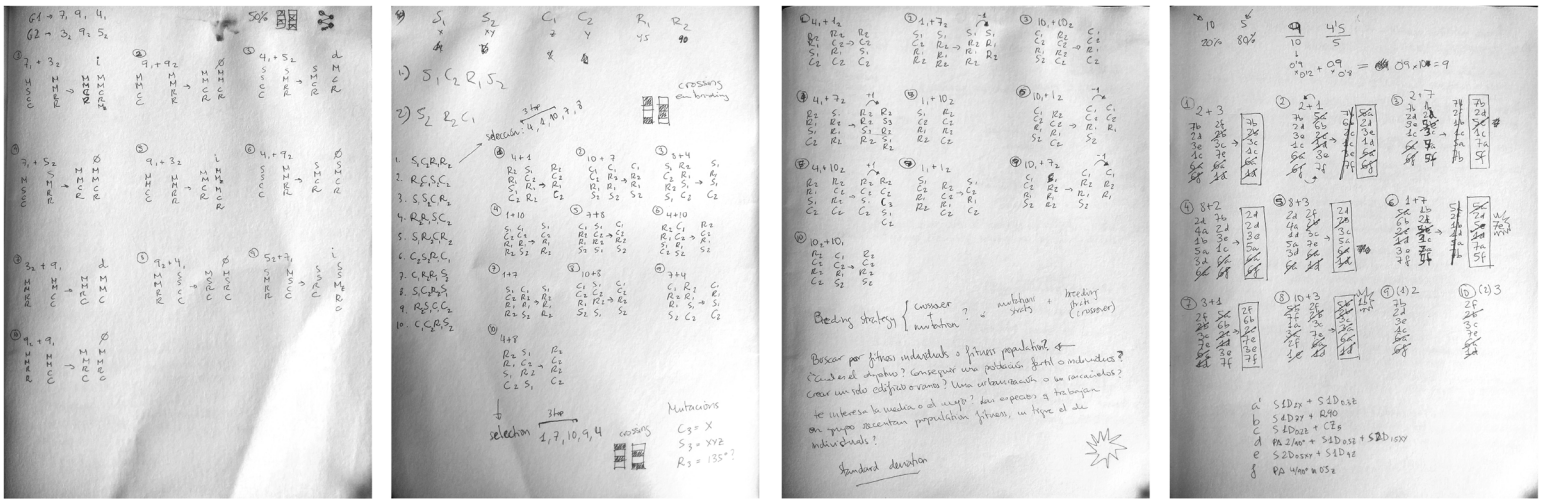
012. /// Generación 1 y 3 de la Secuencia 1.



A destacar de estas dos primeras secuencias es que todos los procesos de reproducción (selección y cruce) entre individuos se realizan a mano. El proceso, aunque muy didáctico, se vuelve lentísimo aun a pesar de calcular unas pocas generaciones (3 generaciones de 10 individuos cada una de

ellas, frente a los cientos que supondrán los experimentos posteriores). Los fenotipos de esos individuos se modelan en 3D uno por uno leyendo los genomas resultantes.

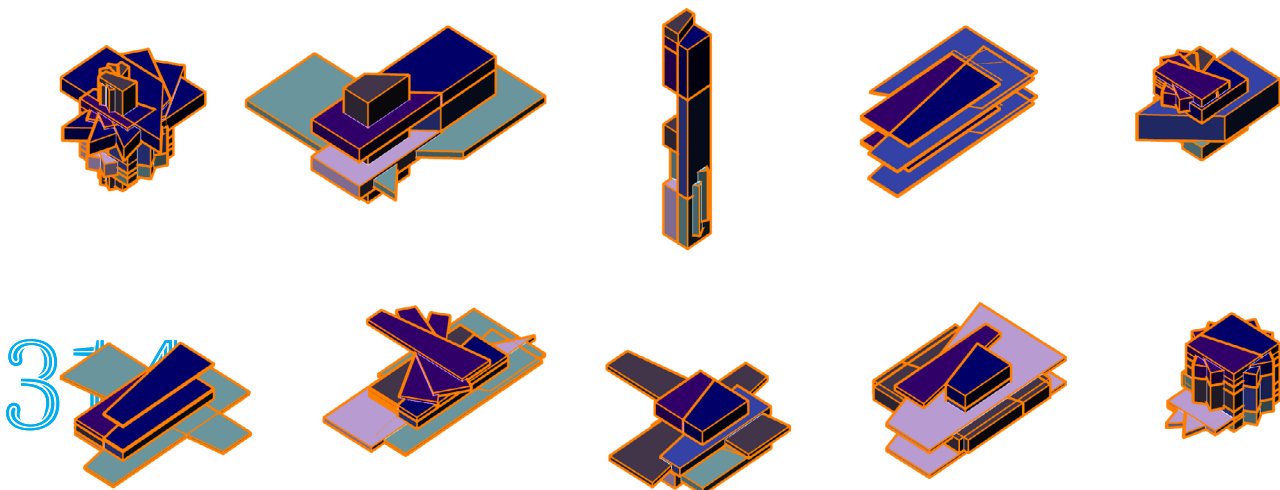
013. /// 'Crossover manual'. Cuaderno de Diego Navarro, Enero de 2015.



Sin embargo, el proceso manual de recombinación permite una analogía mucho más próxima a la vertiente biológica que los algoritmos. El orden de los genes dentro del genoma altera con mayor intensidad el resultado final, las reglas de mutaciones pueden ser mucho más complejas (duplicación de genes, eliminación, sustitución, inserción...), así como las reglas de selección entre los individuos que permitan patrones asimétricos y por lo tanto condicionadores del resultado.

La ejecución manual también permite abordar dos factores vitales en esta tesis. El primero, que el orden de los genes afecte a la expresividad -el fenotipo del genoma. Carencia que menciona David Rutten durante la descripción de los algoritmos digitales evolutivos (cap. 3.3.1) y que es abordada en el experimento número 5 de esta tesis. El segundo, la incorporación del 'body plan' (cap. 3.2.2) que multiplica exponencialmente la variedad producida por la recombinación de los genes. Los resultados de la secuencia 2 del seminario demuestran esta mayor diversidad y complejidad, convirtiendo los edificios en verdaderos seres multicelulares.

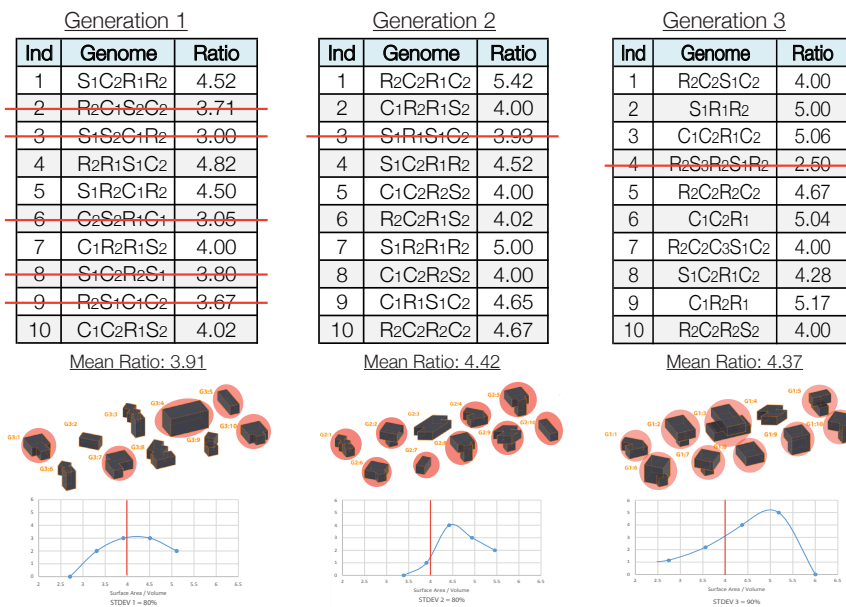
014. /// Secuencia 2 (con 'body plan').

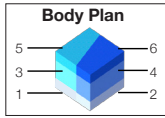


Además del obvio desarrollo evolutivo de las geometrías, se realizan experimentos de modificación dentro de los ejercicios para establecer comparaciones y extraer conclusiones. Por la cantidad de elementos que participan en este proceso las comparaciones solo pueden llevarse a cabo cuando el cambio ha sido muy específico. Alterar varios parámetros a la vez llevará a conclusiones equivocadas debido a la imprevisibilidad de su causa (el más pequeño cambio puede resultar en alteraciones colosales para el fenotipo o el desarrollo de la población). Las conclusiones de estos ejercicios son las deducciones de un pensamiento crítico en referencia a la metodología más allá de los resultados arquitectónicamente válidos, madurar un discurso derivado de la evolución pero adaptado específicamente a la arquitectura es uno de los objetivos a alcanzar.

El requerimiento de un control sobre la población, sobre el proceso evolutivo y su configuración necesita una parte analítica de los datos que cobra especial interés debido a la masividad de la información. Las secuencias 1 y 2 no supera los 30 individuos, pero las sucesivas alcanzarán miles de individuos donde no hay un criterio claro de selección (en los últimos experimentos más de 160.000). Es fundamental pues la evaluación de las poblaciones y su progreso a través de las generaciones. Las gráficas obtenidas arrojan luz sobre las tendencias del proceso evolutivo: si hay convergencia, si es extensiva, si mejora la población o prioriza los individuos, etc.

015. /// Capturas de la presentación de la secuencia 2.





Fitness Criteria

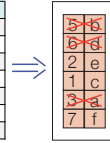
1. Larger Volume : Smaller Footprint ———— 25%
2. Larger Footprint : Smaller Solar-Exposed S.A. ———— 75%

Gene Pool

Gene	Transformation
A	Scale 1D X axis (i=2) + Scale 1D Z axis (i=0.3)
B	Scale 1D Y axis (i=3) + Rotation (i=90)
C	Scale 1D Z axis (i=0.2) + Copy Z axis (i=0.5)
D	P. Ar. 90 (2 items) + Scale 1D Z axis (i=0.5) + Scale 2D X/Y axis (i=1.5)
E	Scale 2D X/Y axis (i=0.5) + Scale 1D Z axis (i=4)
F	P. Ar. 90 (i=30-4 items) + Move in Z axis (i=0.05)

Gene Regulation

Body Section	Activated Genes
1	A, B, C
2	D, E, F
3	C, F, E
4	D, B, A
5	F, A, D
6	C, B, E
7 (full Body)	A, B, C, D, E, F



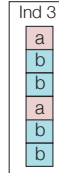
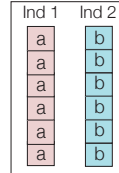
Breeding Strategy

- To Generate diversity by increasing the breeding frequency of the least fit individuals of the population, as well as including the fittest individuals in the breeding process.

Kill Strategy

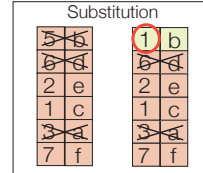
- Carry the two fittest individuals to each subsequent generation and eliminate the remaining individuals.

Crossover Strategy



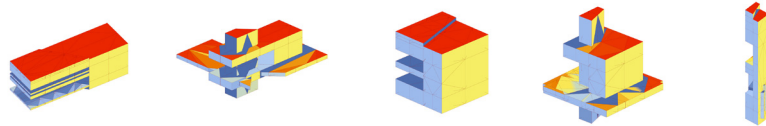
Mutation Strategy

(Rate: 0.2)



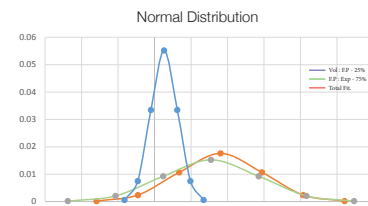
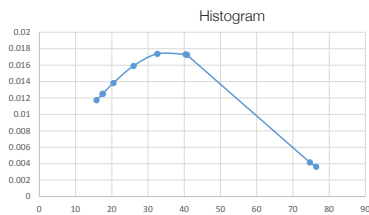
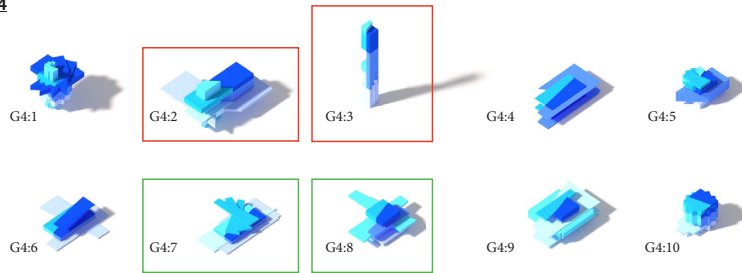
Generation 4

Ind	Genome						Fitness Factors				Final Fitness
	Vo.F.P	25%	F.P.S.R	75%	1.42	1.00					
1	5 a	6 b	2 d	1 d	3 e	7 f	453.33	25.00	1.42	1.00	26.00
2	7 b	2 d	3 e	1 c	6 e	6 f	104.17	6.43	5.15	9.33	15.76
3	2 f	2 b	3 c	7 e	6 a	1 d	51.10	3.61	7.20	13.91	17.51
4	4 d	5 b	3 b	2 f	7 a	7 c	2.11	1.00	18.60	39.36	40.36
5	1 c	3 c	2 a	5 f	4 b	7 b	29.82	2.47	14.45	30.10	32.57
6	7 a	6 c	5 e	4 f	3 d	2 d	7.26	1.27	18.64	39.45	40.73
7	1 b	2 d	5 e	3 c	7 a	5 f	3.55	1.08	33.93	73.59	74.67
8	2 d	4 a	1 b	5 a	3 d	6 a	10.12	1.43	34.56	75.00	76.43
9	1 b	2 f	1 b	1 c	5 a	7 b	58.82	4.02	8.33	16.43	20.45
10	5 b	7 f	1 a	3 a	2 f	1 e	99.45	6.18	6.01	11.25	17.43

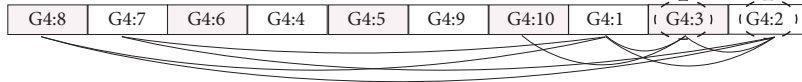


Generation 4

Ind	Final Fitness
1	26.00
2	15.76
3	17.51
4	40.36
5	32.57
6	40.73
7	74.67
8	76.43
9	20.45
10	17.43



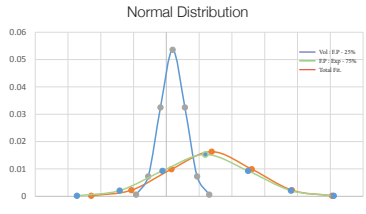
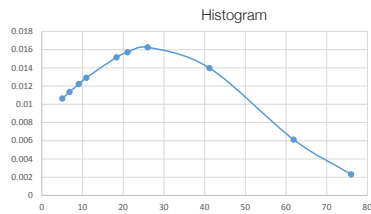
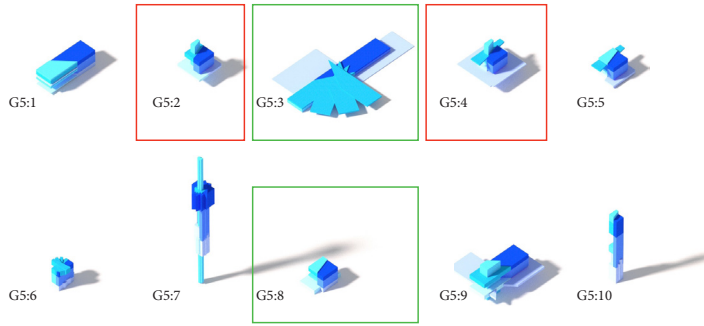
Generation 5 - Breeding Strategy



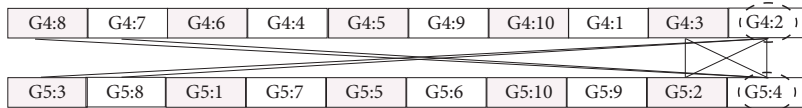
Ind	Genome						Fitness Factors				Final Fitness
	Vo:F.P	25%	F.P:S.R	75%							
1	7 b	2 b	3 c	1 c	6 a	1 d	14.50	1.13	32.38	40.04	41.16
2	5 a	2 d	3 e	1 d	6 a	6 f	124.43	2.23	3.10	4.56	6.79
3	7 b	2 d	5 c	1 c	7 a	5 f	1.89	1.00	61.24	75.00	76.00
4	2 d	2 d	3 e	5 a	6 a	6 f	134.54	2.33	1.56	2.70	5.02
5	2 d	2 b	3 c	5 a	6 a	1 d	22.04	1.20	15.72	19.85	21.05
6	5 a	2 d	7 e	1 d	7 a	5 f	10.06	1.08	13.59	17.27	18.35
7	2 f	6 b	2 c	7 e	3 a	7 d	2400.00	25.00	0.16	1.00	26.00
8	1 b	2 b	3 c	3 a	6 a	1 d	8.65	1.07	49.51	60.79	61.86
9	7 b	2 d	3 e	1 c	6 a	6 f	104.17	2.02	5.15	7.05	9.07
10	2 f	2 b	3 c	7 e	6 a	1 d	51.10	1.49	7.12	9.43	10.92

Generation 5

Ind	Final Fitness
1	41.16
2	6.79
3	76.00
4	5.02
5	21.05
6	18.35
7	26.00
8	61.86
9	9.07
10	10.92



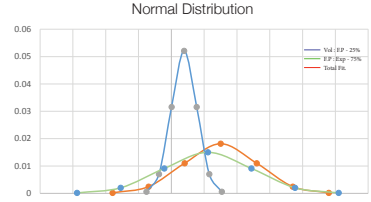
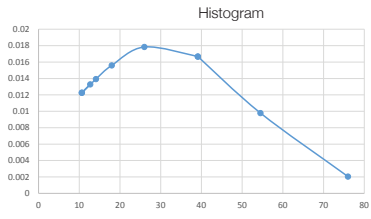
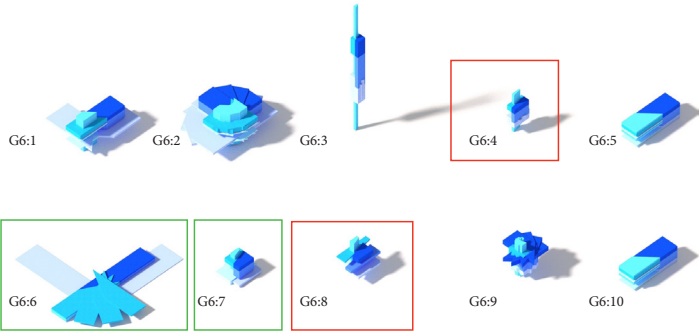
Generation 6 - Breeding Strategy



Ind	Genome						Fitness Factors				Final Fitness
	Vo:F.P	25%	F.P:S.R	75%							
1	7 b	2 d	3 e	1 c	6 a	6 f	90.36	6.485079	24.75	6.217553	12.70
2	7 b	2 d	3 e	1 c	6 a	7 f	224.17	14.751249	0.79	3.22766	17.98
3	2 f	2 d	3 e	7 a	6 a	6 f	390.08	25	235.24	1	26.00
4	2 f	2 d	3 e	7 a	7 a	5 f	117.02	8.131965	3.56	2.476445	10.61
5	7 b	2 b	3 c	1 c	6 a	1 d	14.09	1.773283	8.83	37.345491	39.12
6	7 b	2 d	5 e	1 c	7 a	5 f	1.57	1	3.79	75	76.00
7	1 b	2 d	3 e	3 c	6 a	6 f	8.13	1.405066	0.96	53.092043	54.50
8	2 d	4 a	3 e	5 a	6 a	6 f	78.21	5.734331	34.71	4.899501	10.63
9	5 a	6 b	2 c	1 d	3 e	7 f	179.41	11.985991	4.34	2.097961	14.08
10	7 b	2 b	3 c	1 c	6 a	1 d	14.09	1.773283	4.91	37.345491	39.12

Generation 6

Ind	Final Fitness
1	12.70
2	17.98
3	26.00
4	10.61
5	39.12
6	76.00
7	54.50
8	10.63
9	14.08
10	39.12



4th Generation

5th Generation

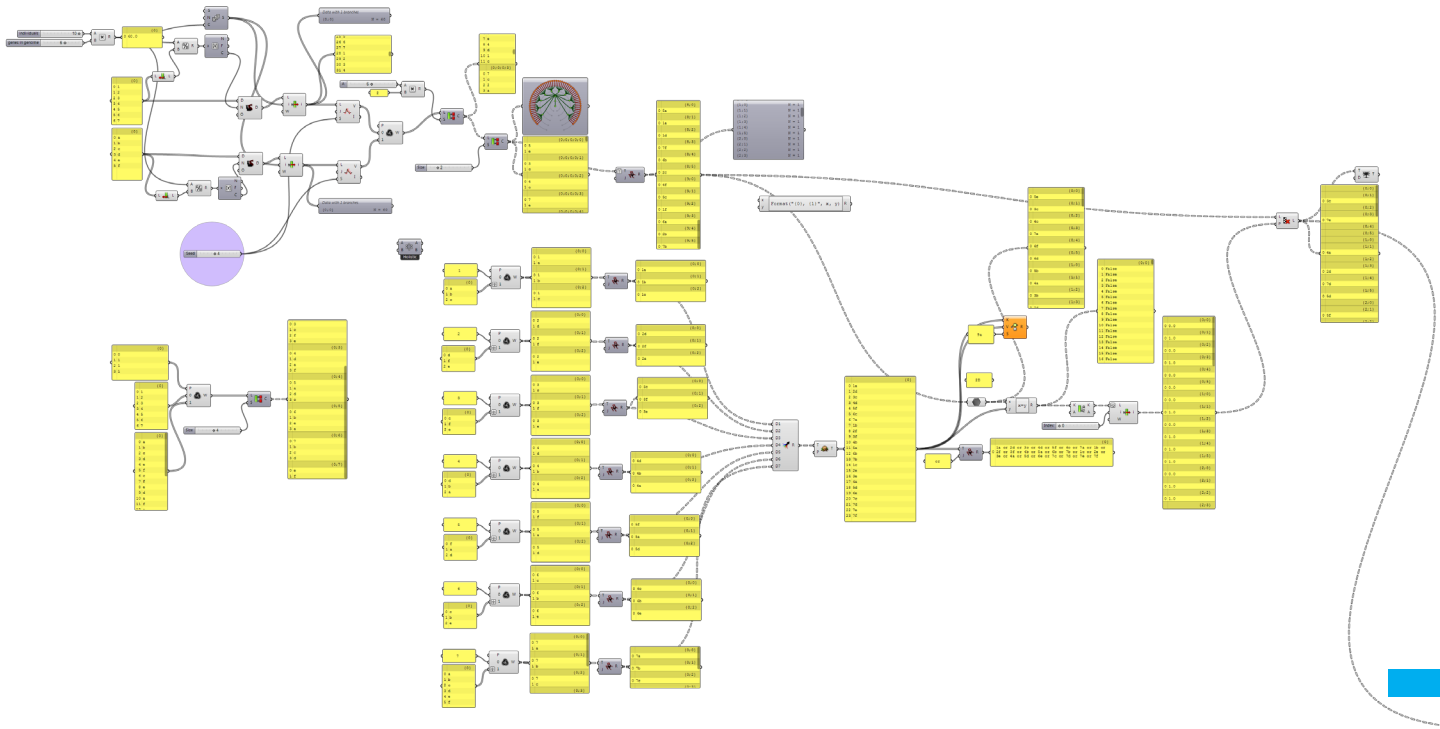
6th Generation

Generation 4-6

A pesar de que los cruces se hicieron de manera manual, se comenzó a trabajar en una definición de GH que mimetizarse los procesos de emparejamiento y cruce, mucho más fiel al carácter Evo-Devo, y que plantea los mencionados beneficios en lo referente a la gestión de genes, ‘body plan’, ‘crossover’, elitismo y probabilidad de mutación.

Este tipo de ejercicio implica un proceder con más similitudes respecto a la programación ordinaria y el procesamiento de datos, alejándose de los típicos ejercicios geométricos de GH. Inicialmente se consiguió generar poblaciones aleatorias para la primera generación teniendo en cuenta las reglas que se aplicaban a las “body parts” y realizar emparejamientos con ellas. También se logró con éxito la creación de genes y su combinación en un genoma, siendo la próxima incógnita la reiteración de este proceso para todos los individuos a lo largo del proceso evolutivo.

016. /// Captura de GH para la simulación del 'crossover'.



4.3. Exp. 3: Evolución de tejidos urbanos

El experimento número 3 continúa el trabajo desarrollado en el seminario de Emergencia en la AA (Architectural Association). Las secuencias 3 y 4 incorporan los estudios anteriores a tejidos urbanos, dotando al ejercicio de un innegable valor arquitectónico, mucho más explícito que sus antecesores. El enunciado original plantea la evolución de un bloque tipo perteneciente a algunos de los modelos urbanos más icónicos:

- Eixample, Ildefons Cerdà, 1859
- Ville Contemporaine, Le Corbusier, 1922
- Carl Legien Estate, Bruno Taut, 1928
- Beijing, Hutong courtyard houses, s. XV
- Manhattan Comissioner's Plan, 1811
- Kowloon Walled City, 1989
- Shibam, sXVI
- Superquadra, Lucio Costa, 1957

El enunciado se acompaña de una conferencia a cargo de Weinstock donde se mencionan las siguientes referencias urbanísticas donde no siempre la figura del arquitecto es el personaje visionario: Sant Elia, Ludwig Hilberseimer, Hugh Ferriss, H. G. Wells⁸²⁸, David Butler⁸²⁹, Le Corbusier⁸³⁰, Constant Nieuwenhuys⁸³¹, Paul Rudolph⁸³², Youiji Watanabe⁸³³, Kenzo Tange⁸³⁴, Kisho Kuorkawa⁸³⁵, y en el caso de Walled City, una sucesión de etapas históricas y autoapropiación de sus habitantes en un fantástico ejemplo de 'swarm intelligence'⁸³⁶. Al doctorando le fue asignado el modelo del 'Eixample' sin tener en cuenta que residía allí. Por supuesto, esto facilitó la profundidad analítica e histórica del ejercicio.

⁸²⁸ Wells, H. G. *The Shape of Things to Come*. Nueva York: Macmillan Company, 1933.

⁸²⁹ Butler, David. *Just Imagine*. Estados Unidos, 1930. Película.

⁸³⁰ Corbusier, Le. *La Ville Radieuse; Éléments D'une Doctrine D'urbanisme Pour L'équipement De La Civilisation Machiniste: Paris, Genève, Rio De Janeiro*. Paris: Éditions Vincent, Fréal, 1964.

Jenkins, David, y Peter Cook. *L'Unité D'habitation: Marseilles: Le Corbusier*. Londres: Phaidon Press, 1993.

⁸³¹ Nieuwenhuys, Constant. "New Babylon – A Nomadic City." Haags: Gemeetenmuseum, 1974.

⁸³² Rudolph, Paul. *Centro de Gobierno del Condado de Orange*. Goshen, USA. 1967. Proyecto.

⁸³³ Watababe, Youiji. *New Sky Building No. 3*. Tokyo, Japón. 1970. Proyecto.

⁸³⁴ Tange, Kenzo. *Tokyobay*. Tokyo, Japón. 1960. Proyecto.

⁸³⁵ Kuorkawa, Kisho. *Capsule Tower*. Tokyo, Japón. 1970. Proyecto.

⁸³⁶ Kowloon Walled City, Hong Kong, Song Dynasty(960-1279)-1994. Este asentamiento sufrió un proceso de autoapropiación tras el rendimiento Japonés (2a Guerra Mundial). En los años 1950s las triadas ganaron dominio del lugar y no fueron reducidas hasta 1983. La mayoría de los servicios (doctores, educación, instalaciones...) continuaron sin regulación hasta su demolición y transformación en parque en 1994.

Evolucionar un bloque implica un trabajo de análisis y diseño para desmembrar el bloque en sus características principales, sus genes primigenios, para luego permitir la recombinación o modificación de los mismos. Un ejercicio de simplificación geométrica cuyas variables o parámetros que conforman el bloque son susceptibles de cambio en pos de determinados objetivos: densidad, campo de visión, espacio libre, orientación, soleamiento, huella, conectividad...

La última secuencia del seminario motivará un 'abstract' para el congreso de eCAADe 2015⁸³⁷ que fue aceptado y presentado el 16 de Septiembre de 2015 en coautoría de Mohammed Makki y Ali Farzaneh y dentro del marco de Generative Design - Biological⁸³⁸. A continuación se hará un análisis más exhaustivo del ejercicio original, mejorando la definición (archivo de Grasshopper) y profundizando en los resultados y conclusiones.

'L'Eixample' de Cerdà

Previamente a la formulación del experimento se realiza un estudio del plan urbanístico respondiendo al enunciado planteado originalmente en el seminario de Emergencia. Se resume el contexto del plan de 'L'Eixample' para facilitar la comprensión del experimento a un lector ajeno a la obra.

Barcelona es conocida por su buen funcionamiento como ciudad de uso mixto y por ser una de las más densas de Europa⁸³⁹, siendo el 'Eixample' el barrio con mayor densidad de todos. El 'Eixample' es un plan urbano proyectado para el crecimiento de la ciudad durante la segunda mitad del s. XIX, y es fácilmente reconocible por sus manzanas de ocho lados (cuadrados con chaflanes) y su patrón repetitivo en forma de retícula. Incluso hoy en día, continúa siendo objeto de estudio en teoría del urbanismo moderno en escuelas de arquitectura alrededor de todo el mundo como un plan visionario que se anticipó a las necesidades de la ciudad. Con todo, Barcelona como ciudad continúa reestructurándose y solventando diferentes frentes. En la actualidad, hay tres temas principales que están siendo abordados:

- Sus límites y relación con la geografía (sierra Cornella⁸⁴⁰, río Besós, río Llobregat).
- Cambios jerárquicos y relacionales en áreas específicas (como la

⁸³⁷ AA.VV. *Real Time*, 3rd eCAADe Conference. Wien, Septiembre, 2015. pp. 563-571.

⁸³⁸ Makki, Mohammed, Ali Farzaneh, Diego Navarro. "The Evolutionary Adaptation of Urban Tissues through Computational Analysis", AA.VV. *Real Time, Extending the reach of computation*. 33rd eCAADe Conference, 2015, volume 2, p.563.

⁸³⁹ Ajuntament de Barcelona. "Anuari Estadístic de la Ciutat de Barcelona, Densitat de població segons 2014." Consultada 11 de mayo, 2015. <http://www.bcn.cat/estadistica/catala/dades/anuari/cap02/C020104.htm>
Eixample 35.525 hab/km²
Barcelona 15.749 hab/km²

⁸⁴⁰ Ajuntament de Barcelona. "Concurso de Les Portes de Collserola." Consultada 11 de mayo, 2015. <http://ajuntament.barcelona.cat/portescollserola/es/>

Diagonal⁸⁴¹, les Glòries⁸⁴², la Sagrera⁸⁴³...)

- Reestructuración del 'Eixample' -el cual será abordado en esta parte de la tesis-

El uso del ensanche de una célula repetitiva y expansiva sin límites lo convierte en un modelo fértil de investigación donde los individuos (las manzanas) pueden crecer heterogéneamente mientras mantienen la estructura de la ciudad casi intacta.

Durante el s. XIX la población de Barcelona crecerá de 115k a 187k habitantes. Crecimiento demográfico, densidad de edificios, condiciones sanitarias insalubres y enfermedades dispararan los ratios de mortalidad dentro de los muros⁸⁴⁴. La situación requerirá la aparición de la ciudad moderna, expandiendo a Barcelona más allá de las murallas. En 1854 la demolición del muro será finalmente aceptada. El 9 de Julio de 1869 será dada la orden de ejecutar el plan de Cerdà, no sin dificultades políticas⁸⁴⁵ y cambios en el proyecto original: ordenanzas y pensamiento político casi no tendrán efecto. Cerdà basará su nuevo plan en tres aspectos:

1. Sanidad⁸⁴⁶. El uso de la estadísticas⁸⁴⁷, un extenso trabajo de campo en Barcelona, y la investigación de la estructura de otras ciudades (San Petersburgo, Boston, Buenos Aires, Nueva York, Edimburgo...) le ayudarán a tomar decisiones propositivas en referencia a la orientación, la climatología y la exposición al sol.
2. Circulación⁸⁴⁸. Una estructura altamente jerarquizada de calles anchas para "máquinas de fuego" que igualará en superficie a la acera del peatón. La rejilla rectangular se conectará a través de intersecciones con chaflanes que resolverán el giro de los vehículos y la orientación de las esquinas de los edificios en un mismo gesto.
3. Social. La idea de la ciudad infinita y homogénea que cubre todo el territorio donde todo y todos tienen su lugar con equidad.

Acorde con el plan original de Cerdà, Barcelona debía ser menos densa, de hecho, su propósito era el de construir solamente dos lados de la manzana, que suponían el 50% del territorio, siempre teniendo en mente los problemas sanitarios previos de la ciudad antigua. El plan configura diferentes tipos de bloques que se combinan en grupos para generar anchos campos de visión

⁸⁴¹ Baquero, Camilo. "El tranvía de la discordia." *El País*. Consultada 30 de agosto, 2015. http://ccaa.elpais.com/ccaa/2015/08/08/catalunya/1439062046_781709.html

⁸⁴² Ajuntament de Barcelona. "Les Gloriès." Consultado 14 de febrero, 2016. http://ajuntament.barcelona.cat/glories/es/la-transformacio-de-glories-en-marxa/concurs_explicacio/

⁸⁴³ Ajuntament de Barcelona. "La Sagrera." Consultado 14 de febrero, 2016. <http://ajuntament.barcelona.cat/ecologiaurbana/es/con-quien-lo-hacemos/participacion-ciudadana/sagrera>

⁸⁴⁴ La media de edad para fallecidos es de 38,3 años en la gente rica y 19,7 años para los pobres.

⁸⁴⁵ El plan de Cerdà será aprobado por decreto real, opuestamente al concurso público diseñado por el gobierno de Barcelona y ganado por Antonio Rovira y Trias.

⁸⁴⁶ Cerdà, Ildefons. *Monografía estadística de la clase obrera*. Madrid, 1856.

⁸⁴⁷ Figuerola, Laureà. *Estadística De Barcelona En 1849*. Madrid: Instituto De Estudios Fiscales, 1968.

⁸⁴⁸ Cerdà, Ildefons. *Necesidades de la circulación y de los vecinos de las calles con respecto a la vía pública urbana, y manera de satisfacerlas*, 1863.

y áreas verdes⁸⁴⁹. La orientación y relación de las manzanas se convertirá en uno de los puntos principales del experimento en una búsqueda por la interrelación de los individuos de la población (bloques/manzanas).

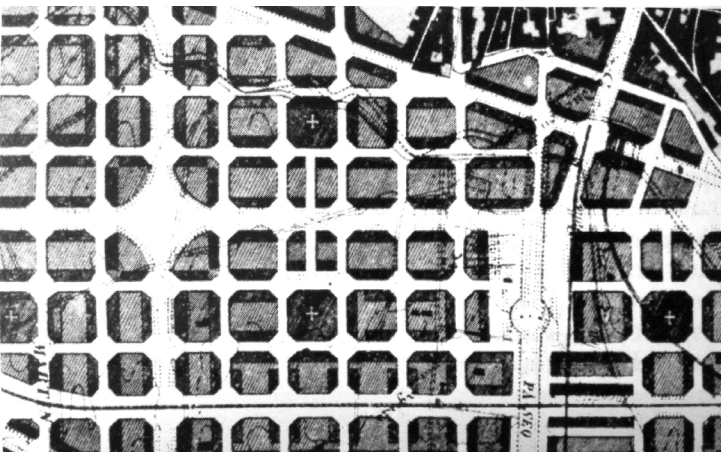
017. /// Plan Cerdà original, áreas verdes VS edificación. Busquets, 2004. p. 129. La proporción de espacios verdes era superior a la de área construida.



Debido a la distancia del centro de la ciudad antigua y la falta de infraestructuras, la expansión será lenta durante los primeros años. En 1863 Cerdà mismo cambiará el plan para permitir más área construida. En 1870 la construcción aumentará considerablemente y será vista como una oportunidad de inversión. Durante los próximos años se permitirán más área construida y más alturas en los edificios lo que conducirá inevitablemente a bloques de cuatro lados, patios interiores ocupados

en planta baja, y áticos y sobre-áticos⁸⁵⁰. Todos estos factores estrechamente relacionados con la especulación se traducirán en una reducción del área verde y la pérdida de la calidad de vida.

018. /// Fragmento del Plan Cerdà, tipologías y orientaciones. Busquets, 2004. p. 129. Los lados de las manzanas se orientaban para crear nuevos espacios a mayor escala.



En el año 2014 el ratio de área verde/habitante de Barcelona es de 6,57m², siendo 15m²/hab. la cantidad recomendada por la WHO (World Health Organization)⁸⁵¹. Este dato evidencia una urbe sobre densificada donde el vehículo motorizado es el personaje principal, y explica la necesidad de reestructurar el 'Eixample' para ganar nuevos espacios destinados al peatón.

Una de las estrategias para rescatar la idea de las organizaciones de bloques es las 'superilles' (supermanzanas). La idea de la supermanzana establece conexiones y relaciones en un punto intermedio entre el barrio y la manzana⁸⁵². Estas supermanzanas permiten revalorizar los espacios

⁸⁴⁹ Busquets, Joan. *Barcelona, la construcción urbanística de una ciudad compacta*. Ediciones del Serbal, Barcelona, 2004.

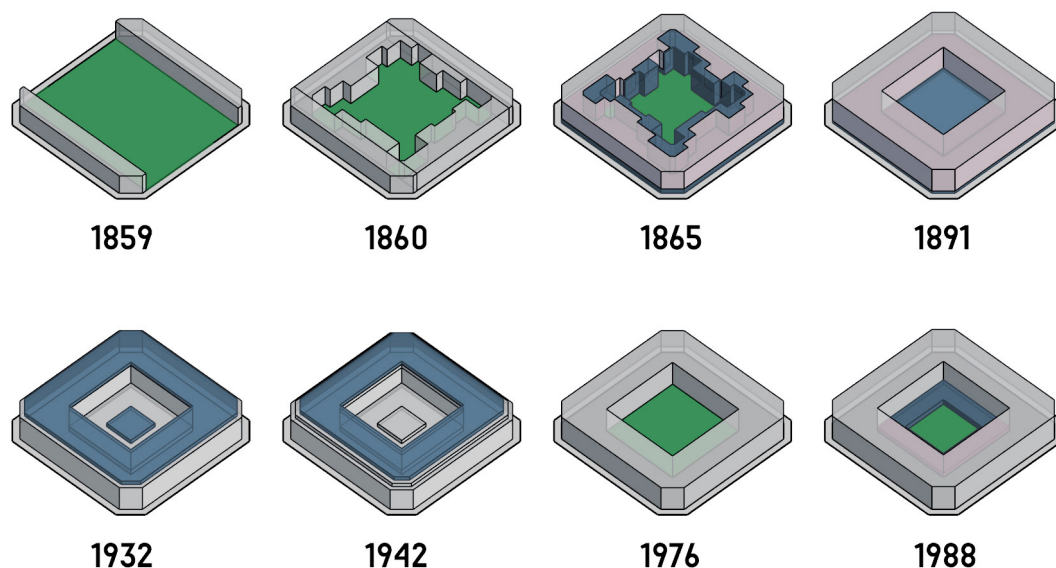
⁸⁵⁰ Any Cerdà. "Nace el Eixample." Consultado 15 de julio, 2015. <http://www.anycerda.org/web/es/any-cerda/fa-150-anys/neix>

⁸⁵¹ Arroyo, Francesc. "Barcelona suspende en zonas verdes," *El País*. Consultado 30 de octubre, 2009. http://elpais.com/diario/2009/10/24/catalunya/1256346439_850215.html

⁸⁵² Originalmente, Cerdà ya pensó en "unidades vecinales" que consistían en agrupaciones de 5x5 bloques y que influenciarían en la jerarquía del tráfico. Busquets, Joan. *Barcelona, la construcción urbanística de una ciudad compacta*. Ediciones del Serbal, Barcelona, 2004.

entre edificios: movilidad sostenible, rehabilitación del espacio público, biodiversidad y áreas verdes, accesibilidad, cohesión social, y autosuficiencia energética⁸⁵³. El gobierno catalán ya ha iniciado varios procesos de diálogo con los vecinos y convocado concursos alrededor de esta idea⁸⁵⁴. Además, la ciudad recupera lentamente los espacios interiores como áreas verdes a través de proyectos individuales normalmente relacionados a un equipamiento que aumente el valor de dichos espacios⁸⁵⁵ ⁸⁵⁶. Sin embargo, debido a la densidad existente en Barcelona, los intentos de reestructurar el 'Eixample' están notablemente constreñidos a cambios menores sobre la condición urbana existente.

019. /// Evolución del bloque de 'l'Eixample'. Diagrama de Diego Navarro, en Makki, 2015. p.565. En las últimas décadas se procura la recuperación del espacio verde absorbido por el área construida.



Cabe mencionar que el plan Cerdà ya consideraba una proto versión de 'superilles', mediante la jerarquización de la sección de los viales y la orientación y relación de los patios, aspecto protagonista del experimento llevado a cabo. A resaltar también que el experimento ejecutado no pretende reestructurar la ciudad actual, sino aplicar un modelo evolutivo alternativo que incorpore los objetivos de diseño del plan original de Cerdà y que a su vez tenga en cuenta la importancia de la densidad de población actual.

⁸⁵³ *Superilles de la Maternitat i Sant Ramon*, Ajuntament de Barcelona. Barcelona, 2015. Panfleto informativo.

⁸⁵⁴ Archallenge. "Concurso Súper Manzanas 'Eixample' Cerdà" Consultado 14 de febrero, 2016. <http://www.archallenge.com/supermanzanas-eixample-cerda.php>

⁸⁵⁵ En 1988 una ordenanza del gobierno prohibió la ocupación de los patios de interior de manzana.

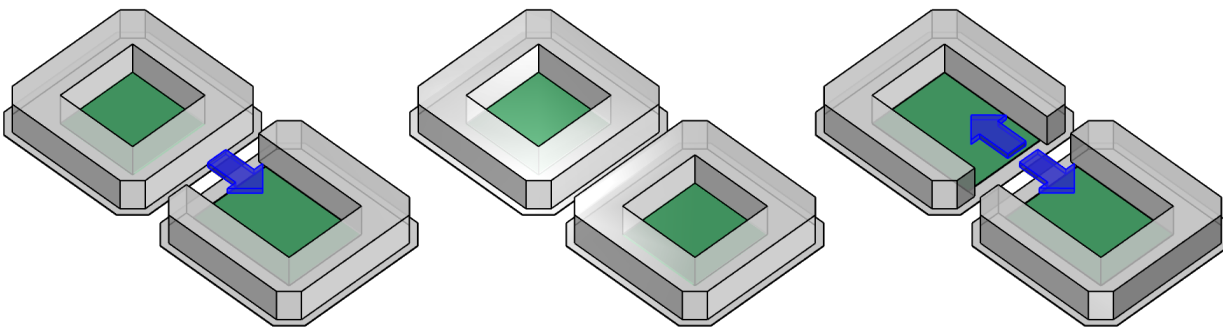
⁸⁵⁶ Recuperación de espacios públicos en el ensanche, RCR, Biblioteca San Antoni-Joan Oliver, 2002

Aproximación y configuración

Se procede a la creación de una definición en GH que simule la manzana típica del ensanche considerando sus posibilidades paramétricas. Estas, cuanto menos, deben ser capaces de abarcar desde el modelo de Cerdà hasta la Barcelona actual. Se recurrió a los datos históricos mencionados en la primera parte de investigación y a la evolución temporal de la manzana para marcar referencias pero en la mayoría de los casos se permite traspasar esos límites con la intención de albergar diferentes tipologías inexistentes, aumentando la flexibilidad y las posibilidades del bloque.

Se evaluará del ejercicio práctico los criterios de alta densidad, el ratio de los patios interiores, y la conectividad de estos con los bloques vecinos. Este último factor de adaptabilidad implica el mencionado uso de las 'superillas' y por tanto la necesidad de trabajar en grupos bloques.

020. /// Relaciones posibles entre los laterales de los bloques. Diagrama de Diego Navarro, en Makki, 2015. p.567. De izquierda a derecha las situaciones que se evalúan de peor a mejor respectivamente. Se busca evitar 'culs de sac' y potenciar la comunicación de los patios. Los lados enfrentados se consideran neutrales.



Parámetros del experimento

Meta.

- Generar un tejido urbano que aluda la actual población de Barcelona manteniendo los objetivos del proyecto original de Ildefons Cerdà de incorporar mayores espacios verdes en la ciudad.

Objetivo (a maximizar).

- Densidad de población.
- Conectividad entre los bloques.
- Área del patio interior.

Fenotipo:

- Superbloque de 4x4 (16 bloques individuales).

Reserva genética:

- Número de edificios (escaleras) en el bloque.
- Tamaño del área edificable.
- Tamaño del patio común.
- Tamaño de los patios interiores.
- Número de pisos por escalera.
- Número de lados en un bloque.

Criterios de adaptación:

- Densidad.
- Conectividad.
- Patio/Ratio de densidad.

En lo que se refiere a la configuración del algoritmo evolutivo, un elitismo del 50% asegura un alto porcentaje de individuos con alto valor que persisten en la creación de nuevos individuos. Por otro lado, los índices de mutabilidad -precavidos pero existentes- y un ratio de cruce elevado aseguran la variedad y flexibilidad de la población. Si bien estos parámetros son bastante próximos al quehacer evolutivo natural, han sido ajustados en los sucesivos experimentos con el fin de obtener mejores resultados y entender su área de influencia durante los mismos.

Idealmente, el algoritmo ha de mantener un balance entre el carácter explorativo, adecuando mutaciones y cruces que permitan una población diversa de posibles soluciones; y el exigente, en un intento de buscar los valores máximos en el menor tiempo posible. Para garantizar esos aspectos, la configuración de los parámetros por defecto de Octopus son las siguientes:

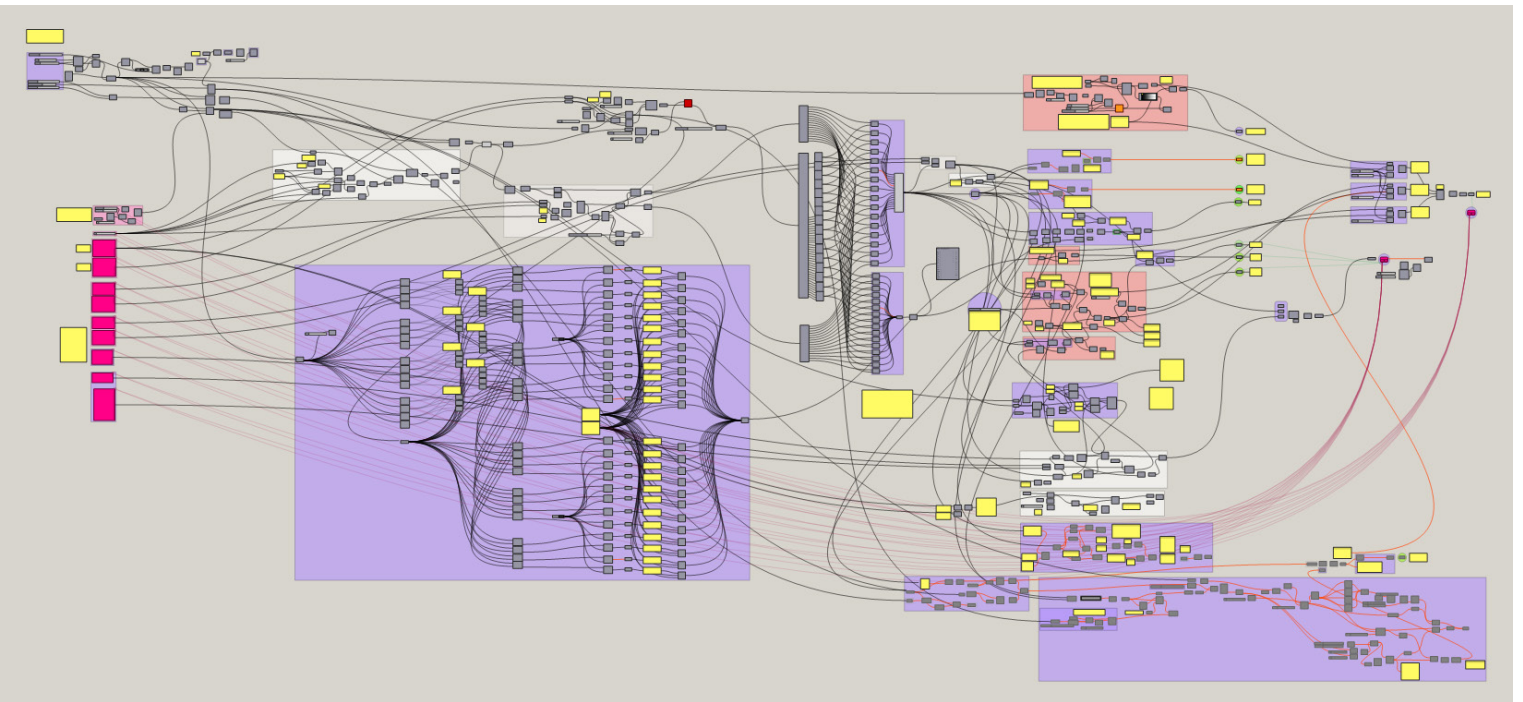
- Elitism: 0.5
- Mutation Probability: 0.1
- Mutation Rate: 0.5
- Crossover Rate: 0.8

El algoritmo evolutivo se ejecuta durante 100 generaciones con poblaciones de 100 individuos. Debido a que cada individuo supone por se 16 bloques (4x4) que se encuentran interrelacionados con el fin de lograr la búsqueda conectividad, el total de los bloques evaluados es de 160.000.

La definición se compone a partir de una matriz cuadrangular que logra los chaflanes mediante el escalado de los lados explotados de los cuadrados, cuyas puntas se unen para cerrar y definir el espacio de la manzana. En la definición principal, tanto ejes como aceras son fijas y hacen referencia al estado original del plan. La siguiente parte de la definición incorpora la subdivisión de los lados en diferentes portales o unidades habitacionales. Esto se lleva a cabo mediante líneas que conectan la cara exterior de fachada y el interior de manzana, incorporando así los dos primeros genes: tamaño de patio de interior de manzana y subdivisión de la manzana. El tercer gen se logra mediante el añadido de los patios dentro de cada subdivisión y por tanto se ve afectado por el número de estas. A posteriori son eliminados los laterales oportunos de cada manzana de forma aleatoria. Para determinar la

relación entre los huecos es necesario una sección que funciona lanzando líneas rectas que unen todos los patios interiores en forma de una segunda submatriz rectangular. Con esa matriz se comprueban las intersecciones con los laterales de los bloques, arrojando valores de 0, 1 y 2 (0 si los patios están conectados, 2 si solo hay uno lateral abierto, 1 si son dos fachadas enfrentadas). Es decir, la prioridad -dado que en Octopus siempre se minimiza- es buscar la conexión; mientras que dos fachadas enfrentadas se considera la segunda mejor opción ya que, una fachada frente a un hueco genera un 'cul de sac'.

021. /// Captura de la definición completa para la evolución de 'superilles' en el Ensanche de Cerdà.



La parte dedicada a la detección y evaluación de la interrelación de los patios supone aproximadamente un 20% del total. Las primeras partes sumadas a todos la reserva genética -que será detallada más tarde- supondría un 30%. Una vez llegados a este punto, todas las operaciones de construcción y relación ya están establecidas pero la geometría resultante aún son meras áreas cerradas y datos. Combinar toda esa información para que sea posible convertirla en volúmenes sólidos representa un 20% de la definición, donde la mayor parte de los componentes simplemente distribuyen, organizan y agrupan. Esto se logra gracias a los condicionales (operaciones booleanas). El resto de la definición se divide en análisis de las manzanas (20%) y aquellos componentes que giran en torno al algoritmo evolutivo (10%). De los primeros se implementaron varios apartados aunque finalmente no todos intervinieron en el análisis final necesario para cuantificar los tres criterios de adaptabilidad:

- Exposición solar
- Volumen
- Relación de área construida
- Superficie del área de los patios

- Relación area/densidad
- Conectividad
- Densidad hab./m2

Respecto a la reserva genética enumerada anteriormente, ha de tenerse en cuenta que el número de genes tenía que ser consistente con el número de bloques. Por esta razón se abordaron mediante agrupaciones fijas de 16 genes (una por cada bloque, 4x4) que delimitaban rangos en el potencial de los mismos. Por ejemplo, para determinar las alturas de los edificios en el bloque 8, el octavo gen de dos reservas delimitaban el rango de las alturas posibles dentro de la manzana (una para marcar el máximo y otra el mínimo). De ese rango se extraían tantos valores aleatorios como subdivisiones tenía la manzana.

También se incorporaron otros valores para fidelizar más la simulación a través de áticos retranqueados y equipamientos en interior de isla pero no fueron integrados en la fase final porque requerían una evaluación más compleja, innecesaria para los objetivos del experimento.

Mono-objetivo VS Multi-objetivo (múltiples 'fitness')

En el seminario se introdujo desde el inicio (acompañado de un breve curso de aprendizaje) el plug-in Octopus que permitía algoritmos evolutivos multi-objetivo. A pesar de ello, el experimento se llevó a cabo también a través de mono-objetivos⁸⁵⁷ para evaluar su conveniencia. Se plantea igualdad de importancia para todos los valores, formulándose la siguiente ecuación que Octopus tratará de minimizar para X siendo el resto de las incógnitas los objetivos:

- Conectividad=C
- Densidad=D
- Exposición=E

Remapear los valores adecuadamente para la ecuación implica el cálculo de los valores mínimos y máximos teóricos de cada uno de los objetivos.

- conectividad: 0 - 48 (todos los lados construidos dan a una apertura - todas las aperturas dan a aperturas)
- densidad: 0 - 40.000hab/km2 (inexistencia del bloque - todos los genes avanzan en pro de la densidad)
- exposición: 0 - 48888 (la inexistencia del bloque - el bloque adquiere su mayor altura).

$$1-(C*0,3+D*0,3+E*0,3)=X \text{ (X tiende a 0)}$$

Por los objetivos marcados, se entiende que la situación confronta siempre

⁸⁵⁷ Un algoritmo mono-objetivo busca la optimización de un único valor que puede ser la relación matemática de varios criterios de adaptabilidad.

a la densidad y la exposición, a mayor densidad mayor profundidad y altura de los edificios reduciendo la luz directa que llega a patios y calles. Mientras que la estrategia asignada por la conectividad tiende a inclinar la balanza hacia la exposición (nótese que el mínimo valor de conectividad no favorece la densidad).

Puede hacerse una valoración preliminar basada en la intuición para ver qué situación es más favorecida por el algoritmo:

- Una conectividad media con altísima densidad y baja exposición que sería próxima a la situación actual. (0,5-1-0)
- Una conectividad baja (todos los lados construidos da a una apertura) daría lugar a una posible densidad del 75% con una exposición relativamente baja, que no mínima. En este caso densidad y exposición irían claramente una contra la otra (0-0,75-0,25).
- Una conectividad altísima llevaría a la creación de mucho espacio vacío, perjudicando a la densidad y favoreciendo la exposición casi al máximo, dando lugar a una situación poco práctica. (1-0-1).

La lógica del algoritmo será la de crear grandes manzanas vacías ideales para plazas con gran exposición y poco o mínima densidad. Para el ejemplo, asociar un porcentaje de igual importancia a los 3 valores probablemente es erróneo. Esto es debido a que los mínimos y máximos de dichos valores no son igual de lógicos o probables: es imposible alcanzar el mínimo de exposición o de densidad, ya que ello implicaría la no existencia del bloque. Sin embargo, es relativamente fácil alcanzar el mínimo en las relaciones de patio en una situación con una densidad y exposición relativamente altas. ¿Debería pues estipularse un mínimo pragmático más acorde para las características de densidad y exposición que entren dentro de situación susceptibles de ser soluciones adecuadas? Además, las posibles alternativas valoradas arrojan situaciones que no resultan de interés y, consecuentemente, desvelan mayores intereses por unos objetivos que otros. En el ejercicio práctico, siendo como es valorada la densidad del ensanche no resulta adecuado que las otras variables se apropien de mayor porcentaje en la ecuación.

La metodología de objetivos unificados plantea las siguientes dificultades:

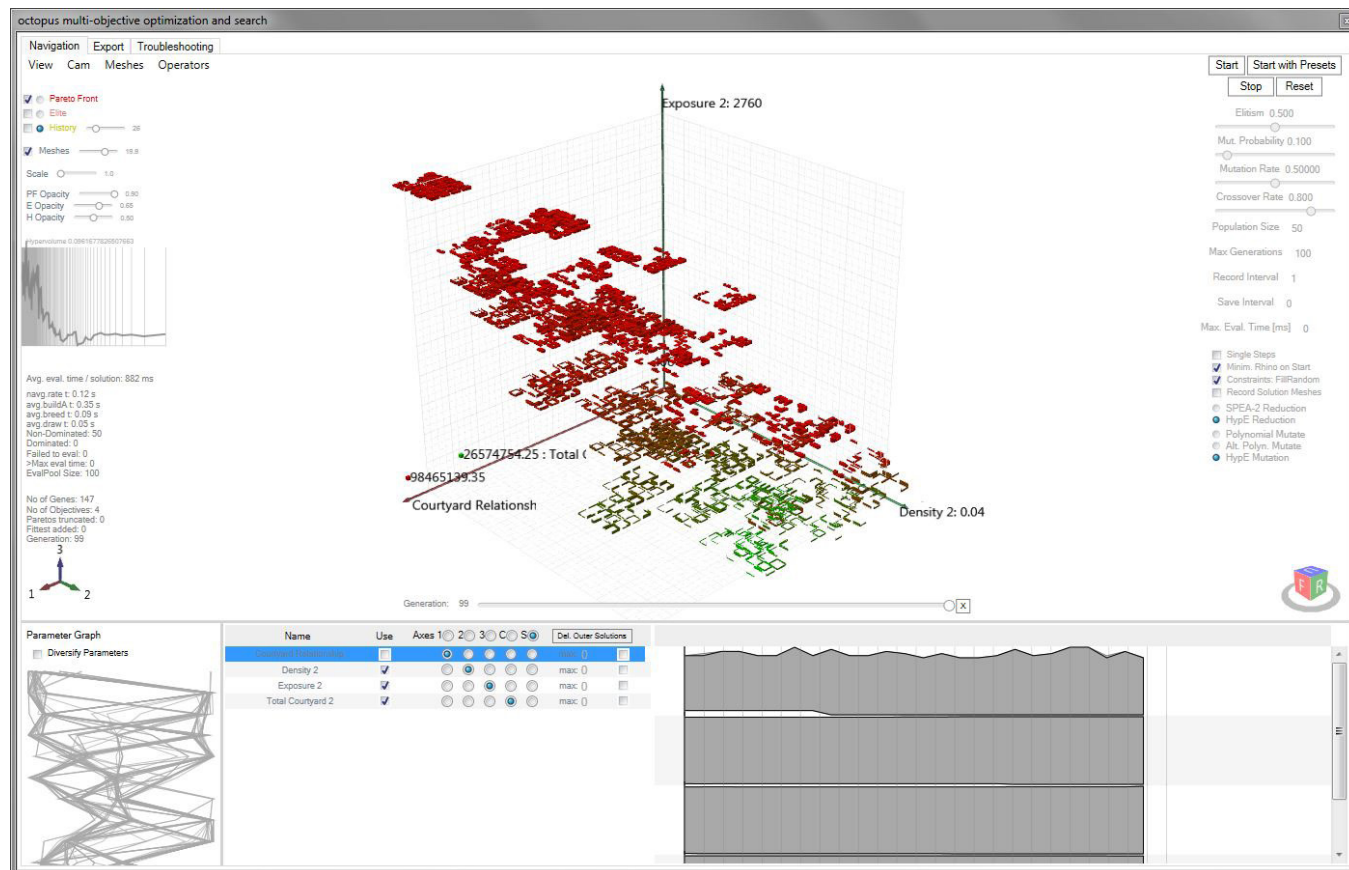
- La incapacidad para ajustar la ecuación y cuantificarla de manera objetiva.
- La incapacidad para cuantificar unos mínimos y máximos factibles que no penalicen el rango.

Por lo tanto hay dos maneras de ajustar la ecuación:

1. Cambiar el porcentaje de influencia de los diferentes objetivos (testando en múltiples intentos).
2. Cambiar el rango mínimo/máximo de las objetivos para que se asemejen en importancia.

Se recomienda ajustar el punto 2 tratando de minimizar la segunda dificultad, y a partir de ahí ajustar los porcentajes para mostrar de una manera más visual el peso de cada uno de los objetivos respecto al total de la ecuación. Penalizar los mínimos de los rangos los objetivos para provocar que valores mediocres parezcan muy bajos no es aconsejable por su falta de claridad.

022. /// Captura de la interfaz de Octopus. Los fenotipos se muestran en la gráfica tetradimensional. El gradiente de color se atribuye al 4º valor para representar la 4ª dimensión.



Tras la optimización de la definición original, los primeros experimentos revelarán los primeros errores a la hora de plantear el enunciado. Del frente de Pareto, ninguno de los individuos resulta ser lo que a priori se consideraba una buena opción. En su lugar, Octopus descubre rápidamente (no se negara aquí una inteligencia simple pero efectiva) que los patios es algo que no compensa. En una isla construida, la exposición ya ha sido drásticamente reducida, si además la altura es elevada, ya es casi mínima. ¿De qué le sirve pues conservar el patio? Es mucho más fructífero llenar la manzana en casi su totalidad aumentando así la densidad. Esto le permite por otro lado, liberar manzanas por completo que harán crecer los valores de exposición y conectividad (sitúa las islas vacías unas al lado de las otras para aprovechar el factor de conectividad más alto: hueco en frente de hueco). Por supuesto, en ningún lugar de la definición se le ha indicado que patios más pequeños implican menos calidad de vida y que obtener soleamiento mediante el vaciado de la trama implica que ninguna vivienda aprovechará dicha condición.

La conclusión es que si el enunciado no es lo suficiente complejo para tener en cuenta todos los valores “subjetivos” o los efectos de los objetivos primarios sobre implicaciones aparentemente menos importantes, la definición requerirá de fuertes restricciones (limites en las variables) para evitar las situaciones más extremas. Definitivamente, la simplificación y abstracción

matemática juega en contra de la arquitectura, de las múltiples implicaciones y sus complejidades.

Por contra, la aproximación multi-objetivo descrita con anterioridad (cap. 3.3.1) en la que se mantienen todos los objetivos o criterios de adaptabilidad (pudiendo ser estos coincidentes en número), permitirá mantener la capacidad de elegir y tomar decisiones hasta el final. Las generaciones de la población producen individuos más variados y que se ven menos condicionados con un “ideal equivocado” de optimización mal argumentado. De esta forma, la repercusión de decisiones subjetivas es mucho menor, minimizando el impacto de los errores o juicios personales⁸⁵⁸ y facilitando la tarea de seleccionar los individuos a través de su distribución en el frente de Pareto.

Los resultados finales demostrarán poblaciones mucho más sanas en términos de variación, a pesar de la inclusión de individuos inservibles porque se ven abocados a un único objetivo. Se hace patente en este sistema la necesidad de mantener y alimentar “monstruos” para lograr individuos intermedios y más coherentes con el objetivo del proyecto.

Para más detalles se añade la definición (archivo de GH) a la carpeta pública indicada al comienzo de los Experimentos (cap. 4)

Datos del experimento

En lo que se refiere a la duración del experimento no es posible evaluar los experimentos de una manera exacta debido a que la dirección evolutiva en la que avance el algoritmo afectará al tiempo de computación de cada individuo. Para este experimento se observaron valores entre 1,09 y 1,74 segundos por cada individuo. En las últimas generaciones se apreció una tendencia hacia valores próximos a 1,2 segundos. La duración total fue superior a 5 horas.

La definición contiene un total de 147 genes, siendo algunos de ellos aplicados al bloque/manzana (ancho en el patio interior, supresión de lados, número de divisiones...), y otros propios de cada escalera/portal (patio interior, número de alturas...). El elevado número de genes mostró evidentes dificultades por parte del software Octopus para llevar a cabo la exportación. Se espera que esta carga computacional mejora en las siguientes versiones ya que, aparentemente, no se debía a una falta de potencia por parte del hardware.

Como resultado final, se llevaron a cabo 100 generaciones de 100 individuos cada una, conteniendo cada uno de estos individuos 16 manzanas diferentes. En total, se evaluaron 160.000 variaciones de la manzana del ensanche.

⁸⁵⁸ La tesis hace especial hincapié en la dificultad de formular el enunciado apropiado.

Estadística descriptiva

Es fundamental entender que diferentes criterios no pueden ser comparados mediante las gráficas de la misma manera que no pueden sumarse peras y manzanas. Las comparaciones siempre se llevarán a cabo entre diferentes generaciones en base al mismo criterio (no pueden sumarse objetivos o 'fitness' pues se mueven en diferentes rangos y unidades). Hacerlo significaría la devaluación segura de algunos de los aspectos considerados frente a otros.

El análisis implica el trabajo con los datos, su organización, desmenuzarlo en unidades manejables, sintetizarla, la búsqueda de patrones, descubrir que es importante y qué ha de aprenderse, y la decisión de qué información será transmitida a los otros⁸⁵⁹. Más allá de las gráficas que expresan directamente los resultados de los individuos y los distribuyen uniformemente se hará uso de los siguientes conceptos/métodos para interpretar los resultados:

- Líneas de tendencia⁸⁶⁰. En el caso de favorecer los extremos la inclinación de las sucesivas poblaciones debería resultar en mayores inclinaciones.
- La desviación estándar⁸⁶¹. Poblaciones con una desviación estándar representan extremos más radicales y una población más diversa. Que crezca la desviación estándar a lo largo de las generaciones será normalmente positivo.
- Gráfica de histograma⁸⁶². Señala posibles tendencias hacia la convergencia asociadas a valores directos de los resultados.
- Distribución normal estándar⁸⁶³. Unifica los conceptos anteriores en una única gráfica de valores abstractos en relación al 0.

Se describen a continuación algunas notas a tener en cuenta para la correcta ejecución de los conceptos mencionados, poniendo hincapié en su funcionamiento a través de Octopus, Grasshopper y Excel. Algunas de estas notas pueden parecer poco relevantes pero facilitarán enormemente la tarea de aquellos que traten de replicar el proceso sin tener conocimientos en tablas o gestión de datos.

Se utiliza el sistema de exportación de Octopus (segunda pestaña): 'Go to export to files, by generations'. Esta opción genera un archivo de texto con la lista de todos los valores de adaptabilidad por cada uno de los individuos dentro de una generación. Es posible marcar el intervalo de generaciones a analizar, creando un archivo por cada generación. Estos archivos son fácilmente importables –basta con arrastrar el fichero encima de la ventana– a una definición de GH que se ha diseñado con el propósito de reordenar los datos. La definición hace uso de 'cull pattern' para borrar las líneas de espacio vacías, y mediante el uso de series de números y selección por índice extrae los

⁸⁵⁹ [Talking about teaching in English: Swedish university lecturers' experiences of changing teaching language](#)

⁸⁶⁰ Línea recta trazada en base a todos los individuos.

⁸⁶¹ Valor que indica cuan alejados están los individuos de una población respecto a la media.

⁸⁶² Gráfica que representa distribuciones de frecuencia por grupos.

⁸⁶³ Gráfica acampanada y simétrica respecto a un valor determinado que describe numerosos fenómenos naturales y sociales.

números apropiados de la lista. El resultado, son listas con la característica determinada de todos los individuos (por ejemplo, el área). Estas listas pueden copiarse y añadirse a un archivo hojas de cálculo para su posterior procesado. A tener en cuenta durante esta importación que el sistema de Grasshopper y la hoja de cálculo deben coincidir –el inglés y el español difieren en el uso de la coma y el punto-. Para esta tesis se ha usado Google Sheets⁸⁶⁴. Para mostrar el histograma apropiadamente se aconseja reducir el número de barras a aproximadamente 20 (tamaño de los segmentos) y utilizar el sistema de apilado de barras (dentro de la personalización).

Será necesario el cálculo de la media (función AVERAGE) y la desviación estándar de una población (STDEVP) para los gráficos de distribución normal (NORMDIST). Si el proceso se ha llevado a cabo mediante un algoritmo multi-objetivo el valor de la media no puede considerarse como un indicativo de mejora -ya que la población no crece hacia un único objetivo de adaptación-. Con todo un aumento de la desviación si implica un incremento de los extremos en la población, y por lo tanto un proceso multi-objetivo positivo. Por el bien de otras comparaciones se han realizado las siguientes operaciones para cada característica o función de optimización: media, mediana, moda, rango (máx. y min.) desviación estándar. Las gráficas de desviación estándar se muestran en relación al histograma y por lo tanto no oscilan entre -3 y 3. Este histograma se genera a través de la hoja de cálculo mediante el comando de frecuencia (FREQUENCY) y no a través de una gráfica de manera automatizada.

Resultados

Se tomaron capturas en las generaciones 1, 30, 60 y 100 para apreciar una evolución visual de las generaciones. La progresión de las imágenes permite discernir el creciente aumento de los extremos, mientras que la generación 1 es relativamente uniforme, la generación 100 contiene grandes contrastes de zonas oscuras y otras muy vacías. Esto prueba la creciente diversidad de la población y como sus individuos se van especializando en los distintos objetivos.

Ante semejante disposición de información, no puede emitirse un juicio de valor puramente visual o estético. La información generada por Octopus es analizada mediante la estadística descriptiva explicada en el capítulo anterior y otros procesos que tuvieron que improvisarse a la luz de los resultados y que se detallan a continuación. En este sentido la tarea aprovechó ampliamente las capacidades de Grasshopper para manejar la información: dividir, agrupar, juntar, remapear, dibujado de gráficas... la estructura en árbol de los datos facilitó la gestión y organización del archivo original (una lista de genes en un archivo de formato de texto).

⁸⁶⁴ Collins, Ben. "Histograms and Normal Distribution Curves in Google Sheets." Consultado 14 de febrero, 2016. <http://www.benlcollins.com/spreadsheets/histograms-normal-distribution/>

023. /// Capturas de la generación 1 y 100. Se aprecia el avance hacia un aspecto más heterogéneo debido al impulso de los individuos más extremos. Esto crea super-manzanas muy densas y otras muy abiertas.

023. /// Capturas de la generación 1 y 100. Se aprecia el avance hacia un aspecto más heterogéneo debido al impulso de los individuos más extremos. Esto crea super-manzanas muy densas y otras muy abiertas.

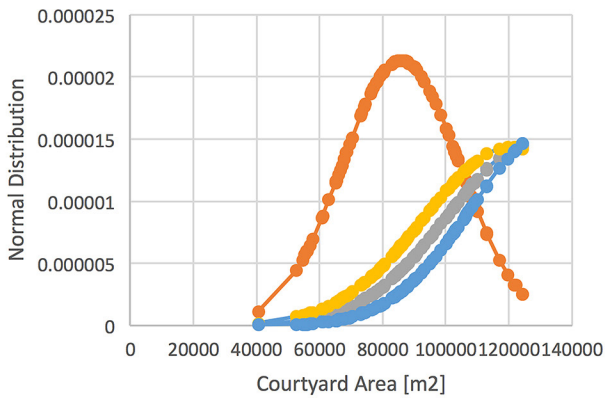
023. /// Capturas de la generación 1 y 100. Se aprecia el avance hacia un aspecto más heterogéneo debido al impulso de los individuos más extremos. Esto crea super-manzanas muy densas y otras muy abiertas.

024. /// Muestra de la tabla de 10 individuos (archivo de texto).

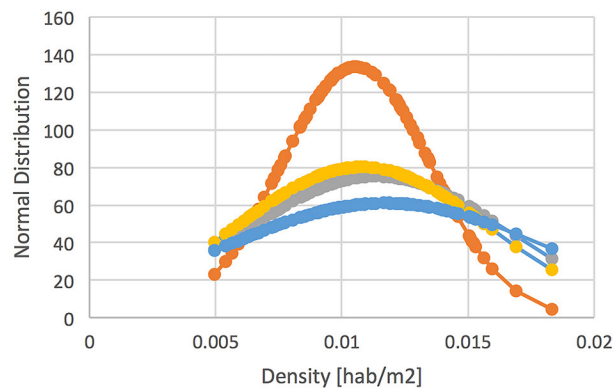
individual	gen 1	gen 30	gen 60	gen 99
0	0.03088705424 28 29 91947037.02	0.02987972939 28 27	0.02079840177	0.02958337098 86849859.89
1	0.0309431131 31 28 89131866.55	0.02875095279 27 22 87839192.96	0.02331220208	0.03288116019 93892228.3 76606080.14
2	0.02767994117 31 36 94720015.45	0.02331587662 33 31 95386639.35	0.02457026305	0.0338222588 91647893.71 75719527.14
3	0.03388453452 33 28 83618819.34	0.03492041846 29 23 73089320.16	0.02403161799	0.03450111803 91965220.7 75023546.21
4	0.03306353843 34 18 82434054.98	0.03325344021 31 23 77291115.79	0.02790291859	0.03272328762 87563752.48 87134218.26
5	0.03042766549 31 28 88512661.9 75976161.57	0.03319326867 33 27	0.02377396388	0.03154501476 92013112.51 81928843.89
6	0.02773145052 34 33 92649316.1 81332745.47	0.03141042421 33 25	0.03136127166	0.02483179269 82430538.81 91159755.28
7	0.02656807838 29 26 92358066.17	0.02663643859 27 25 91610979.77	0.0342332945	0.02487087205 79314299.3 90706335.52
8	0.03079383191 31 29 89591584.87	0.03353806921 21 26 75680392.25	0.03182107735	0.02749273214 80441188.1 88899449.3
9	0.027864521 34 21 91224882.51	0.0315656412 32 24 91640567.3 82643034.26	0.03105126959	0.0258521775 89651523.01

025. /// Gráficas de distribución normal. Destaca la progresión de las generaciones frente a una primera generación aleatoria -naranja-.

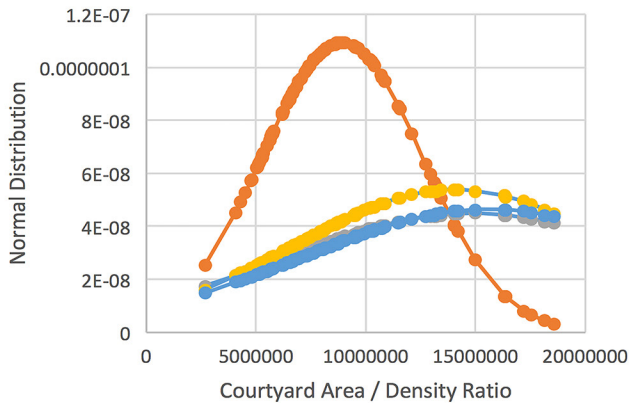
COURTYARD AREA



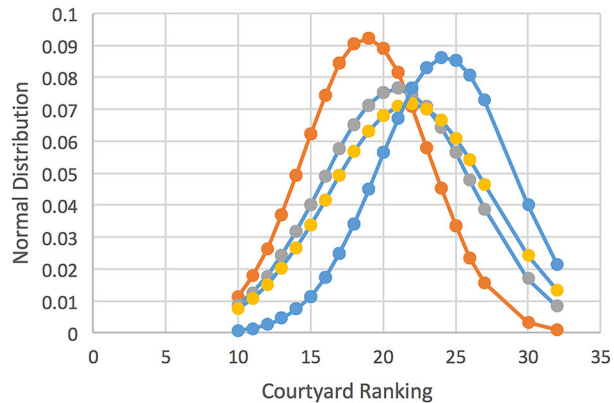
DENSITY



COURTYARD AREA / DENSITY RATIO



COURTYARD RELATIONSHIP



● Generation 1 ● Generation 100
● Generation 30 ● Generation 60

Las gráficas son de vital importancia para corroborar que los parámetros del algoritmo son correctos y se efectúa una progresión positiva. Gracias a ellas se pueden comparar diferentes generaciones que contienen decenas -cientos- de individuos. En el experimento se han calculado las distribuciones normales de las generaciones 1, 30, 60 y 100. La curva naranja siempre será considerablemente diferente, debido a que es la primera generación y es fruto de la aleatoriedad. Respecto al resto, y poniendo especial atención a la generación 100 -de color azul- puede apreciarse una disminución de la altura de la curva. Esto se debe a una población variada e igualmente distribuida. Se aprecia que los mínimos de las curvas (izquierda) son más bajos que la generación inicial, y lo mismo ocurre con los máximos (derecha) que son más elevados. Especialmente en las gráficas de área del patio interior y la de relaciones entre manzana se puede observar una progresiva mejora de la población sin perder distancia entre los extremos. Estos dos valores han influenciado negativamente la densidad, que si ve sus valores empeorados en la última generación. No obstante, aparecen en esta última los máximos

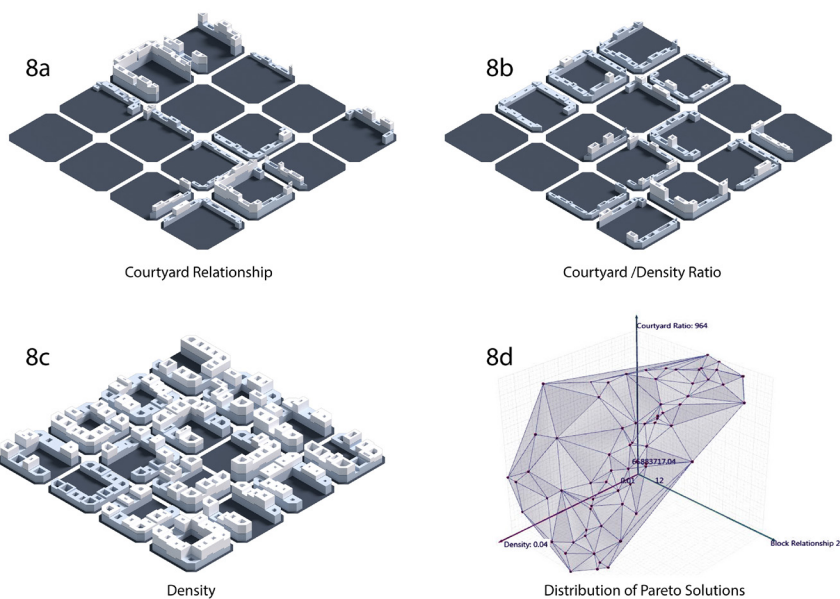
valores de densidad, reforzando la idea de alimentar y extender los extremos del frente de Pareto.

A nivel individual se seleccionaron y analizaron los individuos más extremos de cada 'fitness' resultando estos los individuos número 72, 74 y 95. En relación a la imagen adjunta asociados a 8a, 8b y 8c. Estos individuos que marcaban los límites del Pareto Front, no deben por intuición ser los "mejores" por su carácter extremo, presuntamente ahogando el resto de valores. Las similitudes entre individuos 8a y 8b se deben a que sus criterios eran complementarios: más conexión entre los bloques suponía mayor superficie en los patios interiores. El individuo 8c, a pesar de ser un extremo en densidad logra mantener y crear una serie de patios conectados (dos parejas, y un trio).

Por la representación gráfica del frente de Pareto en la imagen 8d se aprecia que la población está bien extendida y distribuida entre sus extremos. Si se puede distinguir un rango mayor de individuos en los valores máximos del eje de conectividad que forman un arco que recorre el plano de máximo tamaño de patio con el de máxima densidad.

026. /// Frente de Pareto e individuos más extremos del frente.

Durante las primeras comparaciones de los datos obtenidos se obtuvo que la última generación no era en absoluto mejor que ninguno de los dos modelos standard ('L'Eixample' original de Cerdà, o el estado actual de Barcelona). Estos resultados negativos contradecían la correcta evolución de la población y resultaban totalmente confusos teniendo en cuenta que era "relativamente" fácil lograr un Superbloque con mejores valores de manera manual. No obstante, este contratiempo llevó a una mejor comprensión del proceso, la invención de un nuevo método comparativo y, finalmente, la aclaración de que el proceso había sido un éxito.



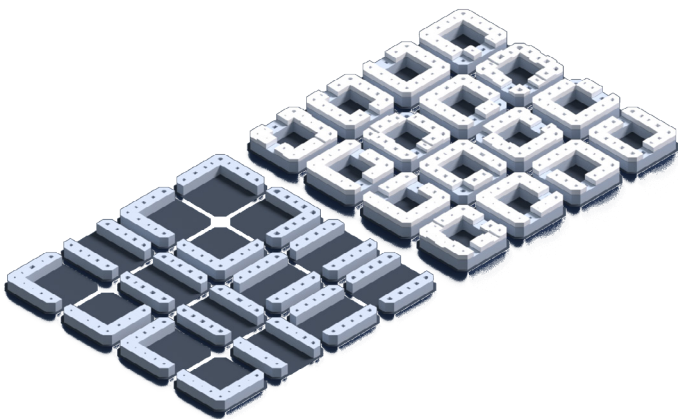
El problema de los resultados venía dado por comparar erróneamente datos que no debían ser comparados. En un caso normal de proceso evolutivo con un objetivo de optimización la población avanza toda en una única dirección, pero con la introducción del sistema multi-objetivo ese no es el caso. Los individuos de la población se vuelven más extremos a medida que avanzan durante las generaciones. Esto provoca que al evaluar la población (la última generación normalmente) los resultados sean mediocres, debido a que los individuos extremos y contrarios se contraponen compensando los valores (en una clase donde la mitad de los alumnos son increíblemente

altos y la otra mitad increíblemente bajos la media sería totalmente común, pasando inadvertida tal peculiaridad). Se deduce de esto que las generaciones producidas por Octopus no podían ser comparadas satisfactoriamente con los modelos de referencia: había pues que comparar los individuos.

Nuevamente, las capacidades de Grasshopper para procesar y organizar información fueron de gran ayuda. Sin embargo en este caso la selección no es 100% matemática. No hay un mejor individuo porque el valor del mismo depende de tres factores: conectividad, densidad y superficie libre. Por ello, se crea una definición que ayuda visualmente a reconocer aquellos individuos que mejoran en algún aspecto los modelos de referencia. Esta definición traduce los tres valores propios de los individuos en una gráfica, manteniendo esos valores independientes pero remapeados en cantidades similares para que visualmente puedan ser comparados fácilmente.

Como se ha mencionado con anterioridad, hay valores (o unidades) que no pueden ser traducidas y sumadas, que no pueden ser comparadas. En este caso, no se puede valorar la equivalencia entre un grado más de conectividad y un metro cuadrado más de espacio libre, no solo porque sus extremos son diferentes (y en algunos casos desconocidos o imposibles) sino porque sus repercusiones van más allá afectando otros valores del individuo. A pesar de ello inicialmente se utilizó el método para seleccionar rápidamente algunos de los mejores individuos en el Pareto Front. El margen de error era compensado con el número de individuos seleccionados. Una vez realizado este paso se valoraron visualmente con el método citado anteriormente. Por la similitud entre algunos de los seleccionados se eligieron finalmente 4 individuos: 54, 74, 78, 92.

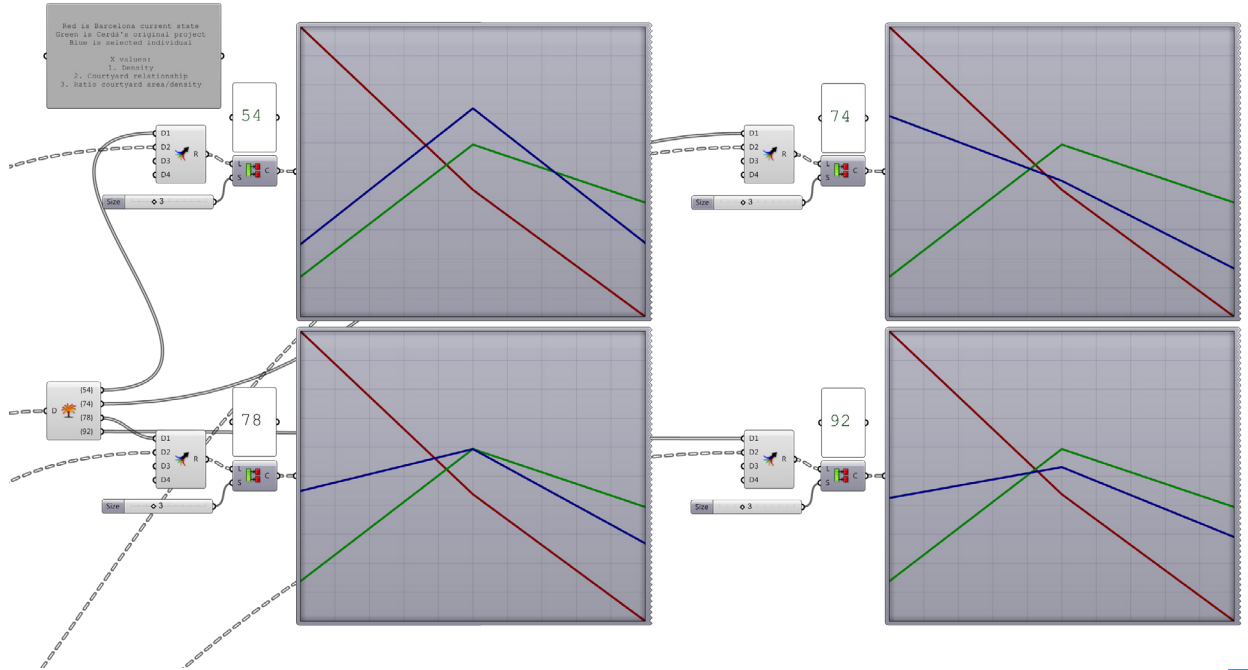
027. /// Representación del plan original y actual de 'l'Eixample' mediante la definición creada para el experimento.



En las siguientes gráficas se muestran sus valores en comparación con 'l'Eixample' original de Cerdà y el de la Barcelona actual⁸⁶⁵: Como se esperaba, ninguno de los seleccionados es mejor que los dos modelos de referencia sino que se encuentran en lugar intermedio supliendo las carencias de estos. La línea granate representa la Barcelona actual, la verde el proyecto original de Cerdà y la azul el individuo analizado. Las polilíneas de las gráficas marcan tres alturas que representan: densidad, relación entre patios (conectividad), y relación de área/densidad.

⁸⁶⁵ Es de vital importancia hacer mención de que los colores de las gráficas pueden cambiar cada vez que iniciamos la definición haciéndolos una referencia totalmente inválida. Es necesarios si se trabaja en grupo identificar los individuos uno a uno y referenciarlos en base a sus valores numéricos.

028. /// Individuos de la última generación: 54 74, 78 y 92.



Los casos más idóneos muestran densidades altas pero concentradas para permitir el vacío y conexión en otros puntos de la retícula. De ser necesario, podría adjudicarse su conveniencia en base a unos mínimos de densidad o espacio libre determinados por el contexto.

029. /// Tabla comparativa de los elementos seleccionados frente a los modelos del plan original de Cerdà y el estado actual de Barcelona.

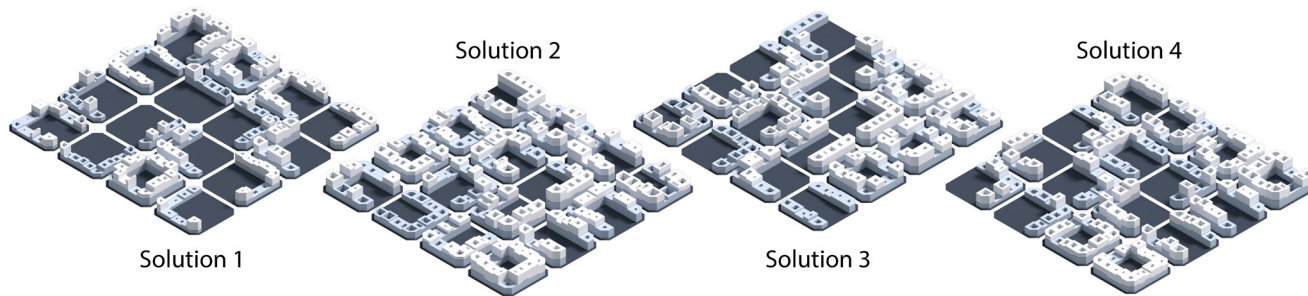
Criteria	Existing Example	Cerda Plan	Solution 1	Solution 2	Solution 3	Solution 4
Density	0.88	0.3	0.37	0.67	0.51	0.49
Courtyard Connectivity	0.5	0.6	0.69	0.52	0.60	0.56
Courtyard Area	0.21	0.47	0.38	0.32	0.39	0.40

En la mayoría de los casos se alcanzaron altas cotas de conectividad entre espacios, muy cercanas al ideal de Cerdà e incluso superiores; se mejoró la densidad del proyecto Cerdà, en un punto intermedio entre las dos referencias; y se logró espacios verdes más próximos al plan original que el actual, muy por encima de los mínimos requeridos para la ciudad. Gracias a la conectividad de las manzanas, varios de los individuos han logrado generar recorridos verdes que enlazan múltiples manzanas y que podrían suponer nuevas jerarquías para el peatón.

Sin duda encontrar estos individuos habría sido un trabajo mucho más tedioso con el sistema de mono-objetivo. A pesar de que los resultados finales podían ser intuidos en líneas generales (nunca en los detalles que

finalmente se han formalizado) el diseñador es completamente ignorante de que preferencias ('weights') ha de aplicar a las ecuaciones para poner en relación los diferentes 'fitness' para mono-objetivo. Así, aunque más rápidos de procesar, requerirían numerosos intentos fallidos sin llegar a garantizar nunca uno acertado.

030. /// Fenotipos de los cuatro individuos seleccionados.



Resulta sorprendente que el individuo #74, que fue seleccionado como uno de los mejores individuos, también aparece en la lista de de extremos del frente de Pareto. Probablemente esto se debe a que los márgenes de la definición, a pesar de lograr una gran densidad, seguían manteniendo unos mínimos de área libre, que junto a una conectividad moderada elevan el valor medio de este individuo. Surge a raíz de esto una duda importante: ¿han de ser las definiciones totalmente libres de fracasar y alcanzar extremos inservibles, o han de acotarse dentro de unos baremos racionales?

Por último, valorar positivamente el experimento, no ya por la calidad de los individuos obtenidos, sino por el proceso y desarrollo del mismo, que ha probado ser efectivo en la generación de una población diversa y optimizada de la cual realizar una selección notable. Igualmente, por la correcta aplicación de diferentes formas de análisis, tanto estadístico como gráfico.

Permutaciones e individuos en la población

Las limitaciones computacionales -un i7-3770 (3,40 GHz), 32gb de RAM DDR3 y una gráfica GTX 660 (3gb)- limitaron (o más bien propiciaron) el número de subindividuos dentro del superbloque a una cuadrícula de 4x4 (16). A pesar de la aparente restricción, se considera relevante y positiva la inclusión de grupos que han permitido la interrelación entre dichas subpartes. Por el contrario, a una escala mayor, nuevamente aparece la ausencia relacional entre los superbloques, un aislamiento entre los individuos generacionales respecto a la ciudad que construyen. La primera intuición apuntará a la necesidad de evolucionar ciudades enteras, de crear un único organismo gigante, responsivo y consciente de sí mismo: crear miles de Barcelonas posibles cada vez más eficientes, que son evaluadas y clasificadas en base a su eficiencia en los diferentes valores. Sin embargo, este proceso sería terriblemente negativo para una aplicación evolutiva: un individuo como la ciudad estaría

compuesto por miles (millones) de genes, variables, que crearían un ‘fitness landscape’ multidimensional difícilmente navegable o comprensible. Sólo en el sencillísimo e hipotético caso de 5 genes con 10 diferentes expresiones de su intensidad nos encontraríamos ante 100.000 permutaciones posibles.

Para el ejemplo ejecutado, tratando una única variable (ya sea ancho, altura, o cualquiera de las otras) se tratan de $2.8 \cdot 10^{12}$ permutaciones: 16 genes que afectan a cualquiera los respectivos bloques de la supermanzana y que a su vez varían en un rango de 6 intensidades. El cálculo se realiza mediante la fórmula de permutaciones con repetición aceptada (n^r) siendo “n” el número de intensidades en el rango y “r” el número de genes. El cálculo de la totalidad de los individuos posibles en todas sus características es de $2.4 \cdot 10^{14}$ (resultado de 6^{147}). El número de individuos posibles se ve además “agravado” por el hecho de que los genes no definen individuos concretos, sino los límites de la creación de los mismos, siendo este un rango mucho mayor que el de 6 valores concretos y definidos.

Recapitulando, el ejercicio ha constado de 100 generaciones de 100 individuos, siendo la primera de ellas doble por el ‘boost’ inicial. A pesar de que cada individuo está compuesto por 16, podrían contarse como un total de 160.100 individuos evaluados (aun cuando un porcentaje considerable pertenece a la elite y por tanto permanece al archivo del algoritmo, repitiéndose a lo largo de las generaciones). Frente al número $2.4 \cdot 10^{14}$, se advierte la evidencia de que los valores están considerablemente alejados los unos de otros y que esto podría dificultar el proceso de resolución del algoritmo evolutivo. Si bien ya se estimó estas consideraciones durante el experimento y por ello se trató de simplificar al máximo, los posteriores análisis de los resultados advierten que debería radicalizarse el ahorro de genes y variaciones en las definiciones. Por estos motivos se concluye y se recomienda, al menos, el uso del algoritmo en dos partes:

- Una inicial donde las variaciones de los genes estén considerablemente acotadas (reducidas) para lograr que la población inicial este fácilmente distribuida a lo largo del ‘fitness landscape’, procurando una variación rica y heterogénea de la población.
- Una segunda donde se incrementen dichas variaciones y el detalle de las mismas en pos de maximizar y optimizar los individuos con mayor potencial.

A la luz de los cálculos, el estudio de una ciudad como individuo a evolucionar requeriría de una población descomunal para garantizar un buen resultado, probablemente inabarcable. El doctorando tiene a bien considerar que el proceso ha de ser el opuesto: crear múltiples individuos (quizá sí, por manzana) que evolucionan y que responden simultáneamente con la evolución de sus vecinos. Es decir, simular cientos de evoluciones en paralelo, que son conscientes de sus contiguos y responden en consecuencia. Este tipo de proceso parece decantarse hacia el modelo de ‘swarm intelligence’ o responsivo, donde los agentes tratan de encontrar una situación de equilibrio que podría estar restringida a la adaptabilidad de los genes y su expresión como individuos. **

Anexos

Feedback inicial del eCAADe

Suggestions/Concerns:

1. *The Experiments we conducted in the Emergence Seminar were arbitrary and did not tackle any specific urban problems that Barcelona are facing. For example, the primary motive of introducing towers in the algorithm was from an aesthetic point of view rather than a response to specific site conditions. (I know it was to increase density, but there were many other ways to do this as well).*

2. *I suggest that we carry out some research on the 'Eixample', and the original design intents that were not achieved (and why they were not achieved) and create a GA that tackles those specific problems. Diego has already presented the history of the 'Eixample' at the end of the emergence seminar, so I think we already have the research foundation carried out. (please refer to point 'B' from the conferences response to our abstract). My concern is that presenting the project with the sole purpose of presenting evolutionary computation, without generating a viable solution to a problem, may weaken our argument in the conference.*

3. *We must address what it is that we plan to achieve from applying a EC to an already existing and well developed urban tissue. Are we comparing a design approach that utilizes EC and to one that did not? Or are we undertaking a EC approach in an attempt to 'fix' the problems that the 'Eixample' are already facing?*

4. *After the emergence seminar, I was wondering of what would have happened if we increased our 'superblock' size to the entire city? what if we applied the GA to a 30 x 30 superblock of the existing Barcelona city. The first challenge we would face would be computationally obviously, but if there was a way around that, would this be a beneficial approach or not? (This is something I can discuss in more detail with Mike if necessary).*

Mejoras respecto a la definición original

Notas sobre las mejoras realizadas por el doctorando sobre las versiones iniciales del experimento en el desarrollo evolutivo del tejido urbano de 'l'Eixample', incluidas en la publicación del artículo para el eCAADe 2015.

1. *Performance has been dramatically improved. Our old definition took 3.6sec to compute. The new one is 2.4sec. These times do not include phenotype creation -around 200ms- or Octopus calculations.*

2. I didn't go into 5x5 grid. I had forgotten that means a lot of work. I think that with a better understanding of trees we could get rid of those hundreds of wires... but there's no time for it. With another day I may have time to go 5x5 manual-style. Your decision.

3. Equinoctial seems to me like the best day to make the exposure calculation. But, which hour? Sometime in the middle of the midday and the dawn/dusk I guess... We still have to "find" that vector.

4. Did we decide to remove the inner courtyards? (not the big one). I wasn't sure, but since they were already defined I left them. They are affecting exposure and density, and are affected by its own genepool of size and the number of divisions in the block.

5. Exposure now considers also the streets. Improved brep-to-mesh process. (Also applied for the phenotype)

6. And here goes the polemic part: I changed Maximum high to 7 floors (original Cerdà plan was 20m, so I am still going higher than expected). Cerdà plan has been adapted many times to allow more and more density (speculation issues). So I thought that better than letting the blocks grow really high would be nice to have like 2 parts geometry (bodyplan?! 8-O): The first following original Cerdà plan, and the second letting octopus go crazy as much as it wants (as we let it). This second part is not but an extension of the original building. There are two genpools that allow independent behavior for each one of the blocks. These genpools affect the min and max number of extra floors added (for the moment 1 to 3 like the reality) and the probability for this to happen in the buildings.

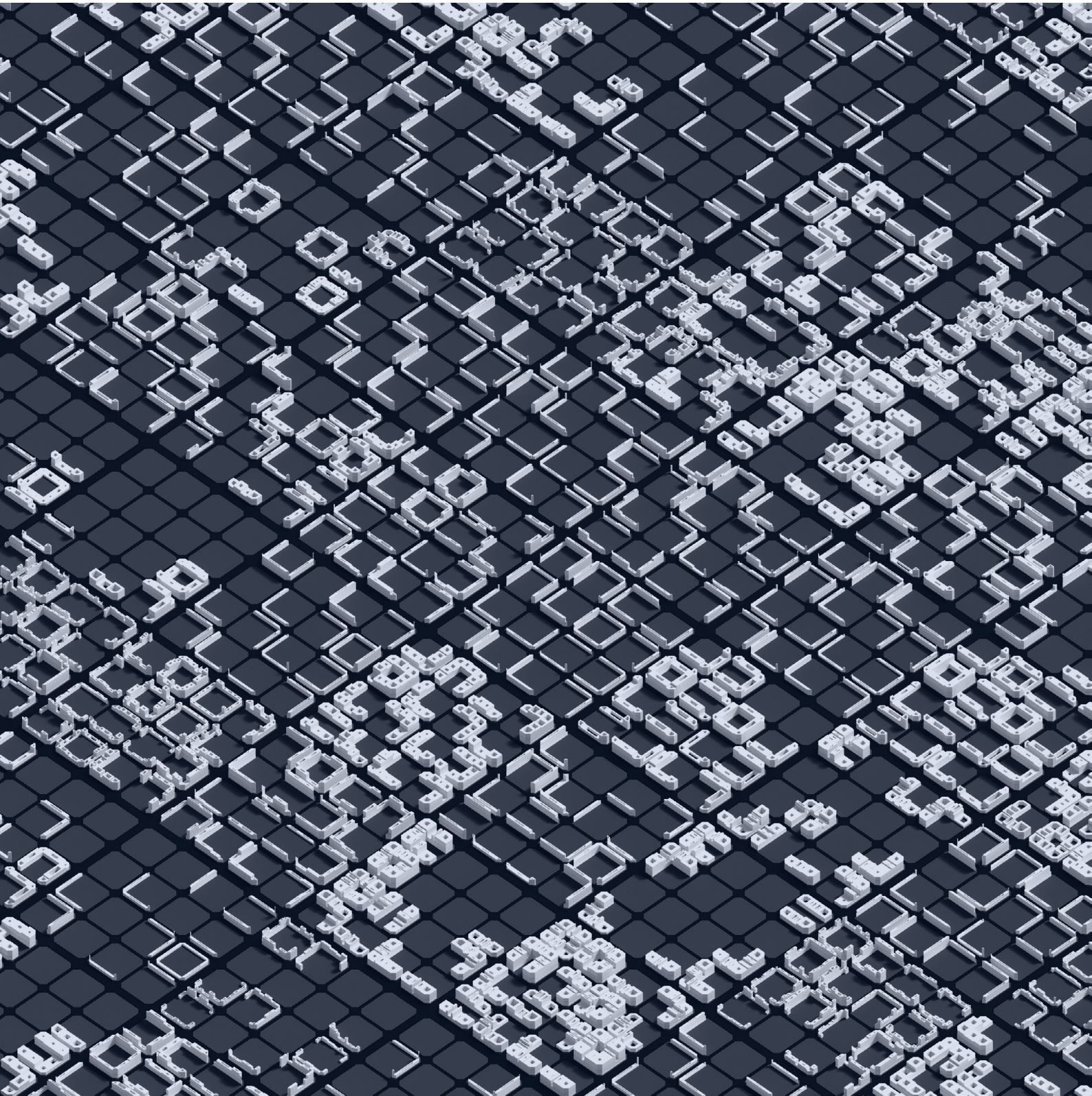
7. Wire misplaced in the Relationship calculation returning in some cases negative values for Octopus (too bad!)

8. More genpools where added. Boundaries from old ones readjusted.

9. Now there are two octopus components, one related to multi-objective and another to single-objective (combination of weights).

10. Added the possibility to have two side's block parallels. Genpool was changed to 9-14 in order to have appropriate results from those seed's numbers.

031. /// Imagen isométrica del conjunto de la generación en 3d.



4.4. Exp. 4: Fórmula de Ildefons Cerdà

El cuarto experimento surge de la inevitable tentación por parametrizar la fórmula de Cerdà que definía el tamaño de las manzanas de ‘L’Eixample’ en base a las medidas y características del mismo edificio. El fragmento de texto⁸⁶⁶ descubierto durante el experimento 3 supone además una relación directa con la intención de la tesis por tratar de una manera rigurosa los objetivos de adaptabilidad en los procesos evolutivos (cap. 3.3.1 y 3.3.3). Al igual que las propuestas de criterios de ‘fitness’ interrelacionados, Cerdà unificara una cantidad considerable de variables (o genes) que fructificarán en un abanico de individuos.

032. /// Fragmento de texto con la fórmula de Cerdà. Aibar, 1995. p. 20.

Uno de los ejemplos más destacables del deseo de Cerdà de presentar su proyecto bajo un halo científico, lo constituye la extraña fórmula que desarrolló para *determinar* la anchura de las manzanas³⁷:

$$x = \frac{pv - 2bd}{d} \pm \sqrt{\frac{pv}{d^2 f} (pvf - 4bdf - 4b^2 d)}$$

Donde x es el lado de la manzana, $2b$ la anchura de la calle, f la profundidad del edificio, d la altura de la fachada, v el número de habitantes por casa y p el número de metros cuadrados de superficie por persona. Prácticamente sin ninguna explicación adicional, Cerdà asigna a las distintas variables los siguientes valores: $2b=20m$, $f=20m$, $d=20m$, $v=43$ y $p=40$. El resultado es, naturalmente, 113.3 m, la distancia actual entre las manzanas del ensanche. En cualquier caso, Cerdà tampoco explica en absoluto el significado de dicha fórmula matemática ni clarifica su origen³⁸.

Su uso de la presentación *científica* debe entenderse como un mecanismo retórico de legitimación, destinado a mantener los detalles técnicos de su proyecto al margen de la controversia, convirtiéndolos en hechos científicos *duros*. Una vez más, podemos apreciar la importancia de la retórica de la ciencia natural en el establecimiento de la credibilidad para un proyecto tecnológico³⁹. Cerdà afirmaba que su plan se apoyaba de hecho en la realidad (social) representada objetivamente por la ciencia (social) y no, simplemente, en sentimientos estéticos subjetivos.

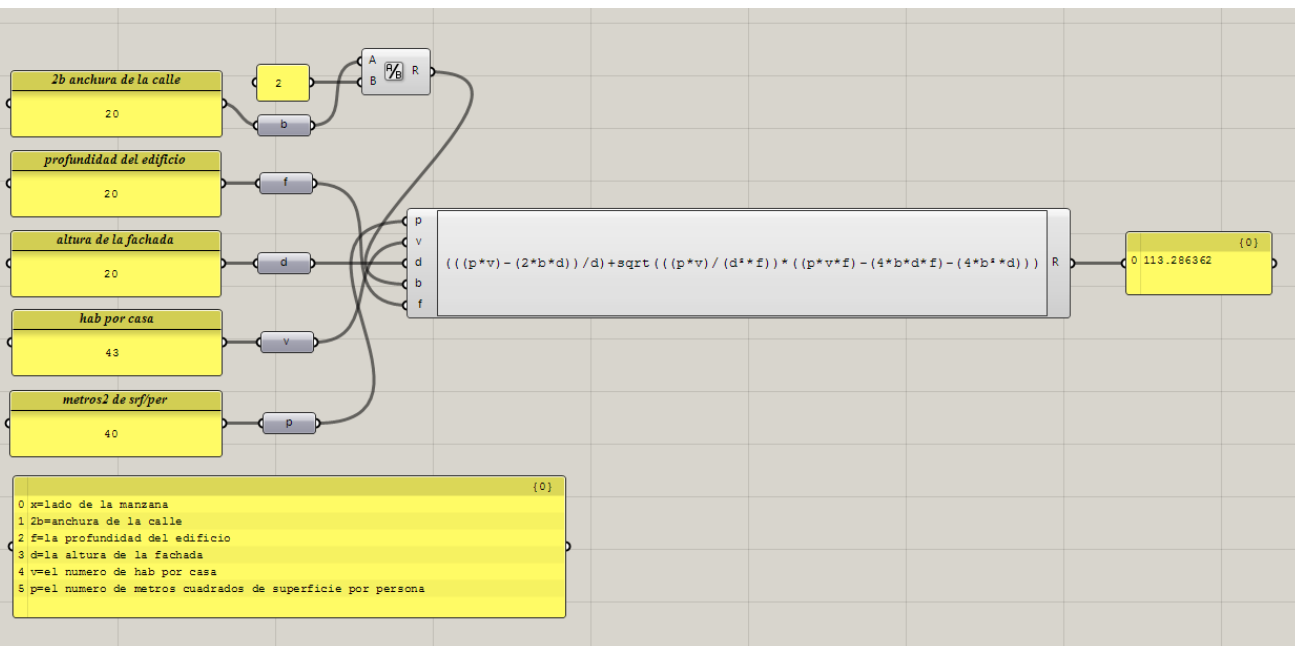
El experimento, aunque breve, servirá para continuar contrastando los procesos de diseño bajo el uso de algoritmos evolutivos al mismo tiempo en que profundiza un poco más en la existencia de “Eixamples’ alternativos”. Aun cuando estas razones pueden parecer circunstanciales al contexto de la tesis, cabe poner de especial relevancia el intento de Cerdà por sentar precedentes en lo que puede ser considerado como una proto-definición-paramétrica: un temprano intento de consolidar reglas objetivas, universales, que se adapten a situaciones particulares para generar urbes adecuadas al

⁸⁶⁶ Aibar, Eduardo. *Urbanismo y estudios sociohistóricos de la tecnología: el caso del ensanche de Barcelona*. Barcelona: UPC, 1995. p. 20.

contexto. Los resultados de este experimento arrojarán virtudes y defectos sobre los procesos actuales del urbanismo paramétrico.

Una vez parametrizada y contrastada, mediante la sustitución de incógnitas en la fórmula, el resultado de la medida del lado del bloque es, efectivamente, 133m. tal y como cabía esperar. A continuación se introducen los valores del edificio como incógnitas a variar por la definición de GH. Por supuesto, esas incógnitas conforman la 'genpool'. Como parámetro de adaptabilidad ('fitness') se elegirá un valor contemporáneo (la densidad de población) que arroja la siguiente pregunta: ¿cómo sería el 'Eixample' si tuviese que mantener la densidad de población actual siguiendo las reglas de la fórmula de Cerdà?

033. /// Captura parcial de la definición de GH aplicando la fórmula Cerdà.



Durante el proceso de experimentación, una de las dificultades durante el desarrollo de la definición es evitar que la fórmula de Cerdà arroje valores inválidos (negativos o nulos). Por desgracia esto ocurre frecuentemente, lo cual obliga a añadir valores de seguridad a posteriori. Lamentablemente, esto evidencia la inflexibilidad de la fórmula para ser aplicada en una variedad heterogénea de casos.

Para restringir y acotar los resultados se añaden las siguientes relaciones a la definición:

- Los ensanches son proporcionales al lado de la manzana.
- Una profundidad mayor a 15metros en el edificio resulta en la división del mismo (dos pisos por planta).
- Las aceras y calles siempre mantienen una proporción 1-2-1.
- Se añade una nueva incógnita (gen) a la fórmula de Cerdà: el ancho de fachada por casa.
- Se aplica un coeficiente de minoración debido a actividades no

residenciales en base a las estadísticas de 2014⁸⁶⁷ (49,88% es suelo residencial).

Los resultados del ES fueron los siguientes (entre paréntesis los datos originales de Cerdà):

- Ancho de fachada: 9 (-)
- Altura de fachada: 31 (20)
- Anchura de la calle: 11 (20)
- Profundidad del edificio: 7 (20)
- Hab por casa: 54 (43)
- Metros cuadrados/persona: 43 (40)

El fitness alcanzó su mejor valor en 35.587 frente al valor teórico de 35.586, con un error mínimo de 1 habitante/km².

El individuo que alcanzó mejores resultados con un valor de calle relativamente alto constaba de los siguientes genes:

- Ancho de fachada: 7 (-)
- Altura de fachada: 25 (20)
- Anchura de la calle: 24 (20)
- Profundidad del edificio: 12 (20)
- Hab. por casa: 58 (43)
- Metros cuadrados/persona: 47 (40)

Su margen de error respecto al valor teórico era de 25 habitantes/km², considerablemente bajo también.

034. /// Captura de Gálpagos.



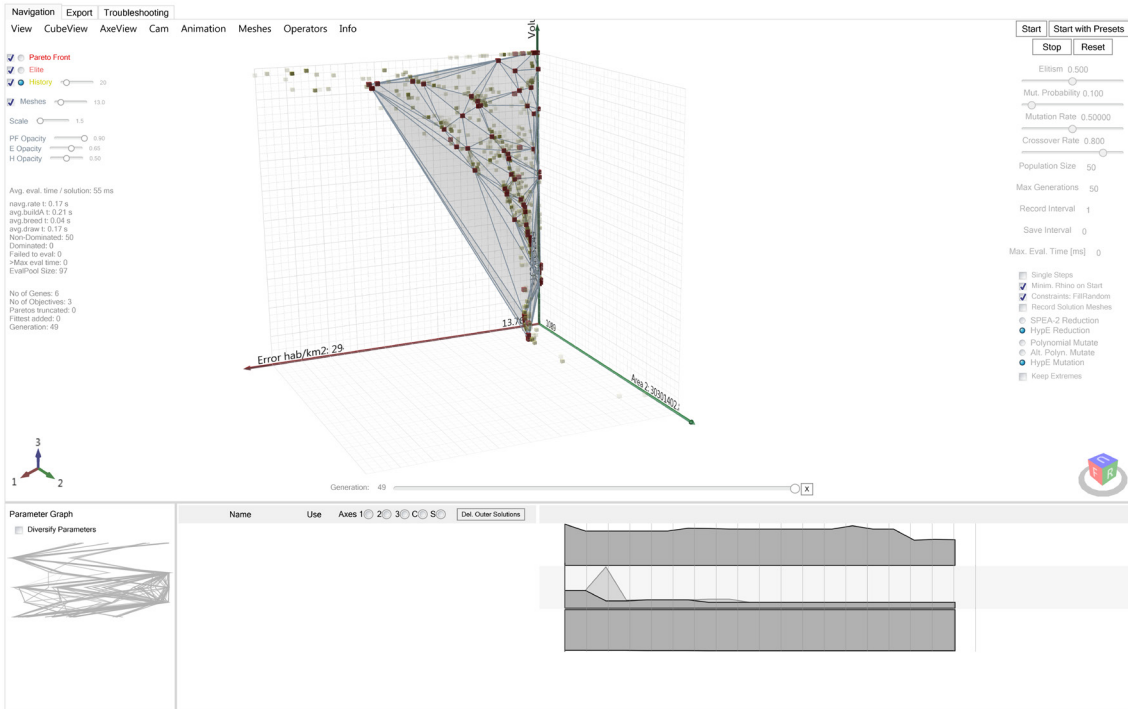
En ambos casos sorprende la poca profundidad de los edificios, y como el algoritmo evita entrar en el límite que provocaría duplicar el número de pisos por planta, aun cuando no hay ningún factor que apoye el soleamiento en los patios interiores más allá de lo implícito en la fórmula de Cerdà. Además el

⁸⁶⁷ Ajuntament de Barcelona. "Estadística districtes 2015." Consultado 14 de febrero, 2016. <http://www.bcn.cat/estadistica/castella/documents/districtes/02EI2015.pdf>

algoritmo cae con frecuencia en una relación de números que falla en crear la manzana pero que sí se aproxima a la densidad deseada debido a la formula.

Por estas razones, se renueva el ejercicio, en esta ocasión usando Octopus para añadir nuevos factores de adaptabilidad que traten de minimizar el área total y maximizar el volumen. Todos los cálculos sucesivos se ejecutaron con poblaciones de 50 miembros a lo largo de 50 generaciones.

035. /// Captura de Octopus mostrando el frente de Pareto como una malla tridimensional de Delaunay.



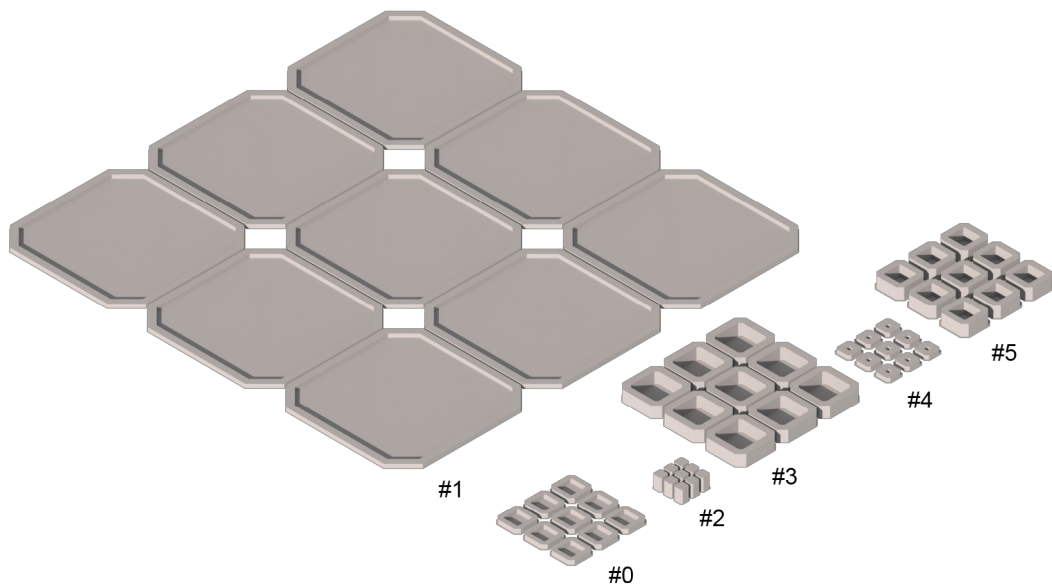
	Cerdà #0	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7
lado manzana	113	680	40	197	69	135	113	112
ancho calle	20	10.0	11.0	11.0	27.0	25.0	14	18.0
profundidad edificio	20	30.0	30.0	30.0	26.0	26.0	20.0	19.0
altura de fachada	20	18.0	60.0	54.0	17.0	54.0	54.0	37.0
hab./casa	43	80.0	45.0	79.0	42.0	74.0	51.0	72.0
metros2/hab.	40	79.0	46.0	76.0	34.0	76.0	79.0	42.0
ancho fachada/casa	10.0	7.0	7.0	7.0	12.0	9.0	9.0	13.0
hab./kilometros2	23.3k	3.5k	218.7k	35.4k	35.4k	35.6k	35.1k	40.6k

El primer individuo (#0) representa la situación teórica que estableció Cerdà con su fórmula. Los miembros #1 y #2 son extremos del frente Pareto

más óptimos sin tener en cuenta la densidad de población objetivo. Los 3 siguientes individuos (#3, 4, y 5) son los resultados más próximos a la densidad actual de la ciudad de Barcelona (35k hab./m²) siendo su margen de error totalmente despreciable. Para el individuo #6 se añadió el clásico lado de 133m a los criterios de adaptabilidad. El resultado es una reducción de la calle estándar a 14m. con una altura de fachada de 54m (17 plantas aprox.). Sorprendentemente la profundidad del edificio es fiel al proyecto de Cerdà. Al individuo #7 se le añadió el valor de la calle estándar para forzar un resultado que funcionase sobre la actual estructura vial de Barcelona. Curiosamente, de nuevo la profundidad del edificio no es alterada para aumentar la necesidad de densidad -de hecho, disminuye a 19- siendo como es el resultado final superior al requerido (40k hab./km²).

De nuevo, los últimos datos arrojan la idea de que las relaciones en la fórmula no son tan simples como a priori podría pensarse, y que estas “empujan” a un resultado con una profundidad de edificio racional (e intencionada por parte de Cerdà). La parcialidad de la fórmula también pone de manifiesto su inconveniencia para aplicarse en cualquier situación, reiterando la inflexibilidad -o la falta de universalidad- de las ecuaciones más complejas.

036. /// Individuos seleccionados de los fenotipos generados por Octopus.



037. /// Fragmento del código de Octopus.

```
Genome[7], Fitness=326.90, Genes [0% · 8% · 20% · 42% · 34% · 46%]
Genome[8], Fitness=709.02, Genes [0% · 13% · 15% · 44% · 34% · 44%]
Genome[9], Fitness=762.49, Genes [0% · 13% · 20% · 42% · 34% · 50%]
{
  Record: Point Mutation at index 1: 0.1 -> 0.0974
}
Genome[10], Fitness=939.05, Genes [0% · 8% · 15% · 44% · 32% · 44%]
{
  Record: Point Mutation at index 5: 0.46 -> 0.4637
  Record: Genome was mutated to avoid collision
  Record: Genome was mutated to avoid collision
  Record: Genome was mutated to avoid collision
  Record: Genome was mutated to avoid collision
}
}
```

```

Genome[11], Fitness=1031.80, Genes [0% · 13% · 20% · 39% · 30% · 44%]
Genome[12], Fitness=1188.90, Genes [14% · 13% · 20% · 40% · 30% · 46%]
{
  Record: Point Mutation at index 3: 0.4561 -> 0.413
}
Genome[13], Fitness=1494.79, Genes [0% · 13% · 15% · 40% · 28% · 48%]
Genome[14], Fitness=1539.83, Genes [0% · 5% · 15% · 42% · 36% · 34%]
Genome[15], Fitness=1566.95, Genes [0% · 10% · 20% · 39% · 30% · 44%]
{
  Record: Genome was mutated to avoid collision
  Record: Genome was mutated to avoid collision
  Record: Genome was mutated to avoid collision
  Record: Genome was mutated to avoid collision
  Record: Genome was mutated to avoid collision
}
Genome[16], Fitness=1770.03, Genes [0% · 3% · 25% · 40% · 36% · 46%]
Genome[17], Fitness=1917.66, Genes [0% · 10% · 15% · 42% · 32% · 46%]
{
  Record: Point Mutation at index 4: 0.38 -> 0.382
}
Genome[18], Fitness=2040.11, Genes [14% · 15% · 15% · 42% · 36% · 42%]
Genome[19], Fitness=2161.03, Genes [0% · 8% · 15% · 40% · 30% · 42%]
{
  Record: Point Mutation at index 4: 0.38 -> 0.3794
  Record: Point Mutation at index 5: 0.46 -> 0.4557
  Record: Genome was mutated to avoid collision
  Record: Genome was mutated to avoid collision
  Record: Genome was mutated to avoid collision
  Record: Genome was mutated to avoid collision
  Record: Genome was mutated to avoid collision
  Record: Genome was mutated to avoid collision
  Record: Genome was mutated to avoid collision
  Record: Genome was mutated to avoid collision
  Record: Genome was mutated to avoid collision
  Record: Genome was mutated to avoid collision
  Record: Genome was mutated to avoid collision
  Record: Genome was mutated to avoid collision
  Record: Genome was mutated to avoid collision
  Record: Genome was mutated to avoid collision
}
Genome[20], Fitness=2189.62, Genes [0% · 10% · 20% · 40% · 30% · 42%]
{
  Record: Point Mutation at index 5: 0.46 -> 0.4543
}
Genome[21], Fitness=2399.46, Genes [0% · 15% · 15% · 42% · 28% · 48%]
Genome[22], Fitness=2444.16, Genes [0% · 8% · 15% · 42% · 34% · 30%]
Genome[23], Fitness=2599.73, Genes [0% · 15% · 10% · 40% · 28% · 44%]
Genome[24], Fitness=3006.82, Genes [14% · 15% · 20% · 40% · 36% · 46%]
Genome[25], Fitness=3154.73, Genes [0% · 8% · 15% · 42% · 32% · 48%]
{

```


4.5. Exp. 5: ‘Evolutionary Development’ a través de Grasshopper

*The world is waiting for you to write the new octopus*⁸⁶⁸. MIKE WEINSTOCK

La motivación de este experimento viene determinada por las carencias de los algoritmos digitales evolutivos (cap. 3.2.1) así como las nuevas incorporaciones en el procedimiento de lo emergente gracias a la ciencia Evo-Devo (cap. 3.1.2). En primer lugar, la capacidad de incluir regulación en los genes, es decir, que se apliquen de manera “aleatoria” en diferentes partes de la geometría. En segundo lugar y en directa relación, la creación de un ‘body plan’ que pueda variar y acomodar los genes antes mencionados. Se recuerda puntualmente que la situación actual presenta genes estáticos, asociados a ‘sliders’ que representan un dominio numérico. Por tanto, los genes digitales siempre se aplican al mismo lugar y únicamente varían en “potencia” en base al ‘slider’. No existe recombinación de genes, sino variación en la potencia de los mismos. ¿Cómo hacer pues que el orden de las acciones varíe en Grasshopper en lugar de variar los valores que se aplican a las acciones en diferentes órdenes? La dificultad del ejercicio estriba en ser capaz de visualizar el flujo de información. Por lo tanto, lo primero es definir correctamente que se está visualizando.

Introducción de ‘body-plan’ y regulación de genes.

Para el ejercicio inicial, se establecerá un individuo conformado por 6 partes (su ‘body plan’ será una matriz de cubos 2x3). A su vez, se crearán 6 genes diferentes que pueden aplicarse en cualquiera de sus partes sin límite de repetición, es decir, en algún individuo el mismo gen podría manifestarse en sus 6 partes. Las fases de este experimento son las siguientes.

1. Tratar meramente las deformaciones de las partes. Poniendo interés en garantizar que el sistema funciona y los genes se expresan de manera libre en cualquiera de las 6 partes.
2. Añadir modificaciones que permitan cambiar la forma de las partes, es decir, alterar el ‘body plan’.
3. Incluir potenciadores en esos genes a través de listas e introducir criterios de adaptabilidad para analizar y comprobar su correcta evolución.
4. Introducir nuevos genes (a través de modificadores de mallas/‘meshes’) que se expresarán en diferentes fases y criterios de adaptabilidad para evaluar un ejercicio con un nivel de complejidad más elevado.

Los primeros intentos evidencian rápidamente el primer problema: si solo hay

⁸⁶⁸ Weinstock, Mike. *Emergence Seminar*. Londres: Enero de 2017. Clase teórica.

un flujo de información -característica típica del trabajo en GH- no pueden crearse repeticiones de genes (pues el componente solo existe una vez). Por lo tanto han de crearse tantos flujos como partes tiene el individuo -6 en nuestro caso-.

Estas consideraciones anulan el intento inicial del doctorando: en lugar de aplicar diferentes genes a cada parte, redirigir las partes hacia genes estáticos mediante una lista de ordenación. Una lista que se contrastase mediante 'cull pattern' con la de la posición original, validando así solo una serie de "ramas". Si bien la definición tiene sentido y funciona, no permite la duplicación de genes.

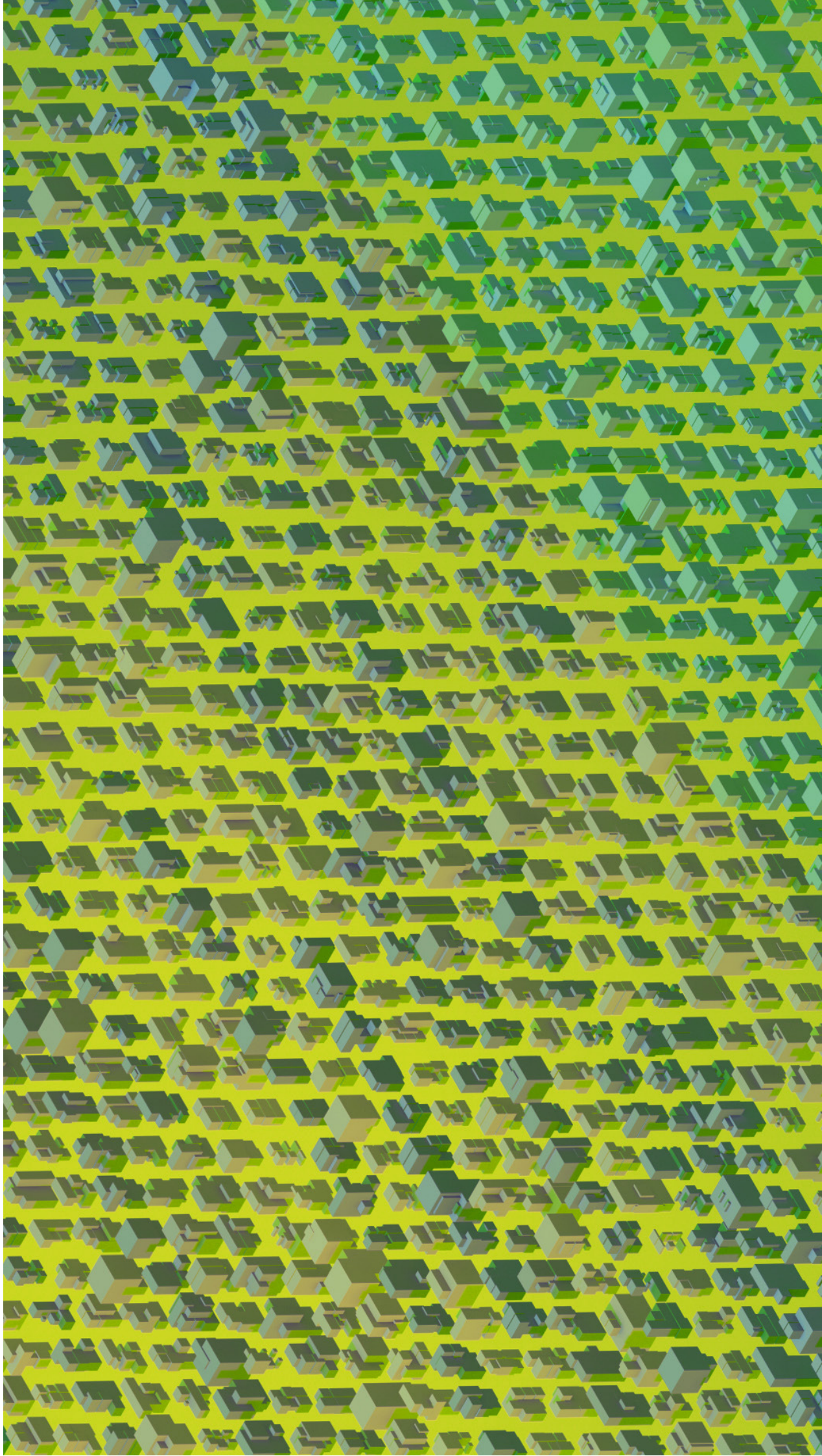
Para lograr el objetivo del experimento la definición requiere que cada una de las seis partes sea susceptible de "sufrir" cada uno de los genes. Por ese motivo se acude a la inclusión de 'clusters'. Los 'clusters' son componentes que incorporan otras definiciones de GH en su interior. Cada uno de estos 'clusters' incorpora en su interior todos y cada uno de los genes. Mediante una lista numérica que indica que gen ha de expresarse, la información geométrica de entrada (una de las seis partes del cuerpo) es validada únicamente para un único gen, resultando el resto de ellos en geometría nula y produciendo un valor geométrico nulo, inexistente.

Por tanto, cualquier hipotética definición debe aglutinar todos los genes existentes en un cluster que se replicará⁸⁶⁹ tantas veces como partes compongan el 'body-plan'. Pueden existir menos partes que el total debido a mutaciones o elementos de aleatoriedad, pero no más, ya que eso generaría un flujo de información existente pero en blanco. A tener en cuenta que las modificaciones del gen deben de ser universales, es decir, deben de ser susceptibles de aplicarse a cualquier parte y después de cualquier otra modificación, de lo contrario se produciría un error en el flujo de información. Por este motivo, el uso de mallas en este experimento tiene una justificación más⁸⁷⁰.

038. /// VG v02 (primera prueba exitosa, próxima página).

⁸⁶⁹ Los 'clusters' no solo aglutinan varios componentes en su interior, sino que se comportan como "bloques" a modo de copias inteligentes. Bastará cambiar cualquiera de ellos para que se actualice el resto de la definición.

⁸⁷⁰ Al contrario que el modelado clásico por NURBS, donde muchas de las operaciones solo pueden darse en curvas, superficies simples, superficies cerradas... y por tanto delimitarían fuertemente el potencial geométrico; en el modelado poligonal por malla prácticamente todas las operaciones pueden darse sobre cualquier tipo de malla.



Modificación del 'body-plan' y el uso de 'random seeds'

La siguiente versión busca la distorsión original de la matriz 2x3 de cubos (el 'body-plan') que conforma el individuo genotípico de este experimento. Para ello, se procede a la incorporación de planos que interseccionen un rectángulo de las mismas proporciones. Esos planos son libres de girar y variar su altura dando lugar a una gran variedad de trapecios.

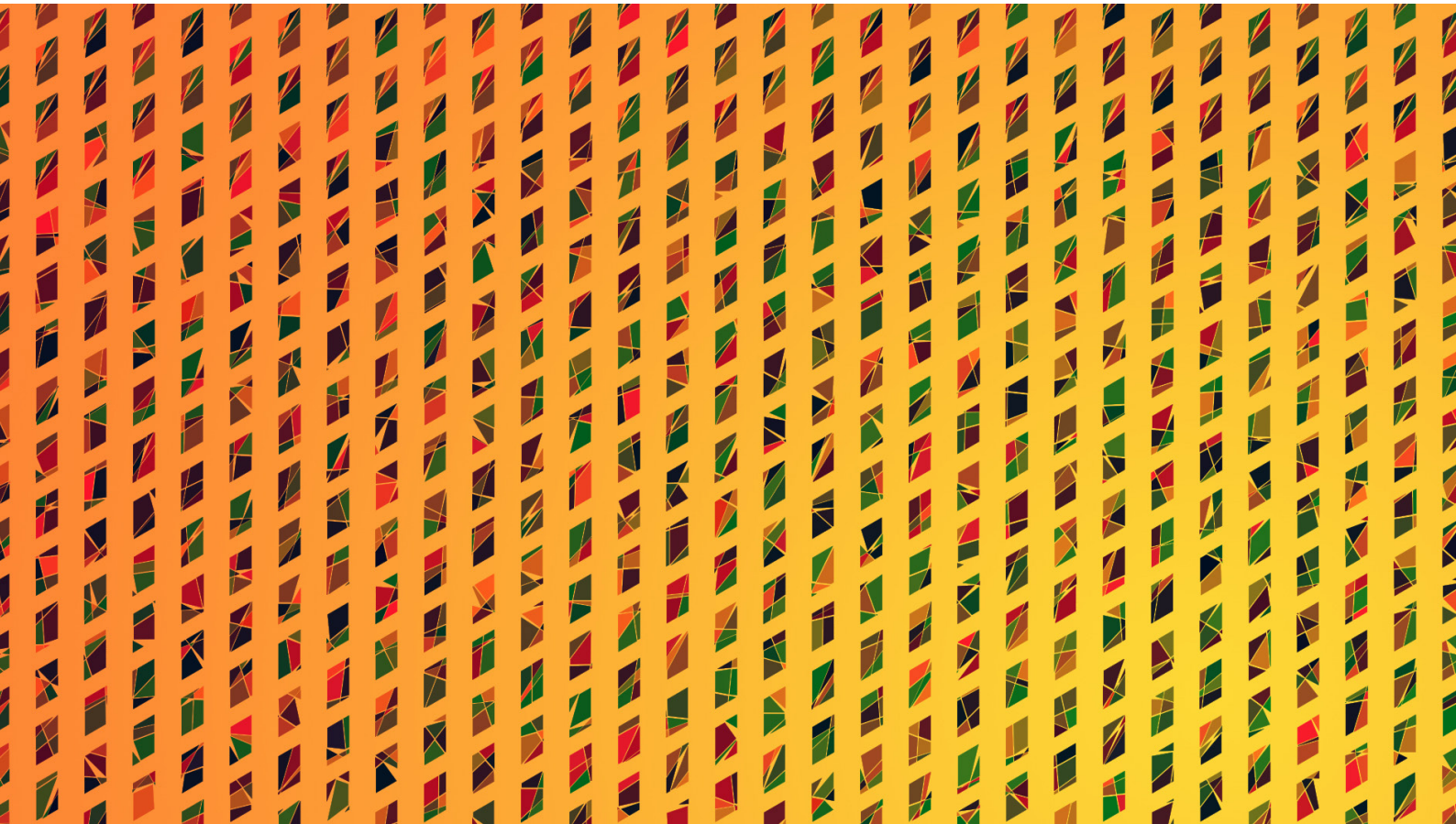
El corte aleatorio de la forma primigenia también propicia un nuevo elemento de complejidad del individuo. En algunas situaciones muy concretas, puede darse que alguna de las formas –trapezoides normalmente- esté compuesta por 5 lados. Este hecho aparentemente de poco valor impide la formación de mallas –solo pueden estar compuestas por 3 o 4 lados- y por lo tanto produce la desaparición de una de las partes del individuo. Ello no repercute negativamente en la definición y no produce errores. Las versiones v03 y v04 demuestran la posibilidad de modificar el 'body plan' y su ejecución sobre los genes de la anterior prueba v02.

A lo largo de la tesis se ha reiterado el aspecto negativo de utilizar 'random seeds' como fuente de información asociada a los genes de la definición. Su aleatoriedad dificulta al algoritmo una progresión lógica. Si bien es cierto que esa progresión no es tan lógica como un ser humano pensaría. Cualquier mente racional, entiende que si 6 es mejor que 5, probablemente 7 también sea mejor que 6. No obstante, el algoritmo evolutivo no hace el mismo razonamiento, su única fuente de trabajo son los genomas existentes (de ahí la importancia de establecer una población inicial lo suficientemente grande) y la combinación de los mismos en nuevas poblaciones. No juzga per se las cualidades de los genes y los amplía en la dirección "apropiada". ¿Por qué entonces se considera negativo el uso de random SEED? Porque las mutaciones sí afectan a pequeñas variaciones en el 'slider'/potencia del gen. Una pequeña variación de pocas décimas en un gen -una mutación pequeña- puede desencadenar un cambio enorme debido a la aleatoriedad de la semilla. Un cambio tan brusco podría ser tremendamente positivo (por un golpe de suerte) o tremendamente negativo (por ser descartado un genoma "bueno" de la selección de la población").

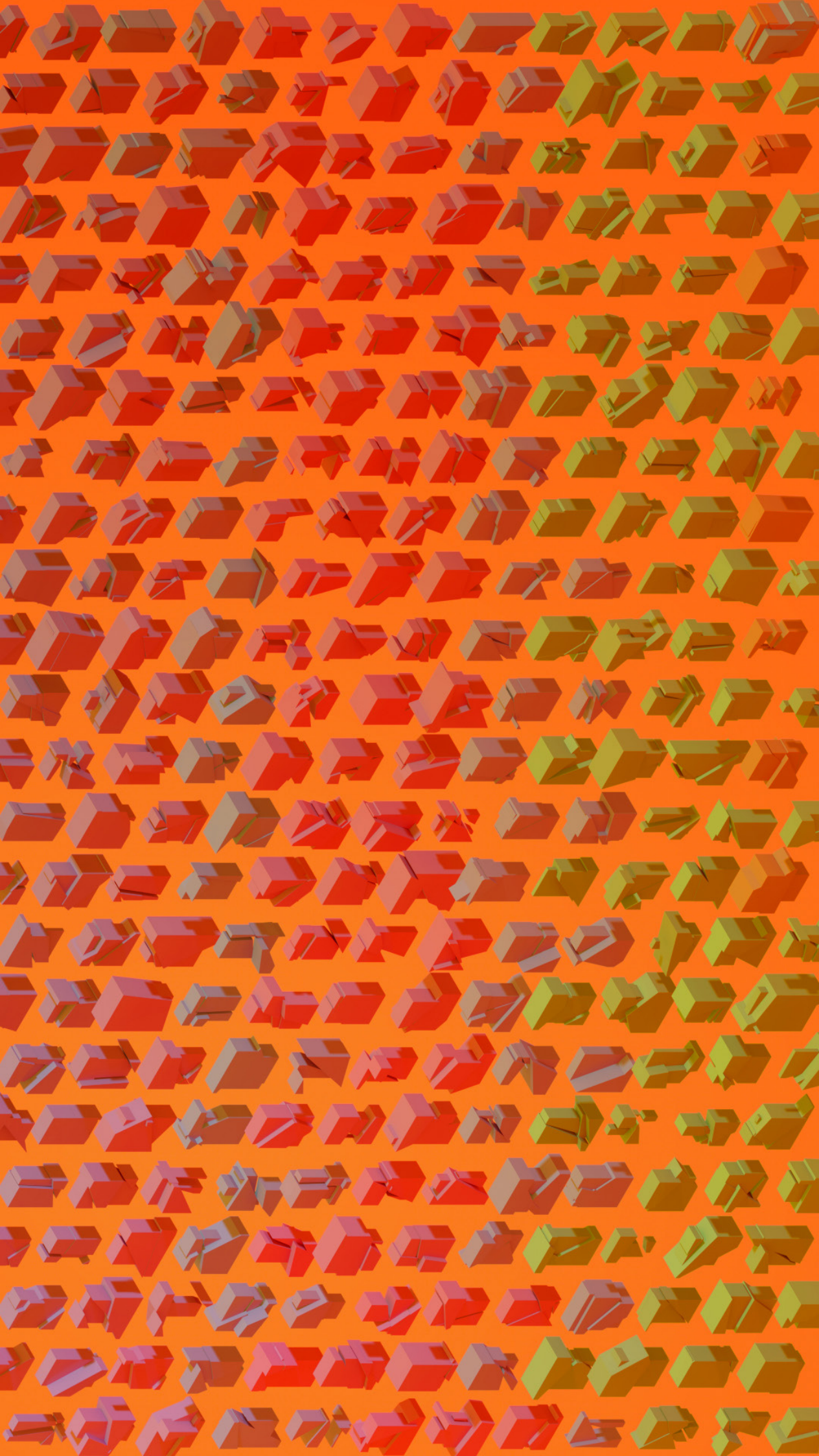
Sin embargo se ha observado que en algunos casos puede estar justificado el uso de 'sliders' aleatorios por lo siguiente: describir el estado inicial requiere un número excesivo de 'sliders' que repercuten en la necesidad de una población gigantesca, únicamente para describir correctamente el estado inicial. Esta consideración parte del experimento sobre la creación e inclusión del 'body plan'. Únicamente para establecer la división del rectángulo predefinido en 6 o menos partes son requeridos hasta 9 'sliders': dos para las coordenadas del punto y otro para la inclinación del corte (aplicado a 3 puntos, 3X3=9). Teniendo en cuenta la sencillez del ejercicio es un número considerable que hace cuestionarse hasta qué punto es bueno que el algoritmo tenga la capacidad de generar y controlar CUALQUIER estado inicial.

La opción que incluía una 'random seed' pasaba por poblar el rectángulo con 3 puntos aleatorios. Fácil y dependiente de un único 'slider', el de la semilla. ¿Podría ser que si se genera una población lo suficientemente amplia con esta metodología el algoritmo tuviese la riqueza requerida en sus individuos para encontrar las mejores soluciones? Al mismo tiempo, el elitismo (mantener los mejores individuos a lo largo de las generaciones) nos garantiza una cierta estabilidad al margen de las mutaciones, ahora sí, descontroladas en la generación de 'body plans'.

039. /// VG v03 generación de 'body plans'



040. /// VG v04 (próximas páginas).



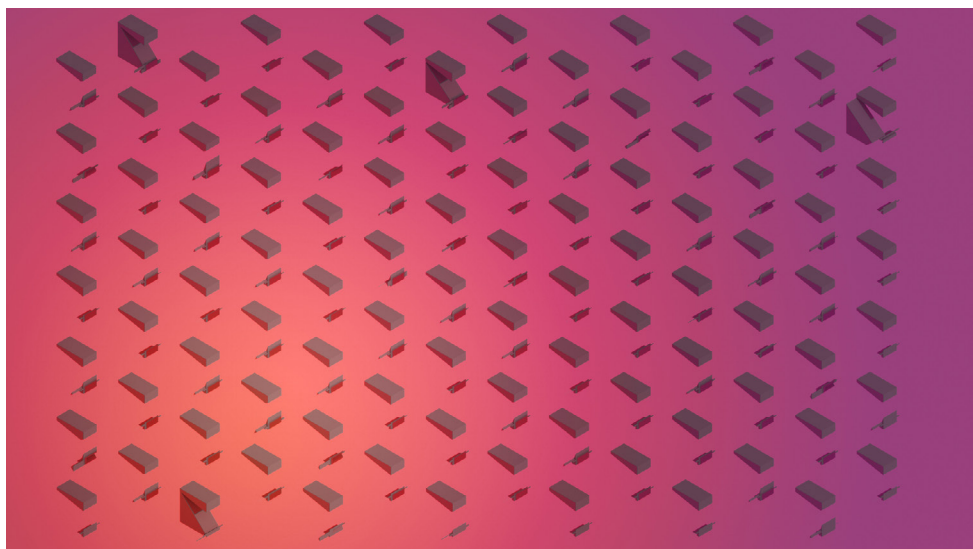
Las primeras versiones han servido para comprobar el funcionamiento de la definición y corroborar la exitosa adaptación de las nuevas características dentro del ciclo habitual del algoritmo evolutivo. Son por tanto, primeras generaciones, creadas aleatoriamente sin ningún 'fitness' asociado.

La v06 incorpora a los 'clusters' la capacidad de recibir potenciadores (valores que multiplican) la intensidad de los genes que se ejecutan en su interior. Por ejemplo: los genes de para escalar 1D en dirección X puede ser potenciado por un valor 3, que afectará a dicho vector de escalado, aumentándolo en 3 veces. Para la primera versión de la definición que incorporó estos potenciadores (VG v06) se establecieron valores aleatorios dentro del rango 0.2 a 1.8. Por supuesto, el número de potenciadores debería de ser equivalente, al menos, al número de genes aplicados (6). De no ser así, esto cerraría la puerta a que el mismo gen se manifestase con diferente fuerza. En la próxima prueba, se sustituirán los valores aleatorios por 6 'sliders' que permiten al algoritmo genético considerarlos como genes y alterar su valor a voluntad.

Para el experimento VG 006 también se incorporan por primera vez criterios de adaptabilidad: maximizar el área, minimizar el volumen, y minimizar la exposición (del suelo). Puede intuirse que algunos de los individuos más adaptados constarán de geometrías que tiendan a ser planas para reducir su volumen mientras aumentan su superficie, y que sean perpendiculares al sol para reducir la exposición.

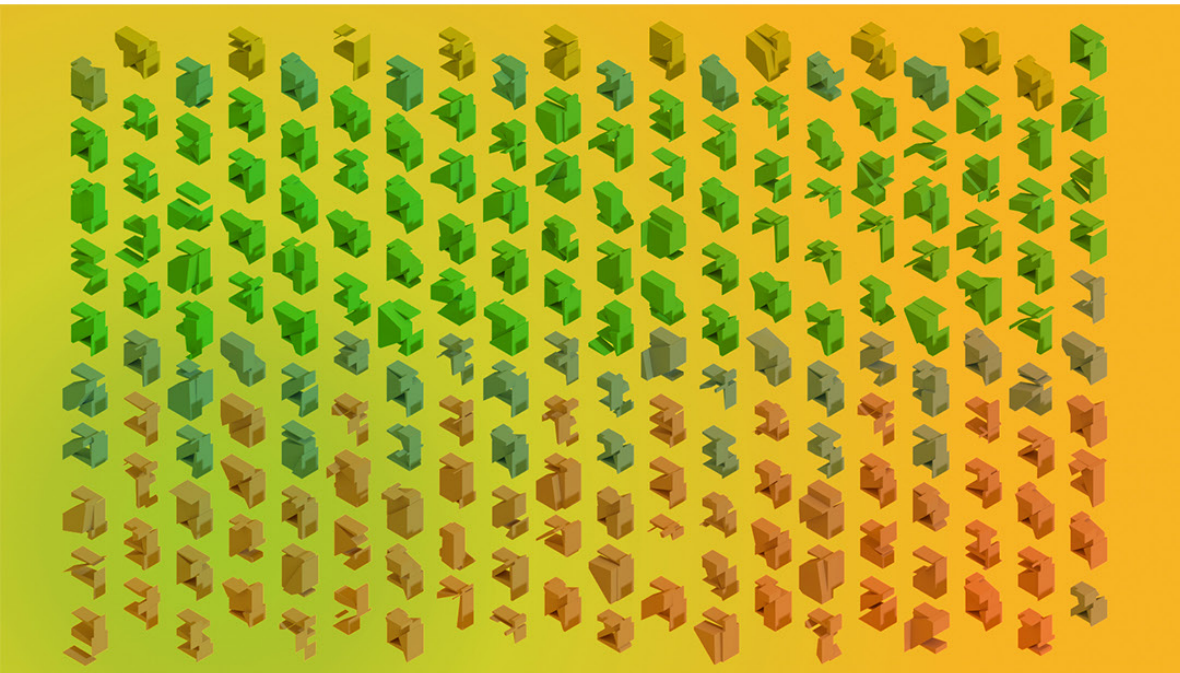
041. /// Captura de la v05. Muestra una evidente convergencia.

La v05, que ya incluía las adiciones de la v06 generó convergencia en la población, concluyendo en dos individuos extremadamente similares que copan más del 90% de la población como los más adaptados.

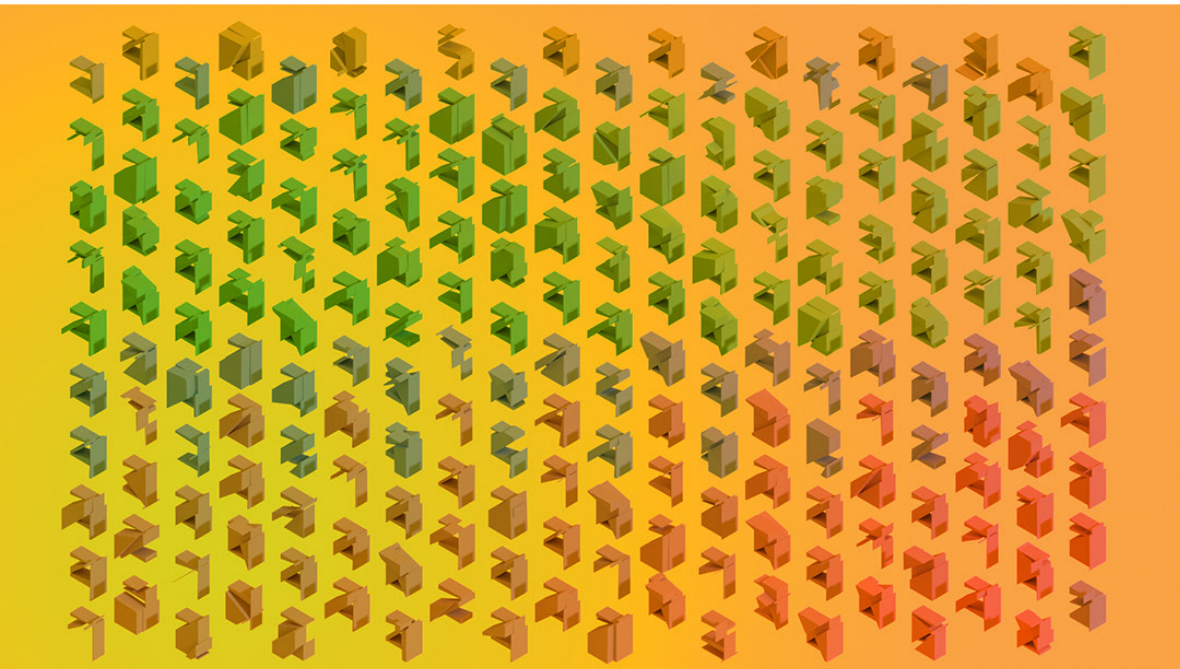


042. /// VG v06. Gen. 25 y 50. Selección en el frente de Pareto (próxima página).

v06 - Generacion 25.



v06 - Generacion 50.



Selección de individuos varios en el frente de Pareto



Prioriza área y baja exposición

EXTREMO



Centro del frente con área relativamente alta

INTERMEDIO



Centro del frente con área relativamente baja

INTERMEDIO

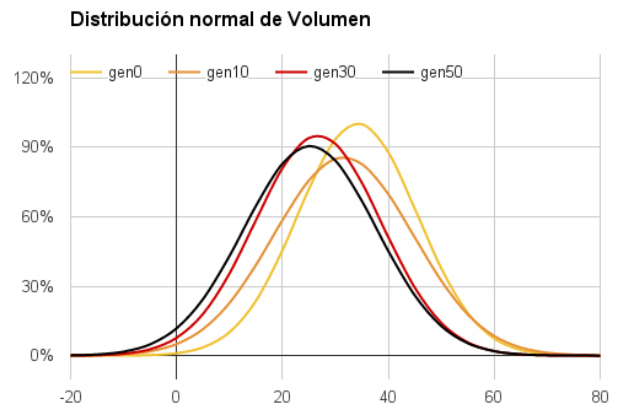
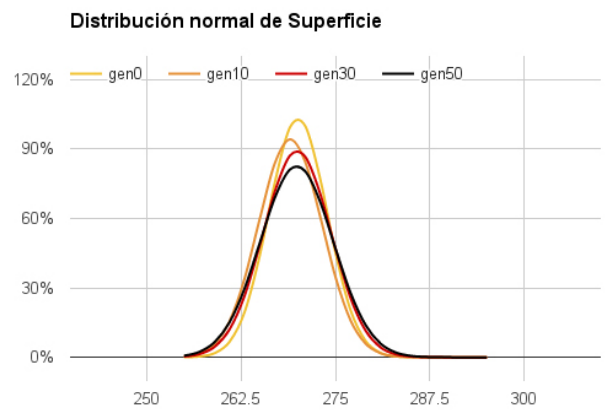
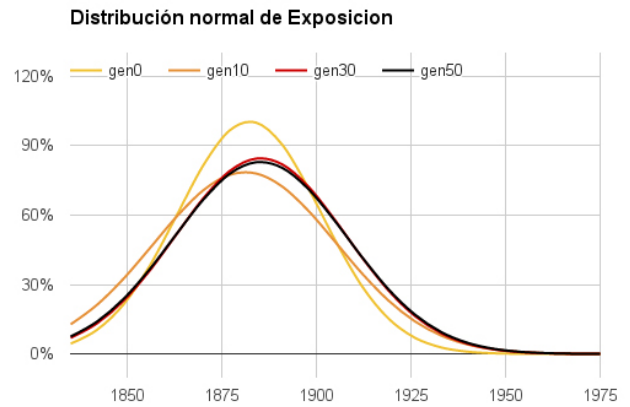


Prioriza volumen y baja exposición

EXTREMO

- Se advierte una mejora considerable entre las generaciones 10 y 30, mientras que entre esta última y la 50 las diferencias son menores aunque todavía valiosas.
- En los tres parámetros de adaptabilidad (exposición, volumen y superficie) se aprecia la disminución de la altura de la curva normal. Esto se debe al aumento de miembros en los extremos, hecho que denota una población variada y rica, alejada de la convergencia.
- La adaptabilidad respecto al volumen es la que representa más mejoras en el rango de 0 a 50 generaciones, siendo posible que los otros parámetros hayan alcanzado un estado óptimo muy rápidamente sin margen de mejora notable. La gráfica muestra como a medida que las generaciones avanzan la curva de distribución se desplaza a la izquierda, resultado adecuado si tenemos en cuenta que se busca minimizar dicho volumen.
- Cabe resaltar que tanto en volumen como en exposición, la generación 10 ha logrado una curva de distribución más baja. Esto probablemente se debe a que en esa fase la población aun es “relativamente aleatoria” y goza de mucha diversidad. Una vez la población se ha ramificado en determinados objetivos de adaptabilidad comienzan a repetirse los individuos más exitosos que provocarán una ligera tendencia hacia la convergencia. No obstante, en todos los casos la generación 50 ha logrado rebajar la altura de la generación 30, demostrando la correcta tendencia. En las sucesivas partes de este experimento se analizará mayor número de generaciones y se prestará especial interés a este fenómeno.

v06	gen0	gen10	gen30	gen50
mean	1,882	1,881	1,885	1,885
standard deviation	19	24	22	23
mode	1,872	1,870	1,873	1,851
median	1,880	1,877	1,882	1,883
max	1,942	1,951	1,956	1,943
min	1,847	1,843	1,846	1,841



Responsividad y Autoconsciencia

Las siguientes incorporaciones persiguen aproximarse aún más al ideal del proceso biológico, y al mismo tiempo alejarse de un sistema automático y autista, inconsciente de sí mismo a pesar de su inmensa complejidad. Las adiciones en este sentido son extremadamente simples, muy alejadas de los niveles que requeriría una situación realista y su función es meramente la de comprobar y corroborar su viabilidad en el proceso y definición propuestos.

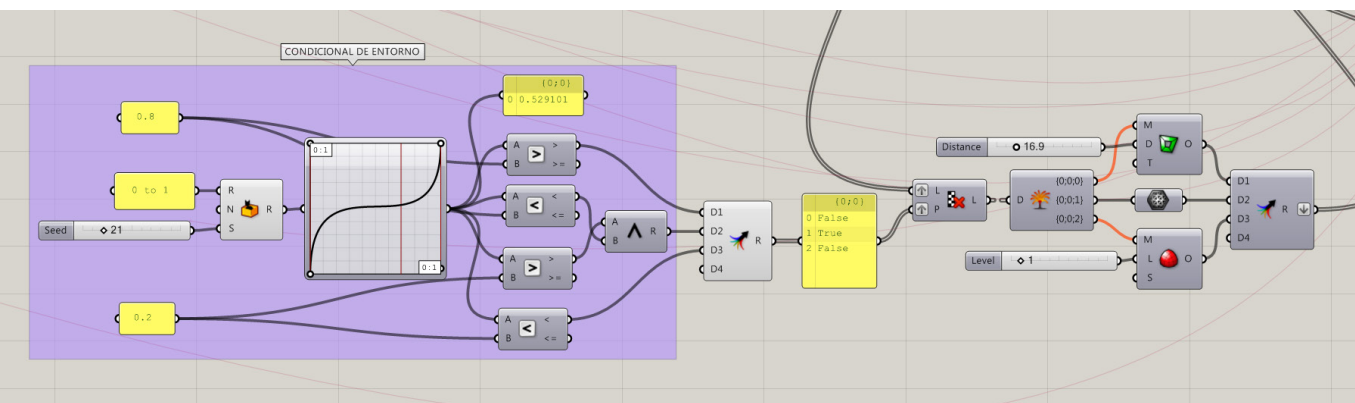
Por ese motivo, de manera simplificada y abstracta se añaden comportamientos que podrían hablar de 'conciencia propia', responsividad, estímulos, o 'extended phenotype'. A nivel de definición implica dos cambios:

1. Referencia externa o responsividad.

Se incorpora la respuesta geométrica de los individuos mediante un número aleatorio que puede derivar en tres modificaciones: la aparición de perforaciones, la duplicación del número de las caras, y la omisión de cambio alguno. El número aleatorio está modificado mediante una gráfica para garantizar que lo más común sea que no se produzca ningún cambio.

Si por el contrario, se da la improbable situación de que el número aleatorio coincida con los valores que activan las modificaciones, estos se han diseñado para que sean favorables a los criterios de adaptabilidad, por tanto aquellos individuos que se ven influenciados por esta situación externa e improbable deberían permanecer a lo largo de las generaciones extendiendo su influencia. A nivel conceptual, este estímulo puede considerarse como una situación climática o geográfica excepcionalmente buena propiciada por el contexto.

043. /// Captura de referencia externa a través de componente de aleatoriedad y una gráfica de probabilidad.



2. Referencia Interna o autoconsciencia.

044. /// Captura de referencia interna. La definición se autoevalúa y cambia en base a un condicional.

Con la incorporación de esta característica se busca que los individuos no sean únicamente el producto de una serie de reglas combinables, sino que su propia condición repercute en el resultado de esos productos. Esto obliga a realizar un análisis interno en la propia definición que afecta a posteriores componentes, a tomar conciencia de la situación presente en medio del proceso evolutivo y generar una respuesta en base a ella.

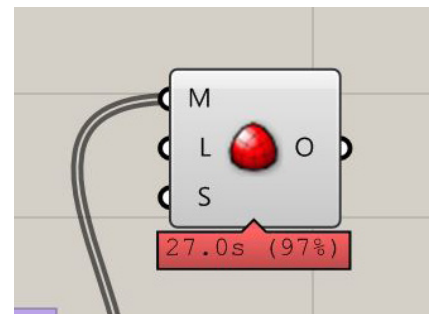
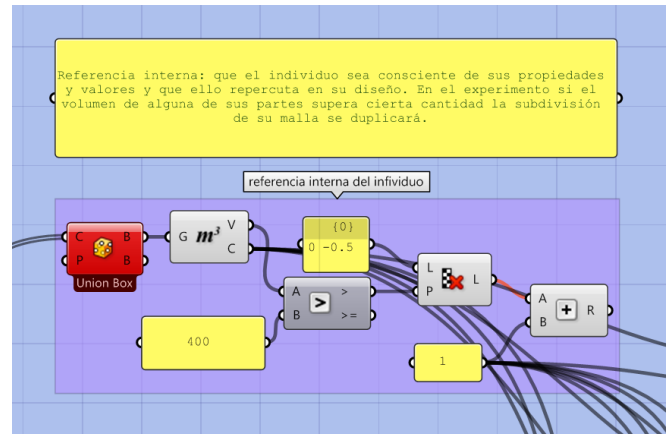
En el experimento, si el volumen de alguna de sus partes supera 400 unidades cúbicas se aplicará la subdivisión de su malla. Al igual que la referencia externa es un cambio orientado a los criterios de adaptabilidad para garantizar su permanencia (y su observabilidad!) a lo largo de las generaciones. Este condicionante alberga gran potencial para restringir determinadas situaciones o direcciones del proceso evolutivo y posee similitudes con el concepto de 'hard constrain' o 'landscapes' negativos (cap. 3.2.1). Mientras que los últimos castigan el algoritmo evolutivo alejándolo de determinadas zonas, la referencia interna permite a la definición dirigirse hacia las zonas positivas de manera proactiva.

VG v08

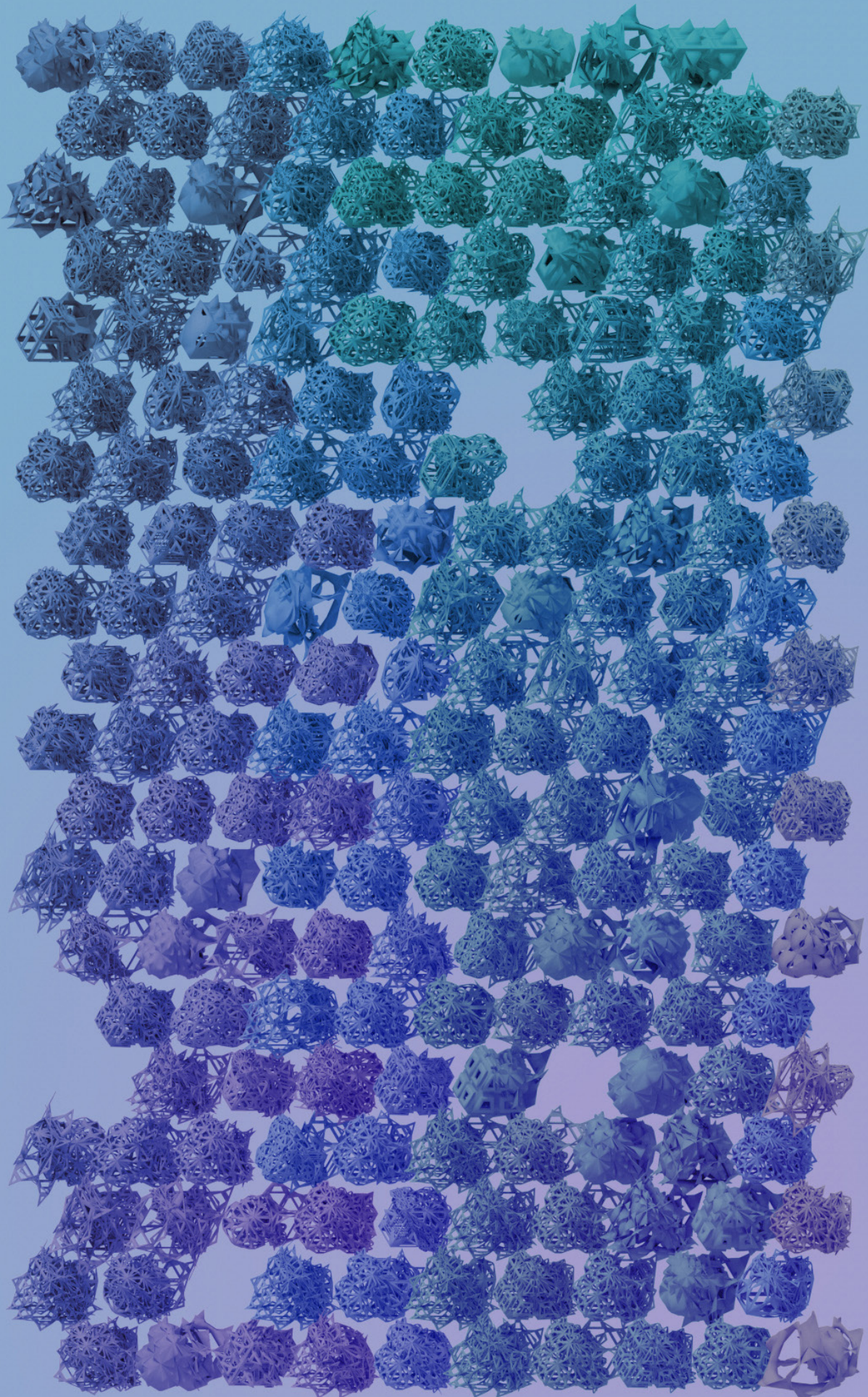
- Se ha observado que el tiempo de cálculo por individuo es incremental. Los primeros individuos se situaba por debajo de 100ms mientras que los últimos alcanzaban valores superiores a 600ms. Esta acumulación de tiempo se debe al cálculo del frente de Pareto en un histórico de población en aumento y puede ser desactivado si se apagan las vistas de: elite, frente Pareto e histórico.
- Un error en el cálculo de volúmenes en esta versión del experimento llevó a una población cuyos individuos habían doblado sus caras en la mayoría de los casos. Como se buscaba que el factor externo fuese el único que provocase esta tendencia el ejercicio tuvo que ser reconfigurado y repetido. Para las próximas partes, los genes que detecten gran volumen en una de sus partes del cuerpo reducirán dicha parte en un 50%.
- Añadir grueso en ciertos tipos de mallas generaba un error que causaba la desaparición del individuo. Por esta razón se eliminó el componente para la siguiente prueba.

045. /// Tiempo de ejecución del componente de subdivisión. El tiempo invertido en generar la geometría tridimensionalmente es superior al de los cálculos útiles de creación y recombinación de individuos.

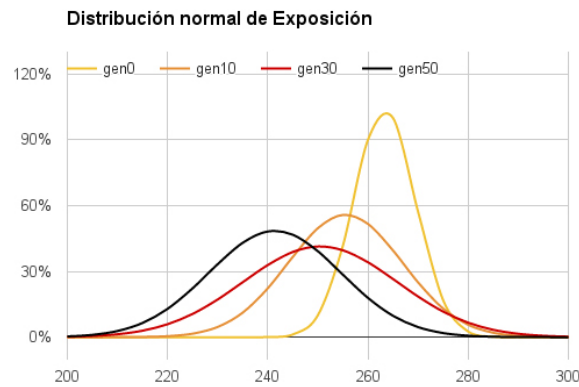
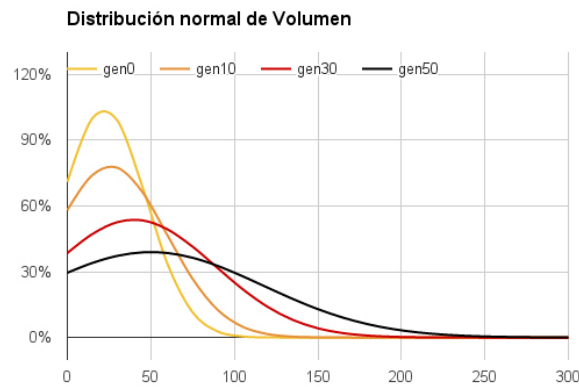
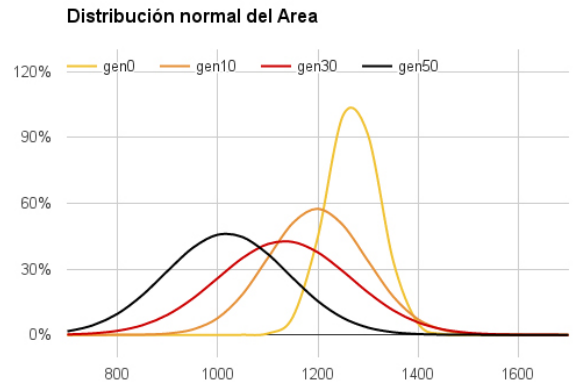
La integración de subdivisiones y un nivel más de genes superpuesto supuso un aumento exponencial que repercutió muy negativamente en el potencial de proceso computacional.



046. /// VG v08 (próxima página).

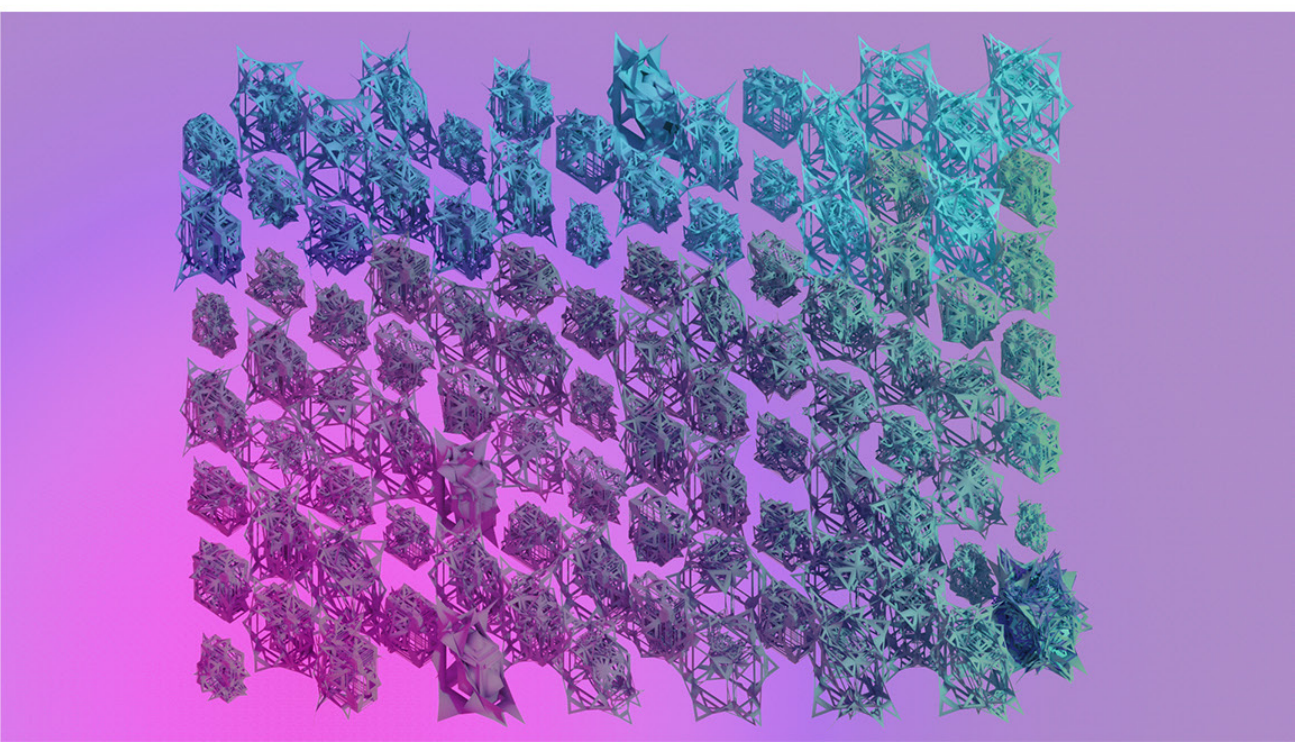
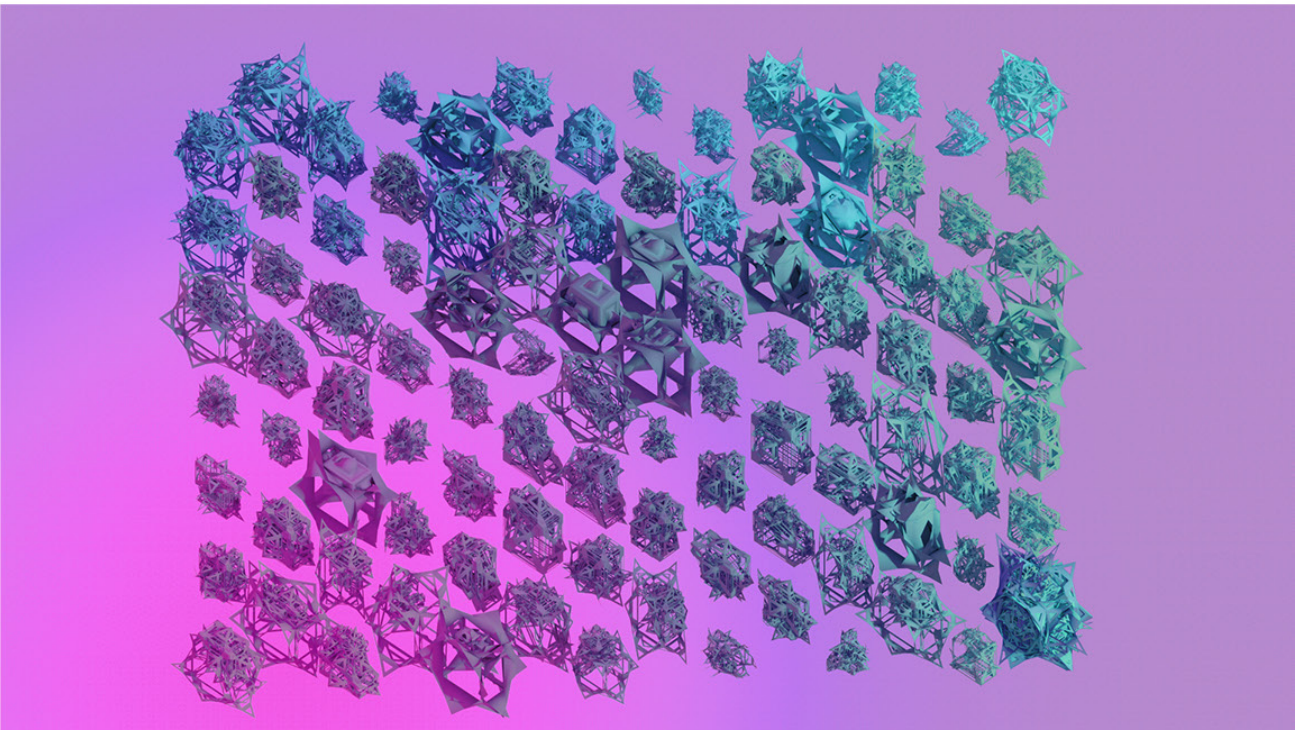
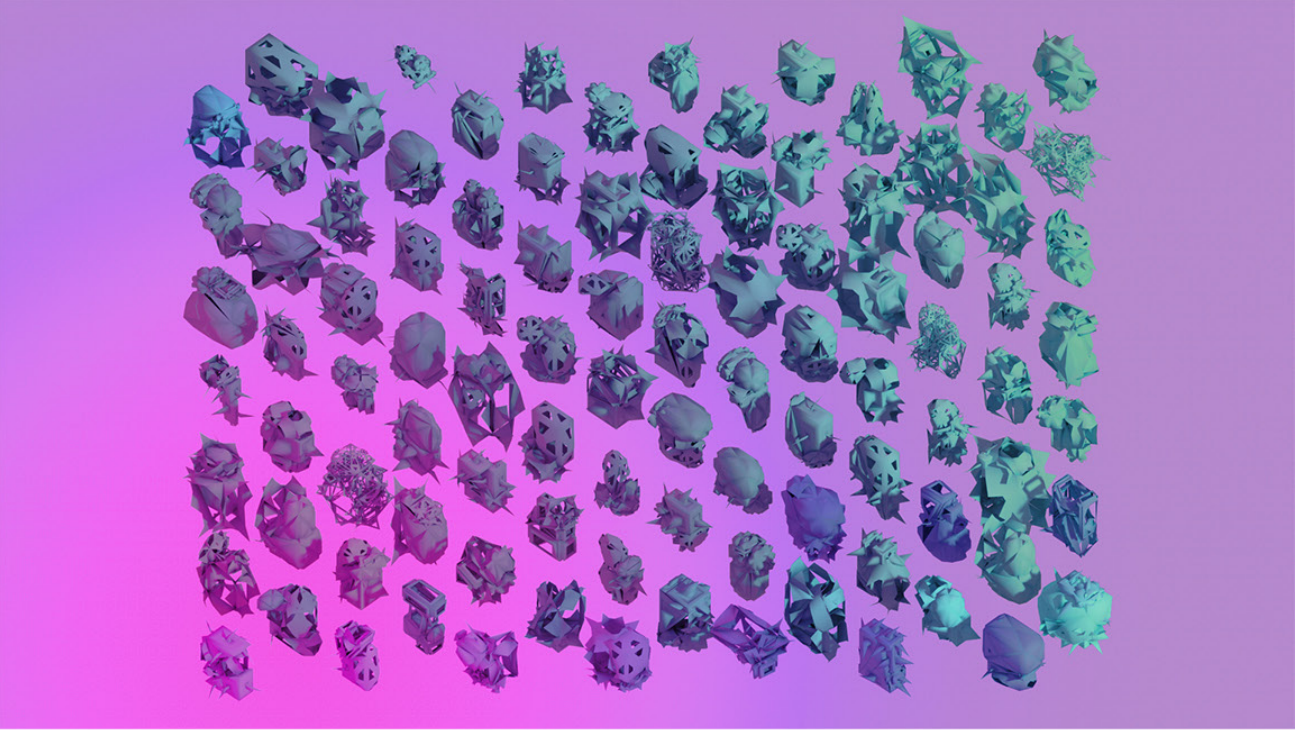


- Incorpora todos los cambios a raíz de la prueba VG 008.
- El test de esta prueba se ejecutó con una población de 100 individuos debido a que números más altos producían errores en la computación y el software.
- Se ejecutó una única generación aleatoria con 300 individuos para apreciar la posible heterogeneidad dentro de una población.
- En las gráficas de área se aprecia una disminución de los valores. Esta tendencia es correcta a pesar de que se buscaba maximizar el valor, debido al “juego de números” que hay que llevar a cabo para que Octopus maximice valores. La considerable separación entre las diferentes curvas de las generaciones indican que aún había margen de mejora. Se entiende que la evolución es correcta debido a que la mínima sigue disminuyendo a lo largo de las generaciones mientras se mantiene la máxima a pesar del descenso de la media.
- La gráfica de volumen denota las mismas cualidades y virtudes que las de área (pero a la inversa debido a que se busca maximizar el valor). Destaca por el aumento constante de la desviación estándar, favoreciendo la riqueza de la población.
- La gráfica de exposición muestra los mismos rasgos favorables, no obstante, pequeñas fluctuaciones entre la desviación y los máximos de la gen30 y la gen50 prevén pocas mejoras en este aspecto. La media sin embargo, sigue minimizándose correctamente.
- La gráfica de número de caras muestra un progreso favorable pero un estancamiento a partir de la de gen30. La población probablemente no mejoraría en este aspecto si se continuase su evolución.



V09	gen0	gen10	gen30	gen50
mean	263	256	250	241
standard deviation	6	11	15	13
mode	258	262	222	238
median	264	257	252	242
max	276	276	278	277
min	242	225	218	214

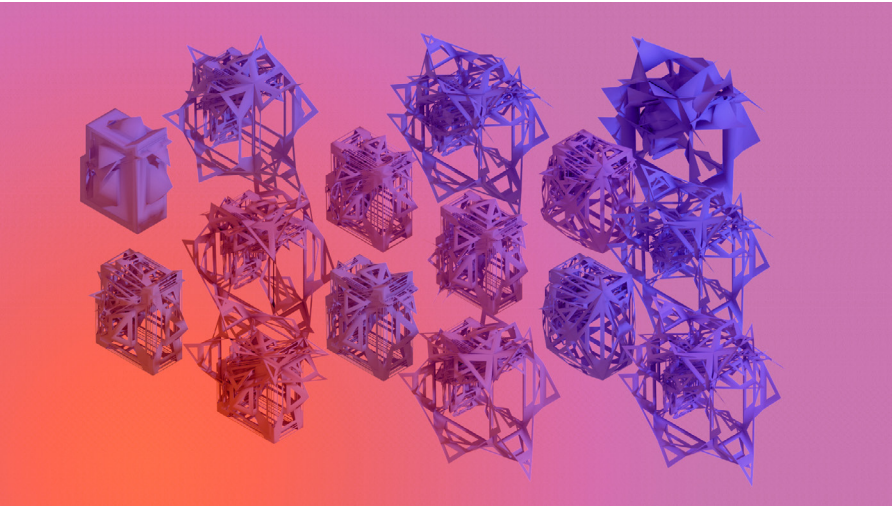
Merece notable mención el hecho de que la evaluación de la primera generación (aleatoria) parezca más convergente que las sucesoras, más aun cuando la convergencia suele darse en procesos evolutivos longevos. Esto se



VG v10

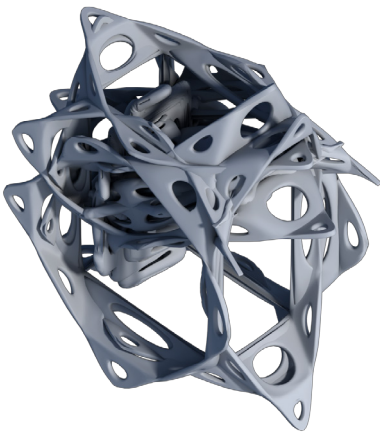
Se realizó una última prueba configurando diferentes aspectos del algoritmo evolutivo sin añadir características a la definición de GH con el fin de explorar en mayor detalle las posibilidades geométricas de la última versión:

049. /// VG v10. Población: 15. Generación: 300.



1. Evolucionar una población relativamente pequeña (15 individuos) durante (300 generaciones (las anteriores solo habían alcanzado 50)). Los resultados obtenidos concuerdan con los esperados: la población alcanza una situación de emergencia donde solo se distinguen dos familias de individuos, levemente alteradas por las mutaciones, y donde la diferencia predominante es el número de caras (característica que proviene de la simulación de factores externos al genotipo original).

050. /// VG v10. Detalle de individuo.



2. Profundizar en único individuo añadiendo grosor y subdivisiones a la malla que lo compone para propiciar un aspecto más realista y pseudo-orgánico. Hipotéticamente, sin carga computacional todos los individuos tendrían este nivel de detalle.

3. Generar una población inicial de 300 individuos (frente a las 100 de sus precedentes) para observar nuevos y diferentes individuos, apoyando la teoría de una población saludables y variable.

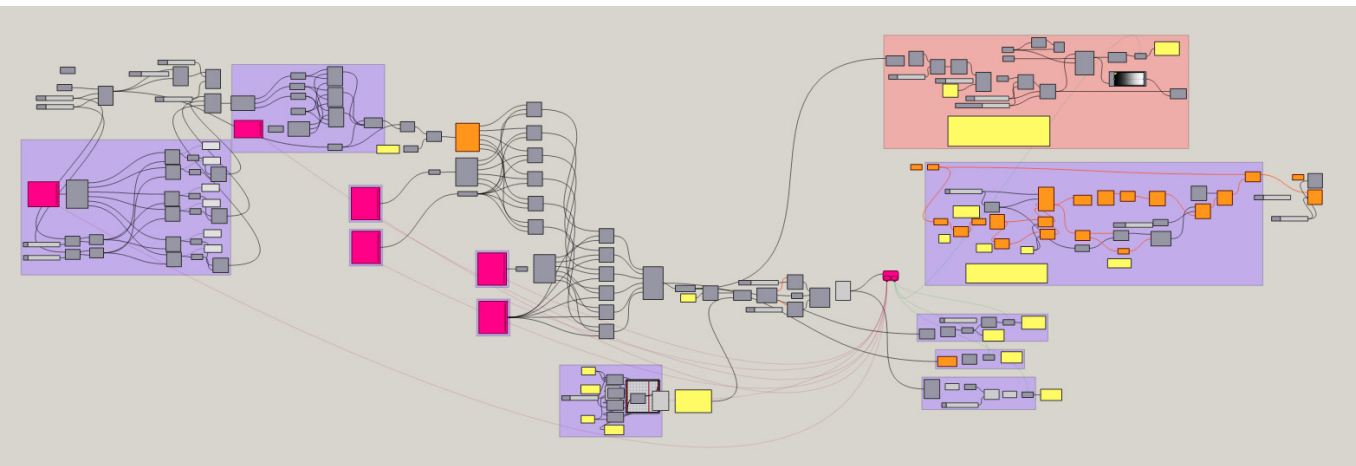
051. // VG v10. Población: 300. Generación: 0. (próxima página).



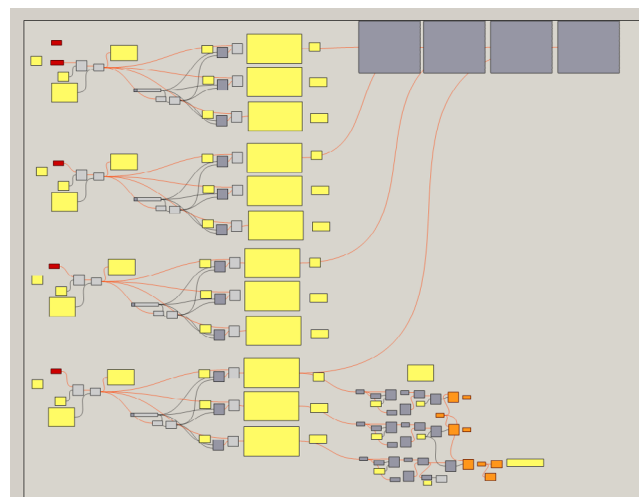
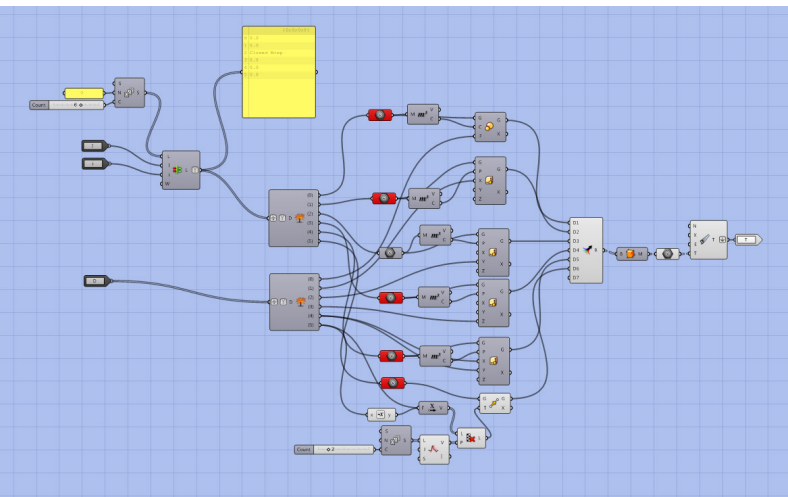
Gracias a la incorporación de los 'clusters' el tamaño de la definición es manejable y comprensible. Su complejidad estriba en el correcto flujo de la información y no en una cantidad abrumadora de componentes. Es por ello considerablemente eficiente en el tiempo de procesado, dependiendo únicamente de los genes incorporados en los clusters y la geometría que generan.

Al igual que en los anteriores experimentos, estas definiciones se pondrán a disposición en la carpeta indicada al comienzo del capítulo (cap. 4).

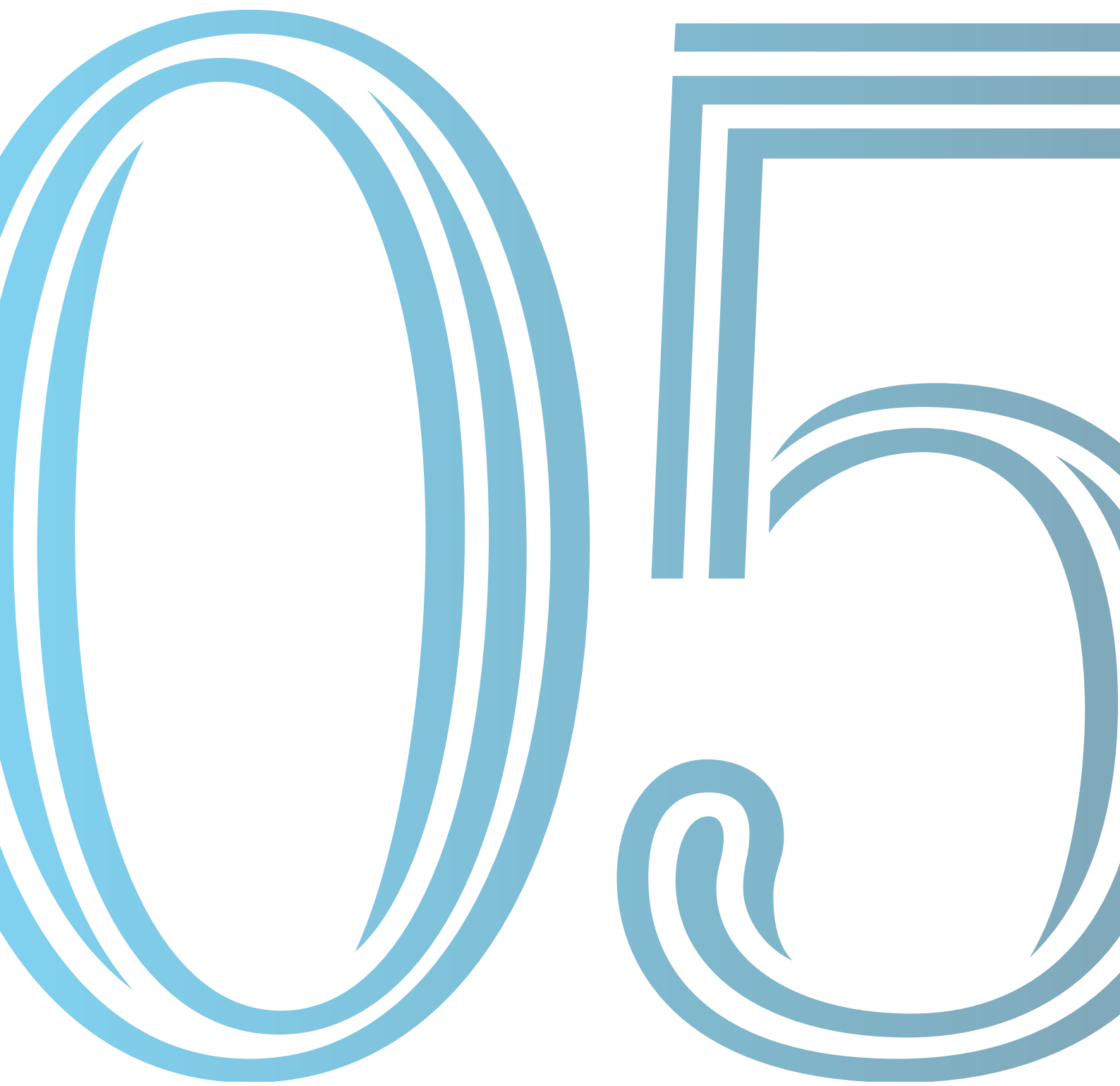
052. /// Captura de la definición general. Aparentemente sencilla gracias al uso de clústers.



053. /// Captura del 'cluster' (fondo azul) y de la redistribución de datos para hojas de cálculo.







5. CONCLUSIONES: IMPLICACIONES Y FUTURIBLES

De cómo lo emergente -hoy, digital y paramétrico- puede convertir la arquitectura en un elemento más de la naturaleza, capaz de crecer con flexibilidad e identidad; de cómo nuevas y peligrosas maneras de evolucionar y desarrollar los proyectos, repercuten en un arquitecto diferente, capaz de crear contexto y de adecuarse con mayor integración a un entorno complejo y dinámico; y de cómo este contexto puede influir en el hábitat humano, creando nuestra propia selección natural, cerrando así un círculo donde lo natural y lo artificial, lo salvaje y lo diseñado, lo biológico y lo digital, se mezclan de maneras inauditas.



La situación medioambiental expuesta al comienzo de esta tesis ha puesto de manifiesto la necesidad de un cambio de paradigma en la manera que el arquitecto aproxima la construcción de su propio hábitat en el planeta (y su comportamiento en muchas otras áreas). Macetas, jardines y parques no son sino un pobre sucedáneo, una imagen falsa y estática, que seguramente crea más añoranza que consuelo; y aunque algunas intervenciones dejan entrever un gran potencial, estas son una minoría. Este cambio, no es solo retornar -casi retroceder- a una arquitectura vernácula o primigenia (que por otro lado sería incapaz de sostener el actual ritmo de producción, consumo y población), sino la búsqueda y aceptación de una naturaleza artificial, propia del ser humano, que permita una mayor comunión con nuestro entorno. La naturaleza como producto, esta tocando a su fin en paralelo con la progresiva naturalización de lo artificial. Animar lo artificial y construir lo natural son ahora dos sentidos en la misma dirección. Si el propósito último es una naturaleza libre que invada y crezca en nuestras ciudades, la arquitectura de las mismas debe ser a su vez natural para establecer un dialogo rico e integrador, porque deberá potenciar y responder a la vida que se entreteje entre ella, provocando situaciones espontáneas que ya no pertenecen al ser humano, sino al producto de su naturaleza y diseño. Todo lo artificial y digital, desde unas líneas de software hasta un plan urbanístico, pasando por un objeto industrial y un proyecto arquitectónico, forma parte y es motivo de la máquina evolutiva de Darwin, de un concepto de lo natural más amplio (cap. 2.1.3).

A través de esta investigación, donde se parte de unos objetivos establecidos que buscaban entender el panorama actual de los diferentes campos

susceptibles de influenciar la arquitectura, se ha llegado a conclusiones que, apoyadas en testimonios de arquitectos, obras y experimentos, sustentan el contenido de la misma. La importancia de las palabras en cada uno de los ejemplos encontrados es la demostración de que la arquitectura puede conducir cada vez más, hacia la elaboración de la naturaleza cooperativa de nuestro futuro con la confianza de que será un lugar en el cual podremos habitar sin violentar nuestro entorno y adecuarlo positiva y propositivamente.

5.1. Emergencia digital: **patrones aleatorios y sistemas** **procedurales**

La emergencia hace referencia a las propiedades y procesos de sistemas no reductibles a las partes que lo componen: “el todo, es más que la suma de las partes”. La emergencia es la causante de que la propia humanidad haya desarrollado herramientas capaces de crear nuevas emergencias, de que lo digital pueda imitar lo biológico, de que la arquitectura pueda adaptarse a un nuevo nivel de complejidad. La emergencia es la culpable de lo complejo y de los sistemas que la rigen (cap. 3).

Se ha justificado a lo largo de la tesis, a pesar de su obvia repercusión en el panorama actual, la explosión de lo digital durante las últimas décadas y su evidente potencial. Entre la vorágine de innovación, se ha destacado el software GH (Grasshopper), con el pretexto de que ha logrado originar por sí mismo, una nueva y pequeña emergencia de diseño paramétrico, gracias a las virtudes mencionadas: fácil accesibilidad, una gran comunidad, un ecosistema rico, y su carácter experimental. Al no requerir programación, queda al alcance de una cantidad de público considerablemente mayor. Este hecho, este factor, es el que posibilita la emergencia de la arquitectura digital. No es que la arquitectura digital sea nueva, ¡para nada! lo que ocurre es que no estaba al alcance de todos, de las masas arquitectónicas. Grasshopper ha contribuido en buena parte a provocar la emergencia de la arquitectura paramétrica que quizá posibilite esa masa crítica a la que hacía referencia Richard Sennet (cap. 2.2.5).

La programación visual que ofrece hoy GH no es más que un tímido comienzo, proto-software, de lo que está por venir. Proyectos como el videojuego procedural de No Mans Sky⁸⁷¹, o la tecnología de partículas de Euclidean⁸⁷² avisan de un futuro que no hace visos de ralentizar su ritmo. Este ritmo frenético repercutirá en la arquitectura en forma de exceso, de potencial. La complejidad, el generar un exceso de geometría (adaptable, por su parametriso), un exceso de oportunidades y posibilidades que de la seguridad de haber propuesto y elegido sabiamente. Incluso las ideas de siempre, pueden ser llevadas a nuevos niveles (cap. 2.2.3, 2.2.5 y 2.4.3).

Y si bien es cierto -en parte- que lo complejo, lo infinitamente adaptable, tiende de manera natural a lo sistemático, a la subdivisión, a la multitud de partes interrelacionadas que forman parte de un todo más grande; el arquitecto ha de servirse de lo orgánico y unificador, y al mismo tiempo ver que no hay parametriso (y por ende, tampoco relación) en el individuo, en

⁸⁷¹ Playstation. “No man's sky gameplay trailer.” *Youtube*. Consultado 14 de febrero, 2016. <https://www.youtube.com/watch?v=nLtmEjqzg7M>

⁸⁷² Euclideanofficial “Unlimited Detail Real-Time Rendering Technology Preview 2011 [HD]”. *Youtube*. Consultado 14 de febrero, 2016. <https://www.youtube.com/watch?v=00gAbgBu8R4>

el objeto aislado, en las excepciones, en lo particular⁸⁷³. Es posible también que lo paramétrico, ese concepto tan puro, tan matemático y geométrico, simplemente sea adaptable a cualquier condición, y que en su universalidad también radique su falta de intención. Es muy probable que lo paramétrico no sea suficiente para definir un estilo arquitectónico, sino un multiplicador unificador de todos los anteriores (cap. 2.3.3).

Abordando la discusión sobre los estilos, se ha evidenciado a lo largo de la tesis que las etiquetas y agrupaciones resultan especialmente esquivas y engañosas dentro de una arquitectura altamente dependiente de procesos internos y herramientas usadas. Se ha elegido “ignorar” la tipología orgánica, por considerarse meramente como una modificación post-proceso, e incluso se ha puesto en duda, la veracidad de aquellos términos que diferencian dos de los grandes bloques de la arquitectura bio-digital: lo morfodinámico y lo morfogenético. Se considera que un sistema de agentes también puede dar lugar a emergencia (jerárquica incluso) siempre y cuando se establezca un registro en el tiempo de esa dinamicidad. ¿Acaso no es el autómatas celular o la máquina universal de Turing un registro del movimiento de la interacción de los agentes y la información? Si así fuese ¿es el ‘Conway’s Game of Life’ un sistema de ‘swarm intelligence’ (dinámico) o un algoritmo genético? De ser así, la diferencia entre morfogenética y morfodinámica sería inexistente, y el único valor capaz de agrupar los procesos generativos o sistemas complejos a tener en cuenta sería la capacidad de acumular capas de información que pudiesen dar lugar a nuevos niveles jerárquicos, a la emergencia. Se plantea –que no se resuelve– esta cuestión para futuras teorías. ¿Han de considerarse morfodinámicos únicamente aquellos procesos en tiempo real, responsivos, que no son capaces de almacenar o verse afectados por estados anteriores? (cap. 3.1.3).

Se debe ser particularmente insistente en el término de lo procedural, no solamente por el potencial del mismo, sino por lo que significa en oposición a otros. Lo aleatorio, lo caótico, no producirá nada de interés en la mayoría de los casos. Es más, muchos de ellos producirán incompatibilidades, imposibilidades disfuncionales, diseños pobres. Las fórmulas matemáticas del algoritmo de lo procedural (sean cuales sean) garantizan un resultado basado en sus relaciones: diseñado, pero también inesperado por su complejidad (cap. 2.2.3).

*You’ve got lots of simple rules, each has a cause and effect, but you find it impossible to predict what are they going to result in... even with just like half a dozen rules, suddenly becomes really hard to predict what is going to happen*⁸⁷⁴. SEAN MURRAY

La generación de lo aleatorio siempre ha suscitado debate: Wagner y Altenberg aluden a la analogía del mono y la máquina de escribir de Émile Borel, argumentando que tiene más probabilidades de conseguir escribir un texto

⁸⁷³ No por ello, han de desaparecer las soluciones o decisiones puntuales, conscientes y de autor.

⁸⁷⁴ Gamespot. “How does no man’s sky actually work? reality check” Youtube. Consultado 28 de mayo, 2016. <https://www.youtube.com/watch?v=ZVI1Hmth3HE>

de Shakespeare que si se le diese un papel y lápiz. Es una metáfora adecuada y útil en señalar el problema de la relación entre el genotipo y el fenotipo, y de como una relación directa facilita la búsqueda de un resultado (cap. 3.1.3). El arquitecto (el ser humano), no puede permitirse el lujo de abogar a la aleatoriedad como origen de procesos y resultados adecuados. Simplemente, hay demasiado ruido. Han de establecerse relaciones, simplificaciones y jerarquías capaces de emerger y sorprender. Por tanto, deben crearse reglas que se combinen para generar muchísimos resultados, tantos que no podamos predecirlos, pero a su vez alberguen lógica interna. ¿Qué es construible y que son imposibilidades? ¿Cuán eficiente es iniciar la emergencia desde la completa aleatoriedad? De las reglas de Stephen Wolfram, la inmensa mayoría no producían ningún interés, solo unas pocas lograban componer juegos geométricos o fractales, y solo una desató un patrón completamente aperiódico. Para esta empresa, la naturaleza y el estudio de la geometría son de vital importancia para no perderse en el infinito matemático. Al mismo tiempo, también se espera que la percepción humana de lo no-periódico o lo complejo se desarrolle con el tiempo, y que resulte más fácil discernir y comprender patrones que ahora no son considerados simples en absoluto. La exposición paulatina a sistemas complejos probablemente desembocará en nuevos sistemas de mayor complejidad, apoyados también por algoritmos más capaces, que puedan identificarlos (cap. 3.1.2).

Por último, ante semejante ebullición e intencionalidad de emergencia digital, el arquitecto ha de mantenerse atento ante las casualidades y las oportunidades: los errores ('bugs') y fallos del software pueden dar lugar a "happy accidents", donde un proyecto totalmente inesperado emerge del caos para formalizar algo totalmente sorprendente. En la Teoría del Caos el orden puede aparecer espontáneamente a partir de lo aleatorio, y pequeños cambios pueden desencadenar dramáticas consecuencias. ¿Puede soñarse con una arquitectura accidental? ¿puede una parte de la arquitectura nacer de los "hopeful monsters"? Esta misma tesis ha dado cuenta en varias ocasiones que dichos sucesos son escasos pero reales (cap. 2.1.3).

5.2. Incertidumbre en el diseño e “hiperlocalidad”

Un mundo global interconectado ha generado la tasa de crecimiento más rápida jamás vista. Hasta la fecha, la innovación históricamente había aparecido en cantidades “manejables”, pero ahora los equipos de diseño son más grandes que nunca y se cruzan entre países y zonas horarias. La gran industria logra mantener este torbellino a través de la estandarización -componentes, extensiones de archivo, guías de regulación en varios campos...-: la industria produce en masa, pero no puede masivamente producir. Las situaciones individuales requieren de respuestas muy personalizadas o altamente abstractas, poco adecuadas al contexto actual, a la decisión adaptada. El diseño ha de abandonar la producción en masa por la customización masiva, una nueva era industrial que solo puede ser alcanzada gracias a las nuevas tecnologías de fabricación CAD-CAM y el software paramétrico y procedural (cap. 2.3.1).

El presente expone el esplendor de la era de la información y el hayazgo de ese sistema perfecto e idílico capaz de analizar sistemáticamente en un proceso continuo e infinito: búsqueda de objetivos, identificación de problemas, previsión de cambios incontrolables de contexto, invención de estrategias alternativas, tácticas, secuencia de tiempos, evaluación de predicciones alternativas, juicio de análisis y monitoreo, ‘feedback’ de información para corrección de errores... (cap. 2.3). Aunque nos acerquemos a un estado ideal, las herramientas parecen aportar nuevas capas de complejidad ajenas a la comprensión del todo, haciendo el sistema recursivamente inalcanzable. Y surge la duda de si quiera es deseable. El arquitecto, ha de mantenerse suspicaz ante la “parametrización del todo”, y recordar las palabras de Rittel y Webber sobre la optimización de problemas sociales -los ‘Wicked Problems’ (problemas retorcidos)- (cap. 3.3.3).

Optimization relies entirely on being able to quantify the goal we seek, but it then ignores all other considerations. Computational methods in general tend to lend themselves to easily quantifiable phenomena, but it may often be the case that these are not the most important. Brian Lawson terms this a ‘numerical measuring disease’, in which we might be blinded to what is really crucial by that which is simply easy to measure⁸⁷⁵. RITTEL Y WEBBER.

En este sentido, el experimento 4, más allá de sus deducciones numéricas respecto al proceso evolutivo, ha demostrado que la “númerología” puede presentar irregularidades y relaciones tendenciosas. Aun cuando la fórmula de Cerdà se diese a principios del s. XX, no puede ser ignorada como un claro ejemplo de proto-parametrismo arquitectónico (cap. 4.4).

Los ordenadores no están exentos de peligros potenciales. Existe una

⁸⁷⁵ Rittel, Horst, Webber, Melvin, “Dilemmas in a General Theory of Planning”, *Policy Sciences*, 4, Scotland, 1973. pp. 155-169.

tendencia hacia el uso de facultades simples -obvias-, y a la falsa sensación de optimización de un diseño que puede haber sido fundamentalmente mal concebido, creando un halo distorsionador de soluciones cuasi divinas. De direccionar el criticismo hacia el producto final en lugar de la examinación del proceso, de concentrar la opinión en aspectos del problema que pueden ser fácilmente cuantificables.

Por supuesto, hay un cierto principio de incertidumbre en el diseño de sistemas complejos, que no puede ser negado^{876/877}. Igualmente, obviarlos puede ser tan nocivo como el descarte de todas las técnicas aquí mencionadas y su repercusión en el diseño. ¿Cómo puede la arquitectura, ahora que es conocedora de lo paramétrico y lo evolutivo, cometer la imprudencia -y la soberbia- de no someter a dichos procesos sus proyectos para valorar -y escoger- las posibles variables? La figura del arquitecto es sabedora de que un enunciado puede ser resuelto por decenas, sino centenares de soluciones. Cada una de esas estrategias y/o aproximaciones posibles, ofrece de nuevo múltiples variaciones... ¿Cómo puede el arquitecto clásico asegurarse de haber comprobado todas esas opciones? ¿Cómo puede convencerse de haberlas descubierto siquiera? (cap. 2.3.3).

Se ha tratado el tema en numerosas ocasiones y se considera que con las medidas adecuadas, y a través del uso de los experimentos aquí desarrollados, la realidad actual puede afrontar y solventar dichas problemáticas, abordando así el diseño por variación y optimización. Lograr un análisis exhaustivo y cuantificativo de cada sitio permite el desarrollo de proyectos hiperlocales usando herramientas universales. La posición del arquitecto debe ser para con la elección y el uso de la herramienta. Si objetivamente sirve para algo, o proviene de otro sitio, el arquitecto puede y debe mutar su uso para su beneficio y enfatización de lo subjetivo en su propuesta arquitectónica. La adaptabilidad y variación de las herramientas paramétricas junto a los criterios de 'fitness' atribuibles al algoritmo evolutivo -y basados en las reglas del lugar, claro- permiten una arquitectura abstracta que se adecua a cualquier contexto. Al igual que otras especies biológicas con subgrupos diseminados a lo largo de todo el mundo, cambiando sus características pero no su esencia, pueden diseñarse proyectos generadores de individuos, cada uno diferente en respuesta a su entorno (cap. 3.3.3).

The Extended Architect: The approach so far described implies some changes in architects' working methods. The generic approach already adopted by many designers has to be made explicit, rigorous, and stated in terms which enable a concept to be expressed in genetic code. Ideally this information could be deduced by the computer from normal work methods without any conscious change

⁸⁷⁶ Mech, J. "Design Under Uncertainty." *Journal of Mechanical Design* 134. 2012. Consultada 11 de enero, 2014. <http://mechanicaldesign.asmedigitalcollection.asme.org/article.aspx?articleid=1484821>

⁸⁷⁷ Hanna, Sean, "Levels of Uncertainty in Design." *SGArticles*. Abril, 2013. Consultada 11 de enero, 2014. http://smartgeometry.org/index.php?option=com_content&view=article&id=232%3Alevels-of-uncertainty-in-design&catid=45%3Asgarticles&Itemid=151

being necessary. Architects have to be very clear about the criteria for evaluating an idea, and prepared to accept the concept of client -and user- participation in the process. The design responsibility changes to one of overall concept and embedded detail, but not individual manifestation. Overall the role of the architect is enhanced rather than diminished, as it becomes possible to seed far more generations of new designs than could be individually supervised, and to achieve a level of sophistication and complexity far beyond the economics of normal office practice. The obvious corollary of this is a diminished need for architects in the process of initial generation. While there would still need to be enough architects to guarantee a rich genetic pool of ideas, the role of the mass of imitators would be more efficiently accomplished by the machine. In this new context architects might have a role closer in concept to that of an extended phenotype, and I thus suggest the designation "extended architect"⁶⁷⁸. JOHN FRAZER

Reiterando las palabras de John Frazer, el arquitecto ha de convertirse en ejecutor de ideas y elaborador de procesos, abandonando por completo la idea de generar lo individual y concreto. Con todo, creará mayor controversia la intervención (y necesaria cuantificación para su parametrización) de términos propios del proyectar, tales como confort, interacciones sociales, estéticamente agradable, inmersión, multifunción, flujos... Términos arquitectónicos que se adentran en lo interpretable y lo personal, incluso lo intangible y lo metafísico. Por eso, se pone de relevancia la ausencia de ejemplos similares y se anima al gremio arquitectónico a aventurarse en la elaboración de una lista de "conceptos subjetivos arquitectónicos parametrizados", iniciándose y tomando como base los capítulos en esta tesis que dan pie a ello. Que la arquitectura no pueda acusarse de carente de método científico, de frustrante en su valoración, ha sido uno de los objetivos de esta tesis. Y si bien nunca podrá ser completamente transformada en números y estadísticas, ¿puede el parametriso y los 'Evolutionary Solvers' ayudar a aproximar la arquitectura hacia su carácter más técnico y objetivo? Todo parece indicar que sí (cap. 3.3.3).

5.3. Arquitectura Evo-Devo: simulaciones computacionales

Simply stated, what we are evolving are the rules for generating form, rather than the forms themselves. We are describing processes, not components; ours is the packet-of-seeds as opposed to the bag-of-bricks approach⁸⁷⁹. JOHN FRAZER

Con sus experimentos, la tesis ha procurado aproximar los nuevos procesos de Evo-Devo biológico a las técnicas digitales al alcance de la arquitectura. Con ello, se espera que sirva para dar un paso más hacia una arquitectura con identidad propia, viva, cambiante y adaptiva, capaz de generar la suficiente complejidad para definir un nuevo sistema arquitectónico (o urbano) que integre naturaleza y ciudad. Se espera que la arquitectura Evo-Devo plantee una alternativa a la dicotomía de ciudad y parque, de casa y maceta. Al mismo tiempo, la generación de variaciones evolutivas justifica y valida más que nunca el uso del parametriso en la disciplina arquitectónica.

A raíz de las investigaciones en Evo-Devo (especialmente cap. 3.2.2), los ejercicios desarrollados en el seminario de Emergencia de la AA de Londres (cap. 4.3), y las carencias identificadas en los algoritmos (cap. 3.3.1), se ha buscado y logrado nuevos procesos a través de lo digital que supongan un nuevo nivel de asociación con los procesos biológicos. Considerar los defectos y áreas de expansión de estos es fundamental para que la arquitectura u otros procesos de diseño puedan aproximarse paulatinamente a funciones verdaderamente naturales. Se resumen en esta conclusión los siguientes aspectos:

- La excesiva abstracción matemática, probablemente debido a la carga computacional. Se ha descrito como los ‘genpools’ o genes de una definición están compuestos por rangos numéricos que afectan la variedad de una modificación, cuando en realidad la modificación de los genes en el ámbito biológico implica qué modificaciones se dan -qué genes se expresan, no cuanto se expresan-. Esto también se aplica a una ausencia absoluta en relación a los ‘body plans’ y la dificultad de asociar la evolución en tiempo real a otros parámetros exteriores.
- La precariedad y estado embrionario de estas herramientas, aún muy alejadas de su madurez. La imposibilidad de habilitar ‘fitness negativo’ o ‘hard constraint’ que ha de simularse mediante valores negativos y condicionales dentro de la definición. Tanto Galápagos como Octopus se encuentra en versión WIP, piezas de software con poco respaldo e impacto económico. Producen errores con frecuencia y aún tienen un margen de mejora muy considerable de cara al usuario no-programador.
- La dificultad para plantear y mostrar ‘fitness landscapes’, agravado por

⁸⁷⁹ Frazer, John. *An Evolutionary Architecture*. Londres: Architectural Association, 1995. p. 99.

la problemática de la multidimensionalidad y la imposibilidad de leerla para comprender el problema.

El experimento 1 (cap. 4.1) ha afianzado la capacidad de Grasshopper para asentar unas bases sobre el modelado por malla (considerado especialmente útil por su universalidad, ligereza y capacidad de subdivisión) y aplicar las herramientas necesarias para producir emergencia a través de patrones y establecer relaciones genotipo-fenotipo. La gramática paramétrica -'switches'-, y la herencia de información -voxels-, se han simulado con éxito, siendo ambas estrictamente necesarias del proceso Evo-Devo.

De la misma forma, el experimento 5 (cap. 4.5) ha resultado especialmente exitoso en su intención por añadir y solventar las carencias del software existente y sus fallas en mimetizar de forma fiel los procesos actuales descubiertos en la ciencia Evo-Devo. La incorporación de módulos capaces de modificar el 'body plan' y un flujo de información que imite apropiadamente las propiedades de los genes reguladores ('homeobox genes') has servido para ratificar los ejercicios manuales al comienzo del seminario de Emergencia (cap. 4.2). Más concretamente, el 'body plan' o 'abstract diagram' parece disparar las posibilidades y variedades obtenidas por un algoritmo de forma exponencial (cap. 3.2.2). Al igual que en el Evo-Devo, la subdivisión permite abordar diferentes características y aptitudes para un mismo edificio, pudiendo alterar sus proporciones sin afectar a las mismas. Se espera y desea que estos experimentos sirvan de base para futuros ejercicios que profundicen en otros aspectos e incorporen elementos asociados exclusivamente a la arquitectura (cap. 4.5).

Por el carácter evolutivo de estos procesos y la cantidad de información que son capaces de generar -ya sea en datos o individuos- se convierte en necesidad el uso de técnicas que acompañen de manera coherente dichos procesos: específicamente el uso de estadística descriptiva (cap. 4.3) que permite el cuidado y correcta dirección de las poblaciones a lo largo de las generaciones. Las decisiones tomadas durante el proceso deben considerar el bienestar y variedad de todos sus integrantes para garantizar un final efectivo que se ajuste a la naturaleza del problema (cap. 3.3.3):

- Valorar cual es el objetivo a cumplir. ¿Se busca un individuo súper eficiente o se trata de crear una población diversa aunque de media elevada? Asociado a la arquitectura esta pregunta puede traducirse en la búsqueda de un único edificio (un rascacielos por ejemplo) o de varios (una urbanización, un grupo de viviendas heterogéneas pero que comparten similitudes). ¿Interesa alimentar el mejor individuo o la población entera? ¿Se trata de resolver una incógnita o de formar variedad? Biológicamente las especies que trabajan en grupo suelen fomentar la adaptabilidad de la población (herbívoros que se muevan en manadas), mientras que las especies más individuales (normalmente cazadores, animales territoriales) buscan la mejor adaptabilidad del individuo más destacado.
- La convergencia es otro término a valorar en una población. Normalmente,

una población convergente es negativa evolutivamente, a no ser que se esté seguro de la solución al problema y dónde se haya -en cuyo caso pierde sentido el uso de un algoritmo evolutivo-. Una población convergente implica que la mayoría de los individuos están cerca de la media y tienden hacia una única solución. Es frecuente un 'breeding' masivo con la pequeña élite de individuos más adaptados, hecho que llevara a la aceleración del proceso pero que agudizará la convergencia. Ello conlleva dos peligros: el primero caer en una 'local optima'. Es decir, que se alcance la máxima optimización mediante una solución pero que esa solución no sea la mejor al problema. La reducción de los extremos aumenta la dificultad de que la población encuentre otro pico de optimización, atascando a la población en la "local optima". El segundo, de carácter más biológico, es la debilidad frente a los cambios de entorno. Una población rica en variedad tiene más probabilidad de que alguno de sus individuos sea adaptable a un nuevo cambio (meteorológico, social, epidémico...). Opuestamente, la divergencia también tiene un contrapunto: requiere más tiempo para encontrar la solución a cambio de garantizar una mayor probabilidad de éxito. Hay dos métodos de alimentar la divergencia: procurando una estrategia de emparejamiento flexible -no centrada alrededor de los miembros más óptimos-, y potenciando las mutaciones para que los individuos más radicales puedan desarrollar propiedades aún más alejadas de la media ("feed the monsters"). Puede resultar tentador utilizar la elite -los mejores individuos- para evolucionar rápidamente, pero este es el motivo principal de caer en la convergencia. Anecdóticamente, Galápagos -el plug-in de GH- utiliza entre sus ajustes los términos zoofílico e incestuoso para describir un emparejamiento más próximo o más lejano entre los individuos. Afortunadamente las matemáticas y el diseño carecen de restricciones morales o éticas que puedan afectar la mejora de la especie.

- Siguiendo con el pensamiento poblacional, la teoría jerárquica de la selección reconoce muchas clases de individuos evolutivos, ordenados en una serie de inclusión creciente (genes en células, células en organismos, organismos en demes, demes en especies, especies en clados). La unidad focal de cada nivel es un individuo, y podemos dirigir nuestra atención a cualquiera de estos niveles. Una vez designamos un nivel focal como primario para un estudio concreto, entonces la unidad a ese nivel (el gen, el organismo, la especie, etcétera) se convierte en nuestro individuo focal o relevante, y sus unidades constituyentes se convierten en partes mientras que el nivel superior se convierte en colectividad. Así, si nos centramos en el nivel orgánico convencional, genes y células se convierten en colectividades. Pero si nuestro estudio requiere considerar a las especies como individuos, entonces los organismos se convierten en partes y los clados en colectividades. En otras palabras, la tríada parte-individuo-colectividad se desplazará, como un todo, arriba y debajo de la jerarquía en función de los sujetos y objetos de cualquier estudio particular. Esta filosofía fue tomada como referencia en el experimento llevado a cabo en esta tesis sobre las manzanas del ensanche. En él, el individuo evolucionado no es tal, sino la agrupación de varios para poder

valorar su interacción. Por lo tanto, se trata de un ejercicio de evolución de agrupaciones.

En el tratamiento y modificación de los algoritmos evolutivos corrientes, considerar cuidadosamente la inserción de elementos ajenos al proceso que puedan corromper la búsqueda de la solución, tales como la incorporación de valores aleatorios y su repercusión: a priori puede parecer que introducir elementos aleatorios pueden incrementar la flexibilidad y heterogeneidad de una definición que busca explorar libremente un número de posibilidades. Lo aleatorio introduce esa variedad tan “orgánica”. Con todo introducir componentes de aleatoriedad en las definiciones perjudica gravemente el proceso evolutivo: los componentes aleatorios están asociados a una semilla (‘seed’) que varía normalmente con el uso de un deslizador (‘slider’) que pertenece a una reserva genética (‘genpool’). La relación entre el valor de la semilla y la información extraída por el componente es inexistente y por lo tanto el algoritmo evolutivo no puede predecir la causalidad de los números. La posición de este slider con un resultado muy propicio o muy negativo afectará a la valoración final del algoritmo y distorsionará la verdadera repercusión del resto de genes en la ‘genpool’. Por otro lado, también es cierto que ayuda a mantener un grado de inestabilidad que puede evitar una convergencia prematura, pero en principio está debería ser la función de las mutaciones.

Los resultados también han puesto de manifiesto la incapacidad computacional (al menos a disposición de un despacho de arquitectura) para simular una ciudad a nivel de individuo. Esto, requeriría de una población descomunal para garantizar un buen resultado, probablemente inabarcable. El doctorando tiene a bien considerar que el proceso ha de ser el opuesto: crear múltiples individuos (quizá sí, por manzana) que evolucionan y que responden simultáneamente con la evolución de sus vecinos. Es decir, simular cientos de evoluciones en paralelo, que son conscientes de sus vecinos y responden en consecuencia. Este tipo de proceso parece decantarse hacia el modelo de ‘swarm intelligence’ o responsivo, donde los agentes tratan de encontrar una situación de equilibrio que podría estar restringida a la adaptabilidad de los genes y su expresión como individuos (resultados de cap. 4.3).

Por último y para cerrar las consideraciones sobre el diseño Evo-Devo, ha de destacarse los aspectos más relevantes del experimento 3, dónde se pone de manifiesta la importancia de los algoritmos evolutivos multi-objetivo en el diseño arquitectónico (cap. 4.3). Frente al uso de ecuaciones y asignación de porcentajes, el sistema multi-objetivo mantiene una población diversa al mismo tiempo que aumentan los extremos hacia los objetivos del ‘fitness’, la variedad de individuos a elegir es mucho mayor. La investigación, el proceso de desarrollo avanza “objetivo y neutral” durante todo el proceso evolutivo sin que las asignaciones de importancia del diseñador subjetivo influyan en él. Así, el proceso de intervención, de selección personal, se retrasa hasta el final. Los errores argumentados (cap. 3.3.3. y cap. 4.3) en la enunciación inicial de un único ‘fitness’ se ven considerablemente reducidos.

5.4. Mas allá de Evo-Devo

Este último punto de la tesis plantea de manera abierta la lejana relación entre las propuestas más tangenciales en el ámbito de la ciencia Evo-Devo y algunos conceptos de la arquitectura que, positivamente, son recuperados de movimientos anteriores y pueden hallar nuevas formas de reformularse. Se parte de la idea que la evolución puede trascender a nuevos niveles evolutivos, tal y como Peter Russell señala en referencia a la interconexión de la infoesfera⁸⁸⁰.

Primeramente, la psicología evolucionista⁸⁸¹ propone que la psicología y la conducta de los humanos y primates pueden ser entendidas conociendo su historia evolutiva. Específicamente, propone que la mente de los primates -y del ser humano- está compuesta de mecanismos funcionales llamados adaptaciones psicológicas o mecanismos psicológicos evolucionados (EPMs) que se han desarrollado mediante selección natural por ser útiles para la supervivencia y reproducción del organismo. La psicología evolucionista intenta explicar características mentales como la memoria, la percepción, el idioma, y fundamentalmente las emociones como adaptaciones, es decir, como los productos funcionales de la selección natural, a su vez forzada por la competencia para sobrevivir y reproducirse. La psicología evolucionista aplica el principio de adaptabilidad a la psicología y lo social. En la misma línea, pero desde una vertiente diferente⁸⁸², la epigenética dicta un lenguaje que codifica pequeñas modificaciones químicas capaces de regular la expresión de multitud de genes. Las experiencias propias pueden marcar nuestro material genético de una forma hasta ahora desconocida, y estas marcas pueden ser transmitidas a generaciones futuras. Hasta hoy se han podido discernir mecanismos epigenéticos en una gran variedad de procesos fisiológicos y patológicos⁸⁸³. Por último, el “fenotipo extendido” de Richard Dawkins manifiesta la arbitrariedad de la fuente o el propósito de los genes. Estos influyen tanto a los organismos como al entorno, lo modifican, y pueden darse en agentes externos para perpetuar determinados comportamientos⁸⁸⁴. Estos últimos conceptos trascienden el entendimiento de la evolución genética y, en último estadio relacionan dicha evolución -entre otras cosas- a la respuesta a nuestro contexto, experiencias y actividad social.

Estos aspectos recuerdan inevitablemente a la corriente de pensamiento de La Internacional Situacionista, una de las últimas vanguardias del s.XX,

⁸⁸⁰ Russell, Peter. *The Global Brain Awakens: Our next Evolutionary Leap*. Palo Alto, CA: Global Brain, 1995. p.150.

⁸⁸¹ Consúltese: Pinker, Steven. *La Tabla Rasa: La Negación Moderna De La Naturaleza Humana*. Barcelona: Paidós, 2014.

⁸⁸² Consúltese: Gray, Richard. “Phobias may be memories passed down in genes from ancestors.” *Telegraph*. Consultado 29 de diciembre, 2013. <http://www.telegraph.co.uk/news/science/science-news/10486479/Phobias-may-be-memories-passed-down-in-genes-from-ancestors.html>

⁸⁸³ Consúltese: Jaenisch, Rudolf, y Adrian Bird. “Epigenetic Regulation of Gene Expression: How the Genome Integrates Intrinsic and Environmental Signals.” *Nature Genetics* 33, nº 3. 2003.

⁸⁸⁴ Consúltese: Dawkins, Richard. *The Extended Phenotype: The Long Reach of the Gene*. Nueva York: Oxford University Press, 1990.

que destacó por su desarrollo teórico-crítico sobre el urbanismo y la ciudad. Resulta de especial interés la psicogeografía, de Guy Debord, que define de la siguiente manera:

*El estudio de las leyes precisas y de los efectos exactos del medio geográfico, conscientemente organizado o no, en función de su influencia directa sobre el comportamiento afectivo de los individuos*⁸⁸⁵. GUY DEBORD

Bajo esta premisa, se buscaba el espacio vinculado al individuo y las reacciones entre las personas, la ciudad propositiva, generadora de experiencias (por ejemplo, a través del concepto de la Deriva). El proyecto utópico de New Babylon (por el artista Constant Nieuwenhuys) y el Urbanismo Unitario promulgaba la reconstrucción del espacio como su propio decorado, modificándose a sí mismo para influenciar el comportamiento de la gente⁸⁸⁶. Estas filosofías de la segunda mitad del siglo XX vibran innegablemente con los conceptos que se han acentuado a lo largo de la tesis: una arquitectura emergente, autómatas, autopoietica, consciente de sí misma, siempre adaptable a su entorno, capaz de poblar y cambiar el espacio de las ciudades preexistentes. Cabe esperar que las nuevas tipologías de arquitectura paramétrica hereden algunas de las propuestas de las utopías situacionistas y aspiren a convertirlas en realidad.

Entonces, con visión optimista, ¿puede la arquitectura crear por sí misma lugares que estimulen esa evolución psicológica y social? ¿Tratar de enfatizar una selección natural positiva, potenciando situaciones y organizaciones de mayor riqueza a través de la epigenética? ¿Ser el fenotipo de la naturaleza digital que permita una mejora evolutiva del ser humano y su hábitat?

⁸⁸⁵ Perniola, Mario. *Los situacionistas. Historia crítica de la última vanguardia del siglo XX*. Madrid: Acuarela Libros & A. Machado Libros, 2010. pp. 20-35.

⁸⁸⁶ Ivain, Gilles, Attila Kotányi, y Raoul Vaneigem. *Urbanismo Situacionista*. Barcelona: Gustavo Gili, 2007.



6. BIBLIOGRAFÍA Y CONTENIDOS

6.1. Referencias publicadas

- 2G *International Architecture*, nº 16, Vol. IV. Barcelona: Gustavo Gili, 2000.
- A., De Jong Kenneth. *Evolutionary Computation: a Unified Approach*. Cambridge, MA: MIT Press, 2006.
- AA.VV. "Edificis ecoeficients Sostenibles." *aa'arquitectura*. Barcelona: Colegio de Arquitectos de Catalunya, Julio, 2005.
- AA.VV. "Has the Earth's sixth mass extinction already arrived?". *Nature*, nº 471. Marzo, 2011.
- AA.VV. *AD Patterns of architecture*. Vol. 79, Issue 6. Noviembre, 2009.
- AA.VV. *Design by evolution: advances in evolutionary design*. Springer: Berlín, 2008.
- AA.VV. *Real Time, Extending the Reach of Computation*. Viena: 33rd eCAADe Conference, 2015.
- Adrià, Miquel, y Alberto Kalach. *Alberto Kalach*. Naucalpan, México: Gustavo Gili, 2004.
- AEMA. *El medio ambiente en Europa: Estado y perspectivas 2015 – Informe de síntesis*. Copenhague: Agencia Europea de Medio Ambiente, 2015. <http://www.upv.es/contenidos/CAMUNISO/info/U0683994.pdf>
- Aibar, Eduardo. *Urbanismo y estudios sociohistóricos de la tecnología: el caso del ensanche de Barcelona*. Barcelona: UPC, 1995.
- Alexander, C. "The Question of Computers in Design." Verebes, Tom. *Masterplanning the Adaptive City: Computational Urbanism in the Twenty-first Century*. Londres: Routledge, 2014. (Publicación original en "The Question of Computers in Design", *Landscape*. Otoño, 1967).
- Armstrong, Rachel. *Living Architecture: How Synthetic Biology Can Remake Our Cities and Reshape Our Lives*. s. l.: TED Books, 2012.
- Asensio, Paco. *Arquitectura Alternativa: Móvil, Ligera, Desmontable, Modular, Adaptable*. Madrid: H Kliczkowski, 2002.
- Ashlock, Daniel. "Evolutionary Design in Embryogeny." Hingston, Philip F., Luigi C. Barone, and Zbigniew Michalewicz. *Design by Evolution: Advances in Evolutionary Design*. Berlin: Springer, 2008.
- Avizanda, Francisco. *Tres Arquitecturas, Santiago Calatrava*. Valencia: Concilleria de Cultura, Educació i Ciència, Generalitat Valenciana, 1990. Documental.
- Aymonino, Carlo, Ebenezer Howard, Tony Garnier, Ludwig Hilberseimer, y Miliutin. *Orígenes Y Desarrollo De La Ciudad Moderna*. Barcelona: Gustavo Gili, 1972.
- Babbage, Charles, y Martin Campbell-Kelly. *Passages from the Life of a Philosopher*. New Brunswick, NJ: Rutgers University Press, 1994.
- Back, T., U. Hammel, y H.-P. Schwefel. "Evolutionary Computation: Comments on the History and Current State." *IEEE Transactions on Evolutionary Computation* 1, nº 1. Abril, 1997.
- Bahamón, Alejandro, y Felisa Minguet. *Casas En Los Árboles Casas*

Em Árvores. Sant Adrià De Besòs (Barcelona): Instituto Monsa De Ediciones, 2005.

Balch, William E., Linda J. Magrum, George E. Fox, Ralph S. Wolfe, y Carl R. Woese. "An Ancient Divergence among the Bacteria." *Journal of Molecular Evolution* 9, nº 4. Diciembre, 1977.

Ball, Philip. "Forging Patterns y Making Waves from Biology to Geology: A Commentary on Turing (1952) 'The Chemical Basis of Morphogenesis.'" *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* n. 370. 2015.

Bassegoda i Nonell, Joan. "Las Conversaciones de Gaudí con Juan Bergós". *Hogar y arquitectura*, nº 112. 1974.

Bateson, Gregory. *Pasos Hacia Una ecología De La Mente*. Buenos Aires: Lohlé-Lumen, 1998.

Bateson, William. *Materials for the Study of Variation, Treated with Especial Regard to Discontinuity in the Origin of Species*. Londres: Macmillan, 1894.

Baylis, John, Steve Smith, y Patricia Owens. *The Globalization of World Politics an Introduction to International Relations*. Nueva York: Oxford University Press, 2008.

Beck, Timo. *Web 2.0 User-generated Content in Online Communities; a Theoretical and Empirical Investigation of Its Determinants*. Hamburgo: Diplomica-Verl., 2007.

Behe, Michael J. *Darwin's Black Box: The Biochemical Challenge to Evolution*. Nueva York: Free Press, 2006.

Bentley, P., Gordon, T., Kim, J., Kumar, S.: New trends in evolutionary computation. *Proceedings Of the 2001 Congress on Evolutionary Computation: CEC2001: May 27-30, 2001, COEX, Seoul, Korea*. Piscataway, NJ: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2001.

Bentley, P., Kumar, S. "Three ways to grow designs: a comparison of embryogenies for an evolutionary design problem." *Proceedings of the 1999 Genetic and Evolutionary Computation Conference*, Morgan Kaufmann, 1999.

Benyus, Janine M. *Biomimicry: Innovation Inspired by Nature*. Nueva York: Morrow, 1997.

Besserud, K. "Architectural Genomics." *Silicon + Skin: Biological Processes and Computation: Proceedings of the 28th Annual Conference of the Association for Computer Aided Design in Architecture (ACADIA)* Minneapolis: ACADIA, 2008.

Bloomenthal, Jules, y Chandrajit Bajaj. *Introduction to Implicit Surfaces*. San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers, 1997.

Bonabeau, E., Dorigo, M., Theraulaz, G., "Swarm Intelligence: From Natural to Artificial Systems", Santa Fe Institute Studies in the Sciences of Complexity. Nueva York: Oxford University Press, 1999.

Bonnemaison, Sarah, y Philip Beesley. *On Growth and Form: Organic Architecture and beyond*. Halifax: TUNS Press, 2008.

Boole, George, I. Grattan-Guinness, y Gérard Bornet. *George Boole: Selected Manuscripts on Logic and Its Philosophy*. Basel: Birkhäuser Verlag, 1997.

Borges, Jorge Luis. *La Biblioteca De Babel: Prólogos*. Buenos Aires: Emecé Editores, 2000.

Boshernitsan, Marat, y Michael S. Downes. *Visual Programming Languages: A Survey*. Berkeley: Computer Science Division, University

of California, 2004. <http://digitalassets.lib.berkeley.edu/techreports/ucb/text/CSD-04-1368.pdf>

Bowers, Chris. *Design By Evolution: Advances in Evolutionary Design*. Berlin: Springer, 2008.

Borel, Émile. *La mécanique statique et l'irréversibilité*. J. Phys. Theor. Appl., 1913.

Brassard, Gilles, y Paul Bratley. *Fundamentos De Algoritmia*. Madrid: Prentice Hall, 1997.

Brodey, Warren. "The Design of Intelligent Environments: Soft Architecture." *Landscape*, Otoño, 1967.

Brodey, Warren M. *Soft Architecture: The Design of Intelligent Environments*. S.I.: s.e., 1967.

Buelow, Peter. *A geometric comparison of branching structures in tension and compression versus minimal paths*. University of Michigan, 2007. http://www-personal.umich.edu/~pvbuelow/publication/pdf/pvb_IASS07.pdf

Burry, Jane, y Mark Burry. *The New Mathematics of Architecture*. Londres: Thames and Hudson. 2010.

Burry, Mark, Jordi Coll Grifoll, y Josep Gómez. *Sagrada Família s. XXI: Gaudí Ara/Ahora/Now*. Barcelona: Edicions UPC, 2008.

Burry, Mark. "Ideas and computation in contemporary urban design: addressing the disconnects." *Adaptive Ecologies: Correlated Systems of Living*. Londres: Architectural Association, 2013.

Burry, Mark. *Scripting Cultures*. Chichester: Wiley, 2011.

Busquets, Joan. *Barcelona, la construcción urbanística de una ciudad compacta*. Barcelona: Ediciones del Serbal, 2004.

Butler, David. *Just Imagine*. Estados Unidos, 1930. Película.

Candela, Félix, Cueto Ruiz Funes, Juan Ignacio Del, y Angustias Freijo. *Félix Candela, 1910-2010*. Madrid: Sociedad Estatal De Conmemoraciones Culturales, 2010.

Cardellach, F.. "La mecánica d'en Gaudí." *La Veu de Catalunya*. Barcelona: s.e., 1906.

Carpenter, B. E., R. W. Doran, Alan Mathison Turing, Alan Mathison Turing, y Michael Woodger. *A.M. Turing's ACE Report of 1946 and Other Papers*. Cambridge, MA: MIT Press, 1986.

Carroll, Sean B. *Endless Forms Most Beautiful: the New Science of Evo Devo and the Making of the Animal Kingdom*. Nueva York: Norton, 2005.

Castle, Helen. "Editorial". Schumacher, Patrick. *Parametricism 2.0: Rethinking Architecture's Agenda for the 21st Century*. Londres: Wiley, 2016.

Cerdà, Ildefons. *Monografía estadística de la clase obrera*. Madrid: s.e., 1856.

Cerdà, Ildefons. *Necesidades de la circulación y de los vecinos de las calles con respecto a la vía pública urbana, y manera de satisfacerlas*. Madrid: s.e., 1863.

Clarke, Arthur C. *Profiles of the Future; an Inquiry into the Limits of the Possible*. Nueva York: Harper & Row, 1962.

Colin, Smith. *On Vertex-Vertex Meshes and Their Use in Geometric and Biological Modeling*. Calgary: 2006. <http://algorithmicbotany.org/papers/smithco.dis2006.pdf>

- Conway, John H., y N. J. A. Sloane. *Sphere Packings, Lattices, and Groups*. Nueva York: Springer-Verlag, 1988.
- Coolman, Robert. "Tessellation: the geometry of tiles, honeycombs and M. C. Scher." *Live Science*. Marzo, 2015.
- Cooper, S. B., y J. Van Leeuwen. *Alan Turing: His Work and Impact*. Waltham, MA: Elsevier, 2013.
- Corbusier, Le, y Willy Boesiger. *Le Corbusier*. Nueva York: Praeger, 1972.
- Corbusier, Le. *La Ville Radieuse; Éléments D'une Doctrine D'urbanisme Pour L'équipement De La Civilisation Machiniste: Paris, Genève, Rio De Janeiro*. Paris: Éditions Vincent, Fréal, 1964.
- Corcó, Josep. "Emergent properties of life". Estévez, Alberto T. *Genetic Architectures III: New Bio & Digital Techniques*. Barcelona: SITE BOOKS/Escola Tècnica Superior d'Arquitectura, Universitat Internacional De Catalunya, 2003.
- Cormen, Thomas H., Charles Eric. Leiserson, y Ronald L. Rivest. *Introduction to Algorithms*. Cambridge, MA: MIT Press, 1990.
- Csikszentmihalyi, Mihaly, y Isabella Selega Csikszentmihalyi. *Experiencia óptima: Estudios psicológicos Del Flujo En La Conciencia*. Bilbao: Desclée de Brouwer, 1998.
- Dana, James Dwight. *On the Drawing of Figures of Crystals*. S.l.: s.e., 1838.
- Daniel D. Chiras. *Environmental Science*. 7º edición, Ed. Jones & Bartlett Publishers, 2006.
- Daubrée. *Les eaux souterraines à l'époque actuelle et aux époques anciennes*. s. l.: Veuve Ch. Dunod, 1887.
- Davison, E., *Genomic Regulatory Systems: Development and Evolution*. Nueva York: Academic Press, 2003.
- Dawkins, Richard. *The Blind Watchmaker*. Nueva York: Norton, 1986.
- Dawkins, Richard. *The Extended Phenotype: The Gene as the Unit of Selection*. Oxford: Freeman, 1982.
- Dawkins, Richard. *The Extended Phenotype: The Long Reach of the Gene*. Nueva York: Oxford University Press, 1990.
- Darwin, Charles, y Charles Kelchner. *The Origin of Species*. Nueva York, NY: Simon & Schuster Paperbacks, 2009. (Original: Darwin, Charles. *The Origin of Species*, 1876).
- De Kestelier, Xavier, y Brady Peters, "Computation Works: The Building of Algorithmic Thought." *AD*, Volume 83, Issue 2. Marzo/abril, 2013.
- Deb, Kalyanmoy. "Evolutionary Design in Engineering." AA.VV. *Design by evolution: advances in evolutionary design*. Berlín: Springer, 2008.
- Décosterd, Jean-Gilles, y Philippe Rahm. *Décosterd & Rahm: Physiological Architecture: Published for the Exhibition at the Swiss Pavilion as Part of the 8th International Architecture Exhibition in Venice 2002*. Basel: Birkhäuser, 2002.
- Deleuze, Gilles. *Difference and Repetition*. Nueva York: Columbia University Press, 1994.
- Dembski, W. "The intelligent design movement". In: J. Miller (ed.) *An Evolving Dialogue: Theological and Scientific Perspectives on Evolution*. Spring. 1998.
- Denning, Peter. "Saving All the Bits", *American Scientist*. Julio, 1986. <http://denninginstitute.com/pjd/PUBS/AmSci-1990-5-savingbits.pdf>

- Derix, Christian, y Asmund Izaki. "Empathic Space: The Computation of Human-Centric Architecture." *AD*, Volume 84, Issue 5. Septiembre/octubre, 2014.
- Derrida, Jacques, y Edmund Husserl. *Edmund Husserl's Origin of Geometry, an Introduction*. Stony Brook, NY: N. Hays, 1978.
- Devesa, Ricardo. *La casa y el árbol*. Barcelona: ETSAB, 2012. Tesis.
- Karoff, Jeffrey. *Cave Digger*. Karoff Films, 2013. Película.
- Doursat René, Hiroki Sayama, y Olivier Michel. *Morphogenetic Engineering: toward Programmable Complex Systems*. Heidelberg: Springer, 2012.
- Driessens, Erwin, Vertappen, Maria. "Natural processes and artificial procedures", AA.VV. Hingston, Philip F. *Design by Evolution Advances in Evolutionary Design*. Berlin: Springer, 2008.
- Du, Qiang, Vance Faber, y Max Gunzburger. "Centroidal Voronoi Tessellations: Applications and Algorithms." *SIAM Review* 41, n° 4. Enero, 1999.
- Dürer, Albrecht, Jeanne Peiffer, Jesús Espino Nuño, y Juan Calatrava Escobar. *De La Medida*. Tres Cantos, Madrid: Akal Ediciones, 2000.
- Earnshaw, Samuel.. *On the Nature of the Molecular Forces which Regulate the Constitution of the Luminiferous Ether*. Transactions of the Cambridge Philosophical Society 7, 1839.
- Ebner, M. Shackleton, M., Shipman, R. "How neutral networks influence evolvability." *Complexity* 7, 2001.
- Economou, Athanassios. *Fundamentals reconsidered: Facts, fictions, fabrications*, eCAADe, 2015.
- Endy, D. "Foundations for engineering biology." *Nature* 409, 2001.
- Estévez, Alberto T. *Reflejos: Cuentos Escuetos*. Barcelona: Ediciones Del Serbal, 1990.
- Estévez, Alberto T. "El nuevo proyectar cibernético y el nuevo proyectar ecológico." en: Hippolyte, Pedro Luis., y Eduardo Miralles. *VI Congreso Iberoamericano De Gráfica Digital: Libro De Ponencias = Proceedings of the 6th Iberoamerican Congress of Digital Graphics, SIGraDi 2002*. Caracas: Ediciones Universidad Central De Venezuela, 2002
- Estévez, Alberto T., "Arquitecturas genéticas", *Genetic Architectures / Arquitecturas genéticas*, SITES Books / ESARQ-UIC, Santa Fe (USA) / Barcelona: 2003.
- Estévez, Alberto T. *Arquitecturas Genéticas II: Medios Digitales & Formas Orgánicas = Genetic Architectures II: Digital Tools & Organic Forms*. Santa Fe, NM: Sites, 2005.
- Estévez, Alberto T. "Proyecto Barcelona Genética." *Metalocus*, n° 17. Madrid: otoño, 2005.
- Estévez, Alberto. T. "Arquitectura Biodigital." *Memorias SIGraDi'2008*. La Habana: Sociedad Iberoamericana de Gráfica Digital, 2008.
- Estévez, Alberto T., Diego Navarro. "Genetic Architectures Research Group, ESARQ (UIC)." AA.VV., *eme3_2010: International Architecture Festival*. Barcelona: CCCB/MACBA, 2010.
- Estévez, Alberto. "Still alive", *landscapes and others fleshinesses series*. Barcelona: ESARQ, 2010.
- Estévez, Alberto T. "La evolución del legado gaudiniano: organicismo digital." *1st Gaudi World Congress*. Libro de ponencias. Barcelona: Universitat de Barcelona, 2014.

- Estévez, Alberto T. "Learning from nature: architecture and design in the first biodigital age". *2nd International Conference of Biodigital Architecture & Genetics*. Barcelona: ESARQ, 2014.
- Estévez, Alberto T. *Arquitectura Biodigital Y Genética: Escritos = Biodigital Architecture & Genetics: Writings*. Barcelona: ESARQ, 2015.
- Felsing, Ulrike. *Dynamic Identities in Cultural y Public Contexts*. Baden, Switzerland: Lars Müller, 2010.
- Fialho, Frederico. "Biology, Real Time and Multimodal design", AA.VV. *Real Time, Extending the reach of computation*, 33rd eCAADe Conference, 2015, volume 2.
- Figuerola, Laureà. *Estadística De Barcelona En 1849*. Madrid: Instituto De Estudios Fiscales, 1968.
- Fitch, Walter M., y Ayala Francisco José. *Tempo and Mode in Evolution: Genetics and Paleontology 50 Years after Simpson*. Washington, D.C.: National Academy Press, 1995.
- Fletcher, Banister, y John Musgrove. *Sir Banister Fletcher's A History of Architecture*. Londres: Butterworths, 1987.
- Fogel, David B. *Blondie24: Playing at the Edge of AI*. San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers, 2002.
- Foley, James D., y James D. Foley. *Computer Graphics: Principles and Practice*. Reading, MA: Addison-Wesley, 1990.
- Foreword, David. "Introducción." Hingston, Philip F., Luigi C. Barone, y Zbigniew Michalewicz. *Design by Evolution: Advances in Evolutionary Design*. Berlin: Springer, 2008.
- Foster, A., Church, G. "Toward synthesis of a minimal cell". *Molecular Systems Biology* 2, 2006.
- Foster, Richard N. *Innovation: The Attacker's Advantage*. Nueva York: Summit Books, 1986.
- François, Édouard, y Duncan Lewis. *Construire Avec La Nature: Vingt Projets D'architecture Dans Le Paysage = Building with the Nature*. Aix-en-Provence: Edisud, 1999.
- Frazer, John. *An Evolutionary Architecture*. Londres: Architectural Association, 1995.
- Fuller, R. Buckminster, y Cam Smith. *Buckminster Fuller to Children of Earth*. Garden City, Nueva York: Doubleday, 1972.
- Garcia, Mark. "Future Details of Architecture." *AD*, Volume 84, Issue 4. Julio/agosto, 2014.
- Garcia, Sara, y Borrás, Mario. *A Grammar-Based System for Chair Design*. eCAADe, 2015.
- Gaudí, Antoni. *Iglesia de la Colonia Güell*. Barcelona, 1980. Isler, Heinz, *Service Station*, Solothurn, Suiza, 1968. Otto, Frei. *Pabellón Alemán*, Expo del 67, Quebec, 1967. Musmeci, Sergio. *Bridge over the Basento River*, Potenza, 1974.
- Georgoulas, Andreas, Kara Hanif. *Interdisciplinary design. New Lessons from architecture and engineering*. Barcelona: Actar, 2013.
- Gerstner, Karl, Emilio Ambasz, and Karl Gerstner. *Think Program: Synopsis of the Exhibition "designing Programs/programming Designs" by Karl Gerstner*. New York: Museum, 1973.
- Glanville, Ranulph. "Try Again. Fail Again. Fail Better: The Cybernetics in Design and the Design in Cybernetics." *Kybernetes* 36, nº 9/10, 2007. pp. 1173-1206.

- Goldberg, David Edward. *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*. Boston: Addison-Wesley, 2012.
- Gould, Stephen Jay. *La Estructura De La teoría De La evolución*. Barcelona: Tusquets Editores, 2004.
- Gould, Stephen Jay. *Stephen Jay Gould On Evolution*. Nueva York: Voyager, 1994.
- Greenbiz. "Why biomimicry will shape future design." Febrero, 2015. <http://www.greenbiz.com/video/why-biomimicry-will-shape-future-design>
- Greg Lynn (comisario). *Archeology of the Digital*, Canadian Centre for Architecture (CCA), 2013.
- Turk, Greg. "Re-Tiling Polygonal Surfaces." *Computer Graphics*, Vol. 26, No. 2, (SIGGRAPH 92). July, 1992.
- Grünbaum, Branko, y G. C. Shephard. *Tilings and Patterns*. Nueva York: W.H. Freeman, 1987.
- Guy, Richard K., y Robert E. Woodrow. *The Lighter Side of Mathematics: Proceedings of the Eugène Strens Memorial Conference on Recreational Mathematics & Its History*. Cambridge: Cambridge University Press, 1996.
- Haring, Bas, "Next Nature Services", Mensvoort, Koert van., y Hendrik-Jan Grievink. *Next Nature*. Amsterdam: Next Nature Network, 2011.
- Haring, Bas, "We serve our systems as much as they serve us", Mensvoort, Koert van., y Hendrik-Jan Grievink. *Next Nature*. Amsterdam: Next Nature Network, 2011.
- Harvey, Charles, y Jon Press. *William Morris: Design and Enterprise in Victorian Britain*. Manchester: Manchester University Press, 1991.
- Haeckel, Ernst. *Kunstformen Der Natur*. Leipzig: Verlag Des Bibliographischen Instituts, 1899.
- Hennig, Willi. *Phylogenetic Systematics*. Urbana, Londres: Univ. of Illinois Press, 1966.
- Hensel, Michael, Achim Menges, y Michael Weinstock. *Emergent Technologies and Design*. Oxon,: Routledge, 2010.
- Hillis, W. Daniel. "The Age of Digital Entanglement." *Scientific American*. Vol. 303, 2010.
- Holland, John H. *Adaptation in Natural and Artificial Systems: An Introductory Analysis with Applications to Biology, Control, and Artificial Intelligence*. Cambridge, Mass.: MIT Press, 2010.
- Hull, D., "The Effect of Essentialism on Taxonomy: Two Thousand Years of Stasis", *British Journal for the Philosophy of Science*, 15. 1965.
- Humphries, C. J., y Lynne R. Parenti. *Cladistic Biogeography: Interpreting Patterns of Plant and Animal Distributions*. Oxford: Oxford University Press, 1999.
- Hundertwasser, Friedensreich. *Verschimmelungs-Manifest*. Abadía de Seckau: s.e., 4 de julio de 1958. Manifiesto.
- Huxley, Julian. *Evolution: The Modern Synthesis*. Nueva York: Harper & Brothers, 1943.
- Huxley, Julian. *The New Systematics*. Oxford: Clarendon Press, 1940.
- Huxley, Thomas Henry, y Ashley Montagu. *Man's Place in Nature*. Ann Arbor, MI: University of Michigan Press, 1959.
- Ito, Toyo, "La arqueología del futuro", *Sagrada Familia s. XXI: Gaudí Ara/Ahora/Now*. Barcelona: Edicions UPC, 2008.

- Ito, Toyoo, y Torres Nadal José María. *Escritos*. Murcia: Colegio Oficial De Aparejadores Y Arquitectos Técnicos De La Región De Murcia, 2007.
- Ivain, Gilles, Attila Kotányi, y Raoul Vaneigem. *Urbanismo Situacionista*. Barcelona: Gustavo Gili, 2007.
- Jaenisch, Rudolf, y Adrian Bird. "Epigenetic Regulation of Gene Expression: How the Genome Integrates Intrinsic and Environmental Signals." *Nature Genetics* 33, no. 3s, 2003
- Jenkins, David, y Peter Cook. *L'Unité D'habitation: Marseilles: Le Corbusier*. Londres: Phaidon Press, 1993.
- Jones, Nathaniel. *Architecture as a complex adaptive System*. Cornell University, 2009. Tesis. http://nljones.scripts.mit.edu/Architecture_as_a_Complex_Adaptive_System.pdf
- José de Dalmases B., Antonio Gaudí y Cornet, en "Calendario Josefino para 1927".
- Jose de Mul, "The techno-logical sublime", Mensvoort, Koert van., y Hendrik-Jan Grievink. *Next Nature*. Amsterdam: Next Nature Network, 2011.
- Katavolos, W. "Organics." *Programmes and Manifestoes on 20th century Architecture*. Lund Humphries, 1970.
- Katz, Michael J. *Allometry Formula: a Cellular Model*. S.l.: s.e., 1980.
- Kauffman, S. "Metabolic stability and epigénesis in randomly constructed genetic nets." *Journal of Theoretical Biology*. 22, 1969.
- Kellegias, Alexandros, y Erdine, Elif, "Design by Nature: Concrete Infiltrations", AA.VV. *Real Time, Extending the reach of computation*, 33rd eCAADe Conference, 2015, volume 2.
- Kidder, Tracy. *The Soul of a New Machine*. Nueva York: Modern Library, 1997.
- Kimura, Shuhei. "Inference of Genetic Networks Using an Evolutionary Algorithm" Hingston, Philip F., Luigi C. Barone, y Zbigniew Michalewicz. *Design by Evolution: Advances in Evolutionary Design*. Berlin: Springer, 2008.
- Kitano, H., "Designing neural networks using genetic algorithms with graph generation system", *Complex Systems* 4, 1990.
- Klein, Lance. *A phenomenological interpretation of biomimicry and its potential value for sustainable design*. Manhattan: Kansas State University, 2009. Tesis.
- Klemmt, Christoph, y Bollinger Klaus, "Cell-Based Venation Systems", AA.VV. *Real Time, Extending the reach of computation*, 33rd eCAADe Conference, 2015, volume 2.
- Kurzweil, Ray. *The Singularity Is Near: When Humans Transcend Biology*. Nueva York: Viking, 2005.
- Laugier, Marc-Antoine, Lilia Maure Rubio, Maysi Veuthey Martínez, y Lilia Maure Rubio. *Ensayo Sobre La Arquitectura*. Tres Cantos, Madrid: Akal Ediciones, 1999.
- Leach, Neil. "Space Architecture: The New Frontier for Design Research." *AD*, Volume 84, Issue 6. Noviembre/diciembre, 2014.
- Lee, Michael S., Julien Soubrier, y Gregory D. Edgecombe. "Rates of Phenotypic and Genomic Evolution during the Cambrian Explosion." *Current Biology* 23, nº 19, 2013.
- Lenski, R., Ofria, C.; Pennock, R., Adami, C. "The evolutionary origin of

- complex features." *Nature* 423, 2003.
- Leroi, Armand Marie. *Mutants: On Genetic Variety and the Human Body*. Nueva York: Viking, 2003.
- Leslie, John. 1821. *Geometrical Analysis and Geometry of Curve Lines*. Second edition. Edinburgh: W. & C. Tait.
- Lewin, R., *Complexity: Life at the Edge of Chaos*. Nueva York: Macmillan, 1992.
- Liddament, T. "The Computationalist Paradigm in Design Research." *Design Studies* 20, n° 1, 1999.
- Lindenmayer, Aristid, y Grzegorz Rozenberg. *Automata, Languages, Development*. Amsterdam: North-Holland Pub. Co., 1976.
- Little, Charles. *The Universal Drafting Machine*. Cleveland: Universal Drafting Machine, 1902.
- Lohn, J.d., D.s. Linden, G.s. Hornby, W.f. Kraus, A. Rodriguez-Arroyo, y S.e. Seufert. "Evolutionary Design of an X-band Antenna for NASA's Space Technology 5 Mission." *NASA/DoD Conference on Evolvable Hardware, 2003. Proceedings.*, 2003.
- Loos, Adolf. *Ornamento Y Delito: Y Otros Escritos*. Barcelona: Editorial Gustavo Gili, 1972.
- Lorensen, W. E., Harvey Cline. "Marching cubes: A high resolution 3d surface construction algorithm." *ACM Computer Graphics* 21, 1987.
- Lovelock, James. *Gaia: Una Nueva Visión De La Vida Sobre La Tierra*. Madrid: Hermann Blume, 1983.
- Lucante, Angel. *Essai géographique sur les cavernes de Frances te l'étranger*. s. l.: Germain et G. Grassin, 1822.
- Lucerne Foundation. *Making Colour*. The National Gallery. Londres: Septiembre, 2014. Exposición.
- Luhmann, Niklas. *Social Systems*. Stanford, CA: Stanford University Press, 1995.
- Luke, Sean. *Essentials Of Metaheuristics: a Set of Undergraduate Lecture Notes*. Place of publication not identified: Lulu, 2009.
- Lynn, Greg. *Fold Bodies and Blobs: Collected Essays*. La Lettre Volée, 1998.
- Makki, Mohammed, Ali Farzaneh, Diego Navarro. "The Evolutionary Adaptation of Uban Tissues through Computatuional Analysis", AA.VV. *Real Time, Extending the reach of computation*. Viena: 33rd eCAADe Conference, 2015.
- Marcos. *Notes from the Jungle: An Anthropologist Views Todays World*. S.I.: Xlibris, 2008.
- Martinell, Cesar. *Gaudi: Su Vida, Su Teoria, Su Obra*. Barcelona: Colegio De Arquitectos De Cataluna Y Baleares Comision De Cultura, 1967.
- Matamala, Joan. "Gaudí en la intimidad." *Jornadas Internacionales de estudios gaudinistas*. Barcelona: Blume, 1970.
- Maturana, Humberto R., y Francisco J. Varela. *De Máquinas Y Seres Vivos; Una Teoría Sobre La Organización Biología*. Santiago De Chile: Editorial Universitaria, 1973.
- Mau, Bruce. *An Incomplete Manifesto for Growth*. S.I.: Combination Press, 2001.
- Maver, Thomas W., y Harry Wagter. *CAAD Futures '87: Proceedings of*

the Second International Conference on Computer Aided Architectural Design Futures, Eindhoven, the Netherlands, 20-22 May 1987. Amsterdam: Elsevier, 1988.

Mayr, Ernst. *Animal Species and Evolution.* Cambridge: Belknap Press of Harvard University Press, 1963.

MacCarthy, Fiona. *Byron: Life and Legend.* Londres: John Murray, 2014.

McCormack, Jon. "Art, emergence and the computational sublime." *Second Iteration.* Melbourne: CEMA, Monash University Melbourne, 2001.

McCormack, Jon. "Design by Evolution." Hingston, Philip F. *Design by Evolution Advances in Evolutionary Design.* Berlin: Springer, 2008.

Mcculloch, Warren S., y Walter Pitts. "A Logical Calculus of the Ideas Immanent in Nervous Activity." *Bulletin of Mathematical Biology Bltn Mathcal Biology* 52, no. 1-2, 1990.

Menges, Achim. "Material Synthesis: Fusing the Physical and the Computational." *AD*, Volume 85, Issue 5. Septiembre/octubre, 2015.

Menges, Achim. "Material Computation: Higher Integration in Morphogenetic Design." *AD*, Volume 82, Issue 2. Marzo/abril, 2012.

Menon, Anil. *Frontiers Of Evolutionary Computation.* Boston: Kluwer Academic, 2004.

Mensvoort, Koert van. "Our Environment as an Information Carrier." Gerritzen, Mieke, y Laura Martz. *Artvertising: *aka the Million Dollar Building.* Amsterdam: All Media Foundation, 2007.

Mensvoort, Koert van., y Hendrik-Jan Grievink. *Next Nature.* Amsterdam: Next Nature Network, 2011.

Metz, Tacy. "Hypernature". *Next Nature.* Amsterdam: Next Nature Network, 2015.

Metz, Tacy. "Nature is an agreement". *Next Nature.* Amsterdam: Next Nature Network, 2015.

Miglino, O., Nolfi, S., Parisi, D. "Discontinuity in evolution: How different levels of organization imply pre-adaptation." R. Belew, M. Mitchell (eds.) *Adaptive Individuals in Evolving Populations: Models and Algorithms,* 1996.

Miller, J. "Evolving a self-repairing, self-regulating, French flag organism." Gecco. *Proceedings Of the Genetic and Evolutionary Computation.* Elsevier Science & Technology, 2004.

Miralles, Enric, Richard C. Levene, y Carme Pinós. "Enric Miralles y Carme Pinós. En Construcción 1988-1991." *El Croquis.* Madrid: Editorial El Croquis, 1991. p. 252.

Mitchell, William J. *The Logic of Architecture: Design, Computation, and Cognition.* Cambridge, MA: MIT Press, 1990.

Mitchell, William, "Vitruvius redux" Antonsson, Erik K., y Jonathan Cagan. *Formal Engineering Design Synthesis.* Cambridge: Cambridge University Press, 2001.

Mitchell, William. *Vitruvius Computatus.* California: University of California, 1975. <http://edra.org/sites/default/files/publications/EDRA04-Mitchell-384-386.pdf>

Moretti, Luigi. "Architettura Parametrica" *Milan Triennale exhibition.* Milan, 1960.

Moretti, Luigi. *Luigi Moretti: Works and Writings.* Nueva York: Princeton Architectural Press, 2000.

- Moretti, Luigi, Federico Bucci, y Marco Mulazzani. *Luigi Moretti: Opere E Scritti*. Milano: Electa, 2001.
- Muiño, Alejandro. *Genetical Weapons*. Barcelona: Máster de Arquitectura Biodigital, Barcelona, 2007. Tesina de máster.
- Muller, H. "Reversibility in evolution considered from the standpoint of genetics". *Biological Reviews of the Cambridge Philosophical Society* 14, nº 3, 1939.
- Mushegian, A., Koonin, E. "A minimal gene set for cellular life derived by comparison of complete bacterial genomes". *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA* 93, 1996.
- Navarro, Diego. "Evolutive Algorithms." Estévez, Alberto T. (ed.). *2nd International Conference On Biodigital Architecture & Genetics*. Barcelona: Bubok Publishing S.L, 2014.
- Navarro, Diego. "La nova natura a la arquitectura." *V JORNADES INTERNACIONALS. Innovacions Artístiques i Nous Mitjans: Conservació, Xarxes i Tecnociència*. Mayo, 2012. Conferencia.
- Navarro, Diego. *Random May Not Be Random*. Barcelona: s. e., 2011. Tesina en máster de Arquitectura Biodigital.
- Negroponte, N. *The Architecture Machine*, MIT Press 1970.
- Neumann, John Von, y Arthur W. Burks. *Theory Of Self-Reproducing Automata*. Urbana: University of Illinois Press, 1966.
- Nieuwenhuys, Constant. "New Babylon – A Nomadic City." Haags: Gemeetenmuseum, 1974.
- Niklas, Karl J., y Hanns-Christof Spatz. *Plant Physics*. Chicago: University of Chicago Press, 2012.
- Nikula, Riitta. *Construir Con El Paisaje: Breve Historia De La Arquitectura Finlandesa*. Helsinki: Otava, 1996.
- Nunes, De Castro Leandro. *Fundamentals of Natural Computing: Basic Concepts, Algorithms, and Applications*. Boca Raton: Chapman & Hall/ CRC, 2006.
- Nuño, Laura. *The concept of form in contemporary biology*. Madrid: Universidad Computense de Madrid, Université Paris 1-Sorbonne, 2012. Tesis.
- Olivares, Jonathan. *A Taxonomy of Office Chairs: the Evolution of the Office Chair, Demonstrated through a Catalogue of Seminal Models and an Illustrated Taxonomy of Their Components*. Londres: Phaidon Press, 2011.
- Ortega y Gasset, José. *La rebelión de las masas*. Madrid, 1970.
- Otto, Frei, Bodo Rasch, y Sabine Schanz. *Frei Otto, Bodo Rasch: Finding Form: towards an Architecture of the Minimal*. Fellbach: Axel Menges, 2006.
- Otto, Frei, Rudolf Trostel, y Friedrich Karl. Schleyer. *Tensile Structures; Design, Structure, and Calculation of Buildings of Cables, Nets, and Membranes*. Cambridge, MA: MIT Press, 1973.
- Otto, Frei, y Winfried, Nerdinger. *Frei Otto: Complete Works: Lightweight Construction, Natural Design*. Basel: Birkhäuser, 2005.
- Oxman, Neri. *Material-based design computation*. Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology, 2010.
- Panofsky, Erwin. *Vida Y Arte De Alberto Durero / Versión Española De María Luisa Balseiro*. Madrid: Alianza, 1982.
- Papert, Seymour. "You can't think about thinking without thinking about

- thinking about something". *Contemporary Issues in Technology and Teacher Education*, n° 5(3/4). s.e., 2005.
- Parish, Y., Muller, P., "Procedural modeling of cities." *Proceedings of the 28th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*. Nueva York: ACM, 2001.
- Pask, Gordon, "The Architectural Relevance of Cybernetics", *Architectural Design*, September 1969.
- Patrik Schumacher, "Parametric Order", *Adaptive Ecologies: Correlated Systems of Living*. Londres: Architectural Association, 2013.
- Patrik Schumacher. *The Autopoiesis of Architecture, Vol. 1: A New Framework for Architecture*. Londres: John Wiley & Sons Ltd., 2010.
- Pearce, Peter. *Structure in Nature Is a Strategy for Design*. Cambridge: MIT Press, 1978.
- Pelta, David Alejandro, Natalio Krasnogor, Dan Dumitrescu, Camelia Chira, y Rodica Lung. *Nature Inspired Cooperative Strategies for Optimization*. Berlin: Springer, 2011.
- Penrose, Roger. "Relativistic Symmetry Groups." *Group Theory in Non-Linear Problems*, 1974.
- Perniola, Mario. *Los situacionistas. Historia crítica de la última vanguardia del siglo XX*. Madrid: Acuarela Libros & A. Machado Libros, 2010.
- Pinker, Steven. *La Tabla Rasa: La Negación Moderna De La Naturaleza Humana*. Barcelona: Paidós, 2014.
- Polión, Vitruvio. *Vitruvio: Los Diez Libros De Arquitectura*. Madrid: Alianza Editorial, 1995 (original en Siglo I a.C.).
- Popper, Karl R. *In Search of a Better World: Lectures and Essays from Thirty Years*. Londres: Routledge, 1992.
- Prusinkiewicz, Przemyslaw, y Aristid Lindenmayer. *The Algorithmic Beauty of Plants*. Nueva York: pringer-Verlag, 1990.
- Prusinkiewicz, Przemyslaw, y James Hanan. *Lindenmayer Systems, Fractals, and Plants*. Berlin: Springer-Verlag, 1989.
- Puig-Boada, Isidre. *El pensamiento de Gaudí: compilación de textos y comentarios*. Barcelona: Dux, 2015.
- Rahm, Philippe. *Form and Function Follow Climate*. Londres: AA Publications, 2007.
- Redclift, Michael. *Sustainability. Sustainability*. Londres: Routledge, an Imprint of Taylor & Francis Books, 2005.
- Reilly, Edwin D., Anthony Ralston, y David Hemmendinger. *Encyclopedia of Computer Science*. Londres: Nature Pub. Group, 2000.
- Ricci, A. "A Constructive Geometry for Computer Graphics." *Computer-Aided Design* 6, no. 1, 1974.
- Ricolais, Robert Le. *Introduction to the Notion of Form*. Philadelphia, PA: University of Pennsylvania, Graduate School of Fine Arts, Department of Architecture.
- Rittel, Horst, y Webber, Melvin. "Dilemmas in a General Theory of Planning." *Policy Sciences*, 4. Scotland: 1973.
- Russell, Peter. *The Global Brain Awakens: Our next Evolutionary Leap*. Palo Alto, CA: Global Brain, 1995.
- Saussure, Ferdinand De. *Course in General Linguistics*. Nueva York: Philosophical Library, 1959.

- Schaik, Leon Van. "Pavilions, Pop-Ups and Parasols: Are They Platforms for Change?" *AD*, Volume 85, Issue 3. Abril/mayo, 2015.
- Semper, Gottfried, y Hans Maria Wingler. *Wissenschaft, Industrie Und Kunst, Und Andere Schriften Über Architektur, Kunsthandwerk Und Kunstunterricht*. Mainz: Kupferberg, 1966.
- Sendak, Maurice. *Where the wild things are*. Nueva York: Harper & Row, 1963.
- Sennett, Richard. *The Craftsman*. New Haven: Yale University Press, 2008.
- Shannon, Claude Elwood, y Warren Weaver. *The Mathematical Theory of Communication*. Urbana: University of Illinois Press, 1949.
- Sheppard, R.Z.. "Rock Candy." *Time Magazine*. Abril, 1971.
- Shiffman, Daniel, and Shannon Fry. *The Nature of Code*. United States: D. Shiffman, 2012.
- Singhal, Arvind, y James W. Dearing. *Communication of Innovations: A Journey with Eva Rogers*. New Delhi: SAGE Publications, 2006.
- Smith, Alistair. *High Performers: The Secrets of Successful Schools*. Carmarthen: Crown House Pub, 2011.
- Smocovitis, Vassiliki Betty. *Unifying Biology: The Evolutionary Synthesis and Evolutionary Biology*. Princeton, NJ: Princeton University Press, 1996.
- Sottsass, Ettore. *Domus*, nº 874. Italia: Octubre del 2004.
- Spiller, Neil, y Rachel Armstrong. *Protocell Architecture*. Londres: Wiley, 2011.
- Spyropoulos, Theodore, Brett D. Steele, John H. Holland, Ryan Dillon, Mollie Claypool, John Frazer, Patrik Schumacher, Makoto Sei Watanabe, David Ruy, y Mark Burry. *Adaptive Ecologies: Correlated Systems of Living*. Londres: Architectural Association, 2013.
- Stanley, K., Miikkulainen, R. "A taxonomy for artificial embryogeny." *Artificial Life*, 2003.
- Stanley, Kenneth. "Evolving neural networks through augmenting topologies." The MIT press journals. <http://nn.cs.utexas.edu/downloads/papers/stanley.ec02.pdf>
- Steele, Brett, "Architecture's Adaptation", Spyropoulos, Theodore, Brett D. Steele, John H. Holland, Ryan Dillon, Mollie Claypool, John Frazer, Patrik Schumacher, Makoto Sei Watanabe, David Ruy, y Mark Burry. *Adaptive Ecologies: Correlated Systems of Living*. Londres: Architectural Association, 2013.
- Sterling, Bruce, "Guided Growth", Mensvoort, Koert van., y Hendrik-Jan Grievink. *Next Nature*. Amsterdam: Next Nature Network, 2011.
- Sterling, Bruce, "Preface", Mensvoort, Koert van., y Hendrik-Jan Grievink. *Next Nature*. Amsterdam: Next Nature Network, 2011.
- Stern, Nancy B. *From ENIAC to UNIVAC: An Appraisal of the Eckert-Mauchly Computers*. Bedford, MA: Digital Press, 1981.
- Stiny, George, y James Gips. "The Generative Specification of Painting." *Pictorial and Formal Aspects of Shape and Shape Grammars*. Basel: 1975.
- Sutherland, Ivan Edward. *Sketchpad: A Man-machine Graphical Communication System*. Nueva York: Garland Pub., 1980.
- Taylor, Harold, y Loretta M. Taylor. *George Pólya: Master of Discovery 1887-1985*. Palo Alto, CA: Dale Seymour Publications, 1993.

Tedeschi, Arturo, Fulvio Wirz, y Stefano Andreani. *AAD, Algorithms-aided Design: Parametric Strategies Using Grasshopper*. Brienza, Italy: Le Penseur Publisher, 2014.

Teresko, John. "Parametric Technology Corp.: Changing the way Products are Designed." *Industry Week*. December n20. Diciembre, 1993.

Thompson, D'Arcy Wentworth. *Growth and Form*. Cambridge: Cambridge University Press, 1942.

Thomson, James, y John Tyndall. *On an Integrating Machine Having a New Kinematic Principle*. Londres: s.e., 1876.

Toffler, Alvin. *La Tercera Ola*. Barcelona: Plaza & Janés, 1980.

Torii, Tokutoshi, y Antoni Gaudí. *El Mundo Enigmático De Gaudí: Cómo Creó Gaudí Su Arquitectura*. Madrid: Inst. De España, 1983.

Turing, Alan Mathison. *The Chemical Basis of Morphogenesis*. Londres: Publ. for the Royal Society by Cambridge UP, 1952. <http://www.dna.caltech.edu/courses/cs191/paperscs191/turing.pdf>

Turing, A.m. "On Computable Numbers, with an Application to the Entscheidungsproblem." *Annual Review in Automatic Programming*, 1960. pp. 230-64.

Tseng, Jui-Pang. *Seeding and response, cellular automaton using the I-Ching*. s. l. 1993.

Tyldum, Morten. *The Imitation game*. Reino Unido: The Weinstein Company / Black Bear Pictures / Ampersand Pictures, 2014. Película.

Van Mensvoort, Koert, "Razorius Gilletus", Mensvoort, Koert van., y Hendrik-Jan Grievink. *Next Nature*. Amsterdam: Next Nature Network, 2011.

Van Mensvoort, Koert, "Real Nature Is Not Green", Mensvoort, Koert van., y Hendrik-Jan Grievink. *Next Nature*. Amsterdam: Next Nature Network, 2011.

Van Schaik, Leon, y Fleur Watson. "Pavilions, Pop-Ups and Parasols: The Impact of Real y Virtual Meeting on Physical Space." *AD*, Volume 85, Issue 3. Mayo/junio, 2015.

Verebes, Tom. "Mass-Customised Cities." *AD*, Volume 85, Issue 6. Noviembre/diciembre, 2015.

Vernadski, Vladimir Ivanovitch, Jacques Grinevald, David B. Langmuir, y Mark A. McMenamin. *The Biosphere*. Nueva York: Copernicus, 1997.

Vetsch, Peter, Erhard Wagner, y Christoph Schubert-Weller. *Erd- Und Höhlenhäuser Von Peter Vetsch = Earth and Cave Architecture, Peter Vetsch*. Sulgen: Niggli Verlag, 1994.

Vinod Srinivasan, Esan Mandal y Ergun Akleman. *Solidifying Wireframes*. s.l.: Texas A&M University College Station, 2005.

Viollet-le-Duc, Eugène-Emmanuel, y M. F. Hearn. *The Architectural Theory of Viollet-le-Duc: Readings and Commentary*. Cambridge, MA: MIT Press, 1990.

Wagner, Gunter P., y Lee Altenberg. "Perspective: Complex Adaptations and the Evolution of Evolvability." *Evolution* 50, no. 3. Junio, 1996. .

Walker, John. *The Autodesk File: Bits of History. Words of Experience*. Fourth edition. Thousand Oaks (Ca): New Riders, 1989.

Walter, William Grey. *The Living Brain*. Nueva York: Norton, 1953.

Wang, Harris H et al. "Programming Cells by Multiplex Genome Engineering and Accelerated Evolution." *Nature* n° 460, 2009.

- Wardrip-Fruin, Noah, y Nick Montfort. *The NewMediaReader*. Cambridge, MA: MIT Press, 2003.
- Weiner, S., y H. D. Wagner. "THE MATERIAL BONE: Structure-Mechanical Function Relations." *Annual Review of Materials Science* n° 28. Agosto, 1998.
- Wells, H. G. *The Shape of Things to Come*. Nueva York: Macmillan Company, 1933.
- Whinston, Anne. *Architecture in the landscape: toward an unfield vision*. N° 80, 1990.
- Williams, Kim, y Lionel March. *Shape and Shape Grammars*. Basel: Birkhäuser, 2011.
- Williston, Samuel Wendall. *Water Reptiles of the Past and Present*. Chicago: University of Chicago Press. 1914.
- Wolff, J. "The Law of Bone Remodeling". *Berlin Heidelberg*. Nueva York: Springer, 1986 (translation of the German 1892 edition).
- Wolfram, Stephen. *A New Kind of Science*. Champaign, IL: Wolfram Media, 2002.
- Wolpert, L. "Positional Information and the Spatial Pattern of Cellular Differentiation." *Journal of Theoretical Biology* 25, no. 1. Diciembre, 1969.
- Zientara, Marguerite. *The History of Computing: A Biographical Portrait of the Visionaries Who Shaped the Destiny of the Computer Industry*. Framingham, MA: CW Communications, 1981.
- Zitzler, Eckart. *Evolutionary Algorithms for Multiobjective Optimization: Methods and Applications*. Aachen: Shaker, 1999.

6.2. Referencias en Internet

386. "Design." <http://www.386.es/design.html>
- Ackroyd & Harvey. www.ackroydandharvey.com
- Adda, Catherine. *Calatrava, Dios no juega a los dados*. s. l.: RTVE, 1999. Documental. <http://www.rtve.es/alacarta/videos/tres-arquitecturas/tres-arquitecturas-n2-santiago-calatrava/652834/>
- Aigner, Florian. "Is the universe a Hologram?" *Technische Universitat Wien*. Abril, 2015. http://www.tuwien.ac.at/en/news/news_detail/article/9447/
- Ajuntament de Barcelona. "Anuari Estadístic de la Ciutat de Barcelona, Densitat de població segons 2014." <http://www.bcn.cat/estadistica/catala/dades/anuari/cap02/C020104.htm>
- Ajuntament de Barcelona. "Concurso de Les Portes de Collserola." <http://ajuntament.barcelona.cat/portescollserola/es/>
- Ajuntament de Barcelona. "La Sagrera." <http://ajuntament.barcelona.cat/ecologiaurbana/es/con-quien-lo-hacemos/participacion-ciudadana/sagrera>
- Ajuntament de Barcelona. "Les Gloriès." http://ajuntament.barcelona.cat/glories/es/la-transformacio-de-glories-en-marxa/concurs_explicacio/
- Ajuntament de Barcelona. "Open Data." <http://opendata.bcn.cat/opendata/ca>
- Ajuntament de Barcelona. "Estadística districtes 2015." <http://www.bcn.cat/estadistica/castella/documents/districtes/02EI2015.pdf>
- Ajuntament de Barcelona. "Visualitzacions de dades del portal." http://opendata.bcn.cat/opendata/ca/visualizacions/?utm_source=Twitter&utm_medium=Promoted+tweet+02&utm_campaign=Smart+City
- Alanturing.net. <http://www.alanturing.net/index.htm>
- Algorithmic Beauty of Plants. <http://algorithmicbotany.org/papers/abop/abop.pdf>
- Algorithmic Botanic at the university of Calgary. <http://algorithmicbotany.org/papers/#abop>
- Algoritmos evolutivos y genéticos, Universidad Carlos III de Madrid. <http://www.it.uc3m.es/~jvillena/irc/practicas/estudios/aeag>
- Álvarez, Raúl. "El garaje donde nació Apple es un mito." *Applesfera*. Diciembre, 2014. <http://www.applesfera.com/entrevistas/el-garaje-donde-nacio-apple-es-un-mito-steve-wozniak>
- Amazon. "Amazon Prime Air." <http://www.amazon.com/b?node=8037720011>
- Andrades, Fran. "Big data y la privacidad. Cuando el negocio eres tú." *El Diario*. Abril, 2013. http://www.eldiario.es/turing/BigData_0_120038458.html
- Any Cerdà. "Nace el Eixample." <http://www.anycerda.org/web/es/anycerda/fa-150-anys/neix>
- Apple. "Swift." <http://www.apple.com/swift/>
- Archallenge. "Concurso Súper Manzanas 'Eixample' Cerdà." <http://www.archallenge.com/supermanzanas-eixample-cerda.php>
- Architecture and design. "Floating matrix of metal cubes and trees form a nomadic house." <http://www.architectureanddesign.com.au/news/>

floating-matrix-of-metal-cubes-and-trees-form-a-no

Architizer. "Is Drawing Dead?" Yale Symposium, 2012. <http://architizer.com/blog/a-history-of-technology-in-the-architecture-office/>

Arney, Kart. "Cómo consiguieron las cebras sus rayas? Gracias a Alan Turing." *Materia*. Octubre, 2014. <http://esmateria.com/2014/08/23/como-consiguieron-las-cebras-sus-rayas-gracias-alan-turing/>

Arroyo, Francesc. "Barcelona suspende en zonas verdes," *El País*. Octubre, 2009. http://elpais.com/diario/2009/10/24/catalunya/1256346439_850215.html

Artwood, Jeff. "Please Don't Learn to Code" *Coding Horror*. Mayo, 2012. <http://blog.codinghorror.com/please-dont-learn-to-code/>

Arup. "SolarLeaf - bioreactor façade." <http://www.arup.com/projects/solarleaf>

Atwood, Jeff. "The non-programming programmer." *Coding Horror*. Febrero, 2010. <http://blog.codinghorror.com/the-nonprogramming-programmer/>

Ball, Philip. "Turing Patterns" *Chemistry World*. Mayo 2012. <http://www.rsc.org/chemistryworld/2012/05/turing-patterns>

Baquero, Camilo. "El tranvía de la discordia." *El País*. Agosto, 2015. http://ccaa.elpais.com/ccaa/2015/08/08/catalunya/1439062046_781709.html Consultado el 09/08/2015

BBC News technology. "Robot writes LA Times earthquake breaking news article." Marzo, 2014. <http://www.bbc.com/news/technology-26614051>

Begley, Sharon. "George Church has a wild idea to upend evolution." *STAT*. Mayo, 2016. <https://www.statnews.com/2016/05/16/george-church-profile/>

Be spoke geometry. "Cocoon." <http://www.bespokegeometry.com/2015/07/22/cocoon/#more-871>

Big data historia cronológica. <http://www.winshuttle.es/big-data-historia-cronologica/>

Bio-bricks foundation. <http://biobricks.org/>

Biofabricate Summit. Diciembre, 2014. Congreso. <http://makezine.com/2014/12/18/biofabricate-theres-a-bio-revolution-on-the-horizon/>

Biothing (Alisa Andrasek). "Turning Pavilion." *Vimeo*. 2013. <http://vimeo.com/20873694>

Bourke, Paul. "Implicit Surfaces." *Paulbourke*. Junio, 1997. <http://paulbourke.net/geometry/impliciturf/>

Bourke, Paul. "Polygonising a scalar field." *Paulbourke*. Mayo, 1994. <http://paulbourke.net/geometry/polygonise/>

Boyes, Danny. "Path Mapper Help." *Grasshopper*. Abril, 2011. <http://www.Grasshopper3d.com/forum/topics/path-mapper-help>

Brikman, Yevgeniy. "Don't learn to code. Learn to think." *Yevgeniy Brikman*. Mayo, 2014. <http://www.ybrikman.com/writing/2014/05/19/dont-learn-to-code-learn-to-think/>

Brown, Stuart. "Pixel Pioneers: A Brief History of Graphics, Part One." *Youtube*. <https://www.youtube.com/watch?t=26&v=dzN2pgL0zeg>

Brown, Stuart. "Polygon Realm: A Brief History of Graphics, Part Three." *Youtube*. <https://www.youtube.com/watch?v=qxM9pMEnJQ0>

Brownlee, John. "How Apple uses Picasso to teach employees about

product design." *Co.Design*. <http://www.fastcodesign.com/3034240/how-apple-uses-picasso-to-teach-employees-about-product-design>

Buck, Berennan. "Patternism, Computation and Contemporary Continuity." *Architecture Yale*. 2014 <http://architecture.yale.edu/courses/patternism>

Carbajo, Aitor. "Guerra entre Apple y Adobe, ¿Mito o realidad?" *Applesfera*. Abril, 2010. <http://www.applesfera.com/apple/guerra-entre-apple-y-adobe-mito-o-realidad>

Carlin, John. "Chernóbil, la sombra de una catástrofe." *El País*. Marzo, 2016. http://elpais.com/elpais/2016/03/11/eps/1457722766_979859.html

Carlson, Christopher. "Minimum Inventory, Maximum Diversity." *Wolfram blog*. Marzo, 2005. <http://blog.wolfram.com/2009/03/25/minimum-inventory-maximum-diversity/>

Chicago Manual of Style. "Quick guide". http://www.chicagomanualofstyle.org/tools_citationguide.html

Collins, Ben. "Histograms and Normal Distribution Curves in Google Sheets." <http://www.benlcollins.com/spreadsheets/histograms-normal-distribution/>

Collins, Katie. "Computer independently solves 120 year biological mystery." *Wired*. Junio, 2015. <http://www.wired.co.uk/news/archive/2015-06/05/computer-develops-scientific-theory-independently>

Competition City of Dreams Pavilion. http://newyork.figmentproject.org/2015_pavilion_competition

Cookson, Clive. "Century of biology takes time to bear fruit." *Financial Times*. Marzo, 2010. <http://www.ft.com/cms/s/2/e04e5abe-f555-11de-90ab-00144feab49a.html#axzz4H7KMwAmd>

Corral, Miguel. "El padre del genoma humano, Craig Venter, crea por primera vez una célula artificial." *El Mundo*. Mayo, 2010. <http://www.elmundo.es/elmundo/2010/05/19/ciencia/1274289593.html>

Cosmomagazine. "Company develops a way to 3D print DNA and design a living creature." Febrero, 2015 <http://blog.cosmomagazine.com/blog/2015/2/2/company-develops-a-way-to-3d-print-dna-and-design-a-living-creature>

Criado, Miguel Ángel. "Los misteriosos círculos de hadas' confirman las teorías de Alan Turing." *El País*. Marzo, 2016. http://elpais.com/elpais/2016/03/14/ciencia/1457973640_961331.html

Cubitt, Toby, Perez-Garcia David, y Wolf, Michael. "Undecidability of the spectral gap." *Nature*. n°528. Diciembre, 2015. <http://www.nature.com/nature/journal/v528/n7581/full/nature16059.html>

Dans, Enrique. "Codecademy aprendiendo a programar." *El Blog de Enrique Dans*. Enero, 2012. <http://www.enriquedans.com/2012/01/codecademy-aprendiendo-a-programar.html>

Dans, Enrique. "El cambio en la educación: mucho más que ordenadores." *El Blog de Enrique Dans*. Mayo, 2014. <http://www.enriquedans.com/2014/05/el-cambio-en-la-educacion-mucho-mas-que-ordenadores.html>

Davis, Daniel. "A history of parametric." Agosto, 2013. <http://www.danieldavis.com/a-history-of-parametric/>

Davis, Daniel. "Chapter 2 - The challenges of parametric modelling." Septiembre, 2013. <http://www.danieldavis.com/thesis-ch2/>

Davis, Daniel. "Dissecting Grasshopper." Agosto, 2010. <http://www.danieldavis.com/dissecting-Grasshopper/>

Davis, Daniel. "How to draw a hyperboloid." Septiembre, 2014. <http://www.danieldavis.com/how-to-draw-a-hyperboloid/>

De Jongh, Arie-Willem. "View optimization using Galapagos for Grasshopper." *Grasshopper*. Enero, 2016. <http://www.Grasshopper3d.com/video/view-optimization-using-galapagos-for-Grasshopper>

DeLanda, Manuel. "Deleuze and the use of the genetic algorithm in architecture." <http://www.cddc.vt.edu/host/delanda/pages/algorithm.htm>

Dell, Bruce. "Euclidean Holoverse virtual reality games revealed." *Youtube*. April, 2016 <https://www.youtube.com/watch?v=4pFAgf3PUK8>

Designboom. "Noa Raviv visualizes immaterial computer errors with grid installation." *Designboom*. Abril 2015. <http://www.designboom.com/art/noa-raviv-grid-installation-oops-hansen-house-jerusalem-04-08-2015/>

Desjardins, Jeff. "How algorithms have changed the face of wall Street." *Visual Capitalist*. Junio, 2014. <http://www.visualcapitalist.com/algorithms-changing-wall-street/>

Dezeen. "Leading architects are turning the focus back on bamboo." <http://www.dezeen.com/2014/07/18/penda-chris-precht-interview-bamboo-architecture/>

Dezeen. "Sou Fujimoto small cubes." <http://www.dezeen.com/2014/10/22/sou-fujimoto-many-small-cubes-installation-paris-jardins-des-tuileries-fiac-art-fair/>

Diakopoulos, Nick. "Interactive: the top programming languages 2016." *IEEE Spectrum*. Julio, 2016. <http://spectrum.ieee.org/static/interactive-the-top-programming-languages-2016>

DICYT. "El sector de la construcción genera el 36% de las emisiones de CO2 en la Unión Europea." Mayo, 2012. <http://www.dicyt.com/noticias/el-sector-de-la-construccion-genera-el-36-de-las-emisiones-de-co2-en-la-union-europea>

Digital Library. "Visually exploring gigabyte data sets in real time." Agosto, 1999. <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=310930.310977&coll=DL&dl=GUIDE>

Divisare. "Architecture goes wild." <http://divisare.com/architecture-goes-wild>

Docam. "Embryological house, Greg Lynn." <http://www.docam.ca/en/component/content/article/106-embryological-house-greg-lynn.html>

Dragulescu, Alex. "Malwarez." <https://sq.ro/malwarez.htm>

Driessens y Verstappen. "Prometal." <http://notnot.home.xs4all.nl/breed/prometal.html>

Drinnan, Jak. "3D venation growth." *Grasshopper*. Diciembre, 2012. http://www.Grasshopper3d.com/photo/3d-venation-growth-1?xg_source=activity

Ebizmda. "Top 15 Most Popular Science Websites". <http://www.ebizmba.com/articles/science-websites>

Edgemon, Christopher. "What is Grasshopper 2 development status?" *Grasshopper*. Enero, 2016. <http://www.grasshopper3d.com/forum/topics/what-is-grasshopper-2-development-status>

Edgemon, Christopher. "What is Grasshopper 2 development status?" *Grasshopper*. Enero, 2016. <http://www.grasshopper3d.com/forum/topics/what-is-grasshopper-2-development-status>

Editorial. "Edificios insostenibles: derriten coches y personas". *El Mundo*. Septiembre 2013. <http://www.elmundo.es/elmundo/2013/09/13/suivienda/1379072026.html>

Editorial. "El día que la burbuja puntocom pinchó." *El País*. Marzo, 2010. http://economia.elpais.com/economia/2010/03/10/actualidad/1268209975_850215.html

Editorial. "Los 'bio' pasan a otra vida." *El País*. Julio, 2006. http://elpais.com/diario/2006/07/02/negocio/1151845412_850215.html

Editorial. "Panasonic: de aquí a 5 años habrá una gran explosión en la robótica." *el Economista*. Julio, 2016. <http://www.economista.es/tecnologia/noticias/7692091/07/16/Panasonic-De-aqui-a-5-anos-habra-una-gran-explosion-en-la-robotica.html>

Emre, Yunus. "Ever-changing sceneries with microrobots" *Next Nature*. Abril, 2015. http://www.nextnature.net/2015/04/ever-changing-sceneries-with-microbots/?utm_content=buffer480b1&utm_medium=social&utm_source=twitter.com&utm_campaign=buffer

Enciclopedia of Nations. "Personal computer (per 100 people)." <http://www.nationsencyclopedia.com/WorldStats/Edu-other-personal-computers.html>

England lab at MIT physics. <http://www.Englandlab.com/>

Euclideanofficial "Unlimited Detail Real-Time Rendering Technology Preview 2011 [HD]." *Youtube*. <https://www.youtube.com/watch?v=00gAbgBu8R4>

Facebook. "¿Cómo se deciden las historias que se mostrarán en la sección de noticias?" <https://www.facebook.com/help/327131014036297/>

Fairs, Marcus. "Leading Architects are turning the focus back on bamboo." *Dezeen*. Julio, 2014. Entrevista a Chris Precht. <http://www.dezeen.com/2014/07/18/penda-chris-precht-interview-bamboo-architecture/>

Felker, Chase. "Maybe Not Everybody Should Learn to Code." *Slate*. Agosto, 2013. http://www.slate.com/articles/technology/future_tense/2013/08/everybody_does_not_need_to_learn_to_code.html

Fondo Europeo de Desarrollo Regional <http://www.guiafc.com/temas/politica-regional/item/262-feder.html>

Food4rhino. "Armadillo." <http://www.food4rhino.com/project/armadillo?etx>

Food4Rhino. "GH python." <http://www.food4rhino.com/project/ghpython?etx>

Food4rhino. "Kangaroo Physics." <http://www.food4rhino.com/project/kangaroo?ufh&etx>

Food4rhino. "Octopus." <http://www.food4rhino.com/project/octopus?etx>

Food4rhino. "wishlist." <http://www.food4rhino.com/wishlist>

Forbes. "A very short History of big data." Mayo, 2009. <http://www.forbes.com/sites/gilpress/2013/05/09/a-very-short-history-of-big-data/#6ec1d8ff55da>

Franco, Dante. "Los bioordenadores tienen un gran futuro. Nos falta responder: ¿para qué?" *FayerWayer*. Agosto, 2014. <https://www.fayerwayer.com/2014/05/ordenadores-hechos-de-moho-y-otros-chips-biologicos/>

Fuentes, Fernando. "El plan de 10 megaciudades para China." Diciembre, 2015. *La Tercera*. <http://www.latercera.com/noticia/mundo/2015/12/678-660892-9-el-plan-de-10-megaciudades-para-china.shtml>

Futurism. "What are algorithms." <http://futurism.com/images/what-are-algorithms/>

Gamespot. "How does no man's sky actually work? reality check" *Youtube*. <https://www.youtube.com/watch?v=ZVl1Hmth3HE>

Garfella, Carlos. "Barcelona quiere ser la primera dron.city de España." *El País*. Julio, 2016. http://ccaa.elpais.com/ccaa/2016/07/28/catalunya/1469717614_396371.html

Geddes, Linda. "Synthetic yeast to brew up vital malaria drug." *Scientist*. Junio, 2008. <https://www.newscientist.com/article/dn14059-synthetic-yeast-to-brew-up-vital-malaria-drug/>

Genetic Architectures. <http://geneticarchitectures.weebly.com/>

Genetic Architectures. "Applying living tissues to architecture." 2007-2009. http://geneticarchitectures.weebly.com/research_group.html

Genetic Architectures. "Genetic Barcelona Project." 2007-2009. http://geneticarchitectures.weebly.com/research_group.html

Genetic Architectures. "Microscopic Structures." 2007-2009. http://geneticarchitectures.weebly.com/research_group.html

Github. "Exoskeleton." <https://github.com/davestasiuk/Exoskeleton2>

Github. "Plankton." <https://github.com/meshmash/Plankton/releases>

Google. "Introduction to Material Design." <https://www.google.com/design/spec/material-design/introduction.html#introduction-goals>

Google. "Method for node ranking in a linked database." <http://www.google.com/patents/US6285999?hl=es>

Gorman, Ryan. "10 surreal images of Earth shot by a high-definition satellite that will take your breath away." *Aol*. Agosto, 2014. <http://www.aol.com/article/2014/08/26/10-surreal-images-of-earth-shot-by-a-high-definition-satellite/20952885/?ncid=txtlnkusaolp00001348>

Graham, Flora. "Cancer-warped skeletons imagined for building design." *New Scientist*. Enero, 2015. <http://www.newscientist.com/article/dn26884-cancerwarped-skeletons-imagined-for-building-design.html#.VRmWphwgiiy>

Grasshopper3d. "Grasshopper 0.9.0076 available for download." <http://www.Grasshopper3d.com/forum/topics/Grasshopper-0-9-0076-available-for-download?id=2985220%3ATopic%3A1121907&page=2#comments>

Grasshopper3d. "Grasshopper 1.0 beta 1 available for download". <http://www.Grasshopper3d.com/forum/topics/Grasshopper-1-0-beta-1-available-for-download>

Gray, Richard. "Phobias may be memories passed down in genes from ancestors." *Telegraph*. Diciembre, 2013. <http://www.telegraph.co.uk/news/science/science-news/10486479/Phobias-may-be-memories-passed-down-in-genes-from-ancestors.html>

Graziano, Andrea. "Aglomeración de add-ons para GH." *Facebook*. <https://www.facebook.com/photo.fbid=10208807290565186&set=p.10208807290565186&type=3&theater>

Handy, Charles. "The Seductions of the Infosphere." *Harvard Business Review*. Julio, 2015. <https://hbr.org/2015/07/the-seductions-of-the-infosphere>

Hanna, Sean, "Levels of Uncertainty in Design." *SGArticles*. Abril, 2013. http://smartgeometry.org/index.php?option=com_content&view=article&id=232%3Alevels-of-uncertainty-in-design&catid=45%3Asgarticles&Itemid=151

Hatherley, Owen. "Zaha Hadid Architects and the Neoliberal Avant-Garde." *Metamute*. Octubre, 2010. <http://www.metamute.org/editorial/>

articles/zaha-hadid-architects-and-neoliberal-avant-garde.

Heggestuen, John. "One In Every 5 People In The World Own A Smartphone, One In Every 17 Own A Tablet." *Business Insider*. Diciembre, 2013. <http://www.businessinsider.com/smartphone-and-tablet-penetration-2013-10>

Herzog, Thomas. "Obscenity of the jungle." *Youtube*. <http://www.youtube.com/watch?v=3xQyQnXrLb0>

Heuvel, Arnoud. "Antenna Tree Mast Safari." *Next Nature*. Agosto, 2009. <https://www.nextnature.net/2009/08/antenna-tree-mast-safari/>

Hidalgo, Manuel. "Las formas edificatorias de la arquitectura de Antonio Gaudí." *Wiki McNeel*. <http://wiki.mcneel.com/rhino/geometriainformaticaarquitectonica>

Holmes, Bob. "Lab yeast make evolutionary leap to multicellularity." *New Scientist*. Junio, 2011. <https://www.newscientist.com/article/mg21028184-300-lab-yeast-make-evolutionary-leap-to-multicellularity/>

Holmes, Bob. "One gene may drive leap from single cell to multicellular life" *New Scientist*. Junio, 2015. <https://www.newscientist.com/article/dn27762-one-gene-may-drive-leap-from-single-cell-to-multicellular-life>

Imai, Yuki. "Please tell me the basics of Galapagos." *Grasshopper*. Julio, 2015. <http://www.Grasshopper3d.com/forum/topics/please-tell-me-the-basics-of-galapagos>

Intel. "Intel and Micron produce breakthrough memory technology." Julio, 2015. <https://newsroom.intel.com/news-releases/intel-and-micron-produce-breakthrough-memory-technology/>

Ito, Joi. "Why Bio is the New Digital." *Youtube*. <https://www.youtube.com/watch?v=pnHD8gvccpl>

J. de J. "Validan una teoría de Alan Turing 60 años después de su muerte." *ABC*. Marzo, 2014. <http://www.abc.es/ciencia/20140311/abc-validan-teoria-turing-anos-201403101617.html>

Jacobs, Hiroshi. "New chameleon available." *Grasshopper*. Junio, 2014. <http://www.Grasshopper3d.com/group/chameleon/forum/topics/new-chameleon-available?commentId=2985220%3AComment%3A1207340&groupId=2985220%3AGroup%3A584389>

Javed, Shamim. "Galapagos questions." *Grasshopper*. Noviembre, 2013. <http://www.Grasshopper3d.com/forum/topics/galapagos-questions>

Jobson, Christopher. "The visually stunning 'tesseract' scene in *Interstellar* was filmed on a physically constructed set." *Colossal*. Junio, 2015. <http://www.thisiscolossal.com/2015/06/interstellar-tesseract-set/>

Kidziak, Wiktor. "Looking for threads/wooly paths definition." *Grasshopper*. Septiembre, 2011. <http://www.Grasshopper3d.com/group/kangaroo/forum/topics/looking-for-threads-wooly-paths-definition>

Kim, Maeva. "Galapagos and DeLaunay edge network optimization." *Grasshopper*. Julio, 2014. http://www.grasshopper3d.com/forum/topics/galapagos-and-delaunay-edge-network-optimization-1?xg_source=activity

Koert van Mensvoort, "Back to the tribe. Forward to Nature." *Next Nature*. Julio, 2011. <https://www.nextnature.net/2011/07/back-to-the-tribe-forward-to-nature/>

Kong, David. "Street bio: synthetic biology meets community." *Solid*. Junio, 2015. Congreso. <http://conferences.oreilly.com/solid/internet-of-things-2015/public/schedule/detail/45022>

Kory. "Easy Galapagos." *Galapagos*. Abril, 2013. <http://www>.

Grasshopper3d.com/forum/topics/easy-galapagos

Kory "Easy Galapagos." *Grasshopper*. Abril, 2013. <http://www.Grasshopper3d.com/forum/topics/easy-galapagos?x=1&id=2985220%3ATopic%3A832242&page=1#comments> (Possible comparisons between values to be considered for fitness).

Kurweil, Ray. "Biological inspired models of intelligence" *GOOGLE I/O 2014*. https://www.youtube.com/watch?v=MG_nOddk01E#t=38

Kurzgesagt. "Quantum Computers Explained - Limits of Human Technology." *Youtube*. Diciembre, 2015. <https://www.youtube.com/watch?v=JhHMJCUmq28>

Laboratorio de evolución molecular y experimental , Instituto de Ecología, UNAM. <http://web.ecologia.unam.mx/laboratorios/evolucionmolecular/index.php/es/>

La Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo: Declaración de Río del 92: <http://www.un.org/spanish/esa/sustdev/documents/declaracionrio.htm>

Latham, William. "Secret Pasions." *Youtube*. <https://www.youtube.com/watch?v=AN6ngsckRZs>

Latour, Bruno. "Love Your Monsters." *Next-Nature*. Consultado: Septiembre 2014. <https://www.nextnature.net/2014/09/love-your-monsters/>

Leach, Neil, y Patrik Schumacher. "On Parametricism: A Dialogue Between Neil Leach y Patrik Schumacher." *Time + Architecture*. nº 2012/5: pp. 1-8. <http://www.patrikschumacher.com/Texts/On%20Parametricism%20-%20A%20Dialogue%20between%20Neil%20Leach%20and%20Patrik%20Schumacher.html>.

Leber, Jessica. "House of Cards and our future of algorithmic programming." *MIT Technology Review*. Febrero, 2013. <http://www.technologyreview.com/view/511771/house-of-cards-and-our-future-of-algorithmic-programming/>

Lee, Adam. "4 beneficial evolutionary mutations that humans are undergoing right now." *bigthink*. Julio, 2015. <http://bigthink.com/daylight-atheism/evolution-is-still-happening-beneficial-mutations-in-humans>

Lee, Sangsu. "References about Galapagos?" *Grasshopper*. Julio, 2015. <http://www.Grasshopper3d.com/forum/topics/references-about-galapagos?id=2985220%3ATopic%3A77115&page=1#comments>

Lupi, giorgia. "The architecture of a data visualization." Febrero, 2015. <https://medium.com/accurat-studio/the-architecture-of-a-data-visualization-470b807799b4#.xo5t32x48>

López, Jose Carlos. "La moda del Big Data." *el Economista*. Febrero, 2014. <http://www.eleconomista.es/tecnologia/noticias/5578707/02/14/La-moda-del-Big-Data-En-que-consiste-en-realidad.html>

López, Miguel. "Steve Jobs vuelve a atacar a Adobe Flash en una reunión con Wall Street Journal." *Applesfera*. Febrero, 2010. <http://www.applesfera.com/apple/steve-jobs-vuelve-a-atacar-a-adobe-flash-en-una-reunion-con-wall-street-journal>

Maas, Winy, y Nijsee, Rob. *Porous City*. 2012. Thewhyfactory. "Porous-city." <http://thewhyfactory.com/project/porous-city/>

Maizquez, Miguel. "La lista más negra." *20 minutos*. Junio 2010. <http://www.20minutos.es/noticia/728547/0/vertidos/petroleo/claves/>

Marczyk, Adam. "Algoritmos genéticos y computación evolutiva." *The geek*. 2004. <http://the-geek.org/docs/algen/>

María, Ana. "El media TIC, un amigo simpático y poco agraciado." *EL BLOC*. <http://elbloc.net/2012/03/el-media-tic-un-amigo-simpatico-y-poco-agraciado/>

McNeel Wiki. "Monkey." <http://wiki.mcneel.com/developer/monkeyforrhino4>

McNeel Wiki. "Python." <http://wiki.mcneel.com/developer/python>

Mech, J. "Design Under Uncertainty." *Journal of Mechanical Design* 134. 2012. <http://mechanicaldesign.asmedigitalcollection.asme.org/article.aspx?articleid=1484821>

Medium. "When a machine learning algorithm studied fine art paintings, it saw things historians had never noticed." Agosto, 2014. <https://medium.com/the-physics-arxiv-blog/when-a-machine-learning-algorithm-studied-fine-art-paintings-it-saw-things-art-historians-had-never-b8e4e7bf7d3e>

Memory & Imagination: New Pathways to the Library of Congress, Michael Lawrence Fims. http://www.mlfilms.com/productions/m_and_i

Mensvoort, Koert. "Pyramid of technology." *Next Nature*. Agosto, 2014. <https://www.nextnature.net/2014/08/pyramid-of-technology/>

Mensvoort, Koert. "Razorius Gilletus." *Next Nature*. Marzo, 2010. <http://www.nextnature.net/2010/03/razorius-gilletus/>

Metafont. <http://metafont.tutorial.free.fr/>

Michael Hansmeyer. "Projects." <http://www.michael-hansmeyer.com/projects/project3w.html>

Morphocode. "CA. Excitable Media with Rabbit." Noviembre, 2014. <http://morphocode.com/excitable-media-with-rabbit/>

Muñoz, Ramón. "Apple Pay llegará a España en 2016." *El País*. Octubre, 2015. http://economia.elpais.com/economia/2015/10/29/actualidad/1446119500_035355.html

Navarro, Diego. "Adaptación evolutiva de tejidos urbanos a través de análisis computacional." TRP 21 #3 Urbanismo. La Ciudad del futuro. Universidad de Buenos Aires, Abril, 2016. <http://www.trp21.com.ar/trp3/dnavarro.html>

Nanopore Technologies - MinION MkI: <https://www.nanoporetech.com/products-services/minion-mki>

Nate. "Should Architects Learn to Code?" *Proving Ground*. Septiembre, 2015. <http://provingground.io/2015/09/03/should-architects-learn-to-code/>

Negroponte, Nicholas. "A 30-Year history of the future." *TED Talks*, 2014. http://www.ted.com/talks/nicholas_negroponte_a_30_year_history_of_the_future#t-112234

Neoteo. "Un jardín de 53 años dentro de una botella." *ABC*. Abril, 2013. <http://www.abc.es/ciencia/20130415/abci-jardin-anos-dentro-botella-201304151009.html>

Nervous. "Floram System." <http://n-e-r-v-o-u-s.com/projects/albums/floraform-system/>

Nervous. "Systems, Floraform." *Vimeo*. <https://vimeo.com/130977932>

Nesis. "Grasshopper Galapagos Tutorial." *Youtube*. <http://www.youtube.com/watch?v=TGVwz4c6ieY>

Next-Nature. <http://www.nextnature.net/>

Next-Nature. "Innovative Nostalgia". http://www.nextnature.net/themes/innovative-nostalgia/?utm_content=bufferd9132&utm_

medium=social&utm_source=twitter.com&utm_campaign=buffer

Next Nature. "Non Genetic Evolution." http://www.nextnature.net/themes/nongenetic-evolution/?utm_content=buffere21da&utm_medium=social&utm_source=twitter.com&utm_campaign=buffer

Niels. "Galapagos multiple fitnesses best workaround." *Grasshopper*. Febrero 2011. <http://www.Grasshopper3d.com/forum/topics/galapagos-multiple-fitnesses>

Nieves, José Manuel. "Un ordenador pasa por primera vez el test de Turing y convence a los jueces de que es humano." *ABC*. Junio, 2014. <http://www.abc.es/ciencia/20140609/abci-superordenador-supera-primera-test-201406091139.html>

Nuño, Laura. "La industria de la vida: implicaciones filosóficas de la biología sintética." *Youtube*. <https://www.youtube.com/watch?v=koJj80MEiow>

Nuño, Rosa. "Pensamiento tipológico y pensamiento poblacional." *Lauranrg-wordpress*. Abril, 2010. <https://lauranrg.wordpress.com/2010/04/11/pensamiento-pensamiento-tipologico-y-pensamiento-poblacional/>

Oxman, Neri. "Design at the intersection of technology and biology". *TED Talks*, Octubre 2015. http://www.ted.com/talks/neri_oxman_design_at_the_intersection_of_technology_and_biology?share=16b07a3c86#t-110929

Oxman, Neri. "Age of Entanglement." *JoDS Journal of design and science*. Enero, 2016. <http://jods.mitpress.mit.edu/pub/AgeOfEntanglement>

Parsons, Michael, "Tolerance and customization: A question of value", *Australian Design Review*, April 2014. <https://www.australiandesignreview.com/architecture/41321-tolerance-and-customisation-a-question-of-value>

Paul Lamere. The Infinite Jukebox. MIT. <http://labs.echonest.com/Uploader/index.html?trid=TRDYOZR1546C898E6C>

Pavlus, John. "Should you learn to code?" Co-design. Junio, 2014. <http://www.fastcodesign.com/3031413/design-for-living/should-you-learn-to-code>

Penenberg, Adam. "Should everybody learn to code?" *Pando*. Mayo, 2013. <https://pando.com/2013/05/07/should-everybody-learn-to-code-a-pandodaily-meta-media-mashup-of-opinion/>

Piker, Daniel. "Circle packing definition." *Grasshopper*. Agosto, 2014. <http://www.Grasshopper3d.com/group/kangaroo/forum/topics/circle-packing-definition>

Piker, Daniel. "Diffusion limited aggregation." *Grasshopper*. Marzo, 2010. <http://www.Grasshopper3d.com/profiles/blogs/diffusion-limited-aggregation>

Piker, Daniel. "Mesh Mash!" *Space Symmetry Structures*. Septiembre, 2012. <https://spacesymmetrystructure.wordpress.com/2012/09/20/meshmash/>

Piker, Daniel. "Plankton." *Grasshopper*. <http://www.Grasshopper3d.com/group/plankton>

Pinterest. <http://es.pinterest.com/>

Plankton. <https://github.com/meshmash/Plankton>

Plankton. <https://github.com/meshmash/Plankton>

Plataforma arquitectura. "NA House Fujimoto." <http://www.>

plataformaarquitectura.cl/cl/02-155411/casa-na-sou-fujimoto

Plataforma Arquitectura. "Por qué la arquitectura verde pocas veces merece su nombre." <http://www.plataformaarquitectura.cl/cl/02-276919/por-que-la-arquitectura-verde-pocas-veces-merece-su-nombre>.

Playstation. "No man's sky gameplay trailer." *Youtube*. <https://www.youtube.com/watch?v=nLtmEjqzg7M>

Popescu, Adam. "Why write your own book when an algorithm can do it for you?" *readwrite*. Enero, 2013. <http://readwrite.com/2013/01/15/why-write-your-own-book-when-an-algorithm-can-do-it-for-you>

Processing. <https://processing.org/>

Programa 21. <http://web.archive.org/web/20090420073232/http://www.un.org/esa/sustdev/documents/agenda21/spanish/agenda21sptoc.htm>

Provingground. "Using Data in Your Design Process." Agosto, 2015. <http://provingground.io/2015/08/27/using-data-in-your-design-process/>

Ray, Kate. "Don't believe anyone who tells you learning to code is easy." *Techcrunch*. Mayo, 2014. http://techcrunch.com/2014/05/24/dont-believe-anyone-who-tells-you-learning-to-code-is-easy/?ncid=fb&utm_source=feedburner&utm_medium=feed&utm_campaign=fb&utm_content=FaceBook

Realfow. "Advanced simulations in architectural design." UCL Bartlett school of architecture. <http://www.realfow.com/product/production/casestudies/38/>

Renzo Piano, "Fundación Jérôme Seydoux-Pathé en París." *Arquitecturaviva*. <http://www.arquitecturaviva.com/es/Info/News/Details/5882>

Rhino News. "food4rhino news: a new store and more!" Junio, 2014. http://blog.rhino3d.com/2014/06/food4rhino-news-new-store-and-more.html?utm_source=twitterfeed&utm_medium=twitter

Richtel, Matt. "Reading Writing, arithmetic and lately coding." *The Nueva York Times*. Mayo, 2014. http://www.nytimes.com/2014/05/11/us/reading-writing-arithmetic-and-lately-coding.html?_r=0

Rosenblatt, Seth. "Google's self-driving car turns ot to be a smart ride." *Road Show*. <http://www.cnet.com/roadshow/news/googles-self-driving-car-turns-out-to-be-a-very-smart-ride/>

Runemadsen. <http://runemadsen.com/>

Runemadsen. "On meta design and algorithmic design systems." <http://runemadsen.com/blog/on-meta-design-and-algorithmic-design-systems/>

Runemadsen. "Tiny artists." <http://runemadsen.com/work/tiny-artists/>

Ruten, David. "Worrisome trends in architecture education". *I Eat Bugs for breakfast*. Agosto, 2013. <https://ieatbugsforbreakfast.wordpress.com/2013/08/09/worrisome-trends-in-architecture-education/>

Rutten, David. "A half-arsed idea for a computer game." *I Eat Bugs For Breakfast*. Septiembre, 2012. <http://ieatbugsforbreakfast.wordpress.com/2012/09/30/a-half-arsed-idea-for-a-computer-game/>

Rutten, David. "Another Galapagos Tutorial." *I eat bugs for breakfast*. Septiembre, 2013. <http://ieatbugsforbreakfast.wordpress.com/2013/09/17/another-galapagos-tutorial/>

Rutten, David. "Another Galapagos Tutorial." *I eat bugs for breakfast*. Septiembre, 2013. <http://ieatbugsforbreakfast.wordpress.com/2013/09/17/another-galapagos-tutorial/>

Rutten, David. "Another Galapagos Tutorial." *I eat bugs for*

breakfast. Septiembre, 2013. <http://ieatbugsforbreakfast.wordpress.com/2013/09/17/another-galapagos-tutorial/>

Rutten, David. "Architectural design magazine publication." *I eat bugs for breakfast*. Octubre, 2012. <http://ieatbugsforbreakfast.wordpress.com/2012/10/23/architectural-design-magazine-publication/>

Rutten, David. "A splash of colour." *Grasshopper*. Junio, 2015. <http://www.Grasshopper3d.com/photo/a-splash-of-colour?context=user>

Rutten, David. "Colour picker UI test." *Youtube*. <https://www.youtube.com/watch?v=xelsMC5LZbk>

Rutten, David. "Data tree selection rules." *Grasshopper*. Noviembre, 2013. <http://www.Grasshopper3d.com/forum/topics/datatree-selection-rules> . Video con demostración <http://vimeo.com/78886857>

Rutten, David. "Evolutionary principles applied to problem solving." *I eat bugs for breakfast*. Marzo, 2011. <http://ieatbugsforbreakfast.wordpress.com/2011/03/04/epatps01/>

Rutten, David. "Evolutionary solver: fitness functions." *I eat bugs for breakfast*. Marzo, 2011. <http://ieatbugsforbreakfast.wordpress.com/2011/03/04/fitness-functions/>

Rutten, David. "Fitness Pressure." *I eat bugs for breakfast*. Marzo, 2011. <http://ieatbugsforbreakfast.wordpress.com/tag/galapagos/>

Rutten, David. "Galapagos Day 02." *Grasshopper*. Enero, 2010. <http://www.Grasshopper3d.com/video/galapagos-day-02>

Rutten, David. "Galapagos Day 04." *Grasshopper*. Enero, 2010. <http://www.Grasshopper3d.com/photo/galapagos-day-04>

Rutten, David. "Grasshopper 2 function editor." *Grasshopper*. Noviembre, 2015. <http://www.Grasshopper3d.com/video/Grasshopper2-function-editor>

Rutten, David. "Illustrations for my ICGG2014 paper." *I eat bugs for breakfast*. Febrero, 2014. <http://ieatbugsforbreakfast.wordpress.com/2014/02/17/illustrations-for-my-icgg2014-paper/>

Rutten, David. "Immutable classes, my new favourite methodology." *I Eat bugs for breakfast*. Septiembre, 2014. <http://ieatbugsforbreakfast.wordpress.com/2014/09/08/immutable-classes-my-new-favourite/>

Rutten, David. "Multiple local optima." *I eat bugs for breakfast*. Diciembre, 2011. <http://ieatbugsforbreakfast.wordpress.com/2011/12/01/multiple-local-optima/>

Rutten, David. "My life from before the wave function collapse." *I eat bugs for breakfast*. Febrero, 2013. <https://ieatbugsforbreakfast.wordpress.com/2013/02/18/my-life-from-before-the-wave-function-collapse/>

Rutten, David. "Partial Developer Absence." *Grasshopper*. Octubre, 2011. <http://www.Grasshopper3d.com/forum/topics/partial-developer-absence>

Rutten, David. "Random engine experiments." *Grasshopper*. Diciembre 2014. http://www.Grasshopper3d.com/photo/random-engine-experiments?xg_source=activity

Rutten, David. "The Why and How of data Trees." *Grasshopper*. Enero, 2015. <http://www.Grasshopper3d.com/forum/topics/the-why-and-how-of-data-trees>

Ryman Eco. www.rymaneco.co.uk

S.a. "Nuevas cartas revelan la lucha de Alan Turing con su sexualidad." *El País*. Agosto, 2015. <http://elpais.com/elpais/2015/08/25/>

ciencia/1440514825_762019.html

Sabán, Antonio. "Los chips basados en neuronas biológicas quieren desafiar la ley de Moore." *Biothinkbig.com*. Marzo, 2016. <http://blogthinkbig.com/los-chips-basados-en-neuronas-biologicas-quieren-desafiar-la-ley-de-moore/>

Sagmeister & Walsh. "Casa da musica." <http://www.sagmeisterwalsh.com/work/project/casa-da-musica-identity/>

Schiller, Jakob. "Inside the hellscape where our computers go to die." *Wired*. Abril, 2015. http://www.wired.com/2015/04/kevin-mcelvaney-agboglobshie/?mbid=social_twitter

Schumacher, Patrick, "Parametricism and Progress." parametricism2.org

Schumacher, Patrick. "Gearing up to make an impact." *Parametricism*. www.parametricism2.org

Schumacher, Patrick. "Parametricism against pluralism." parametricism2.org

Schumacher, Patrik. "A unified agenda for architecture: the built environment as frame and interface of communication." *Parametricism*. Agosto, 2015. <http://parametricism2.org/2015/08/09/hello-world/>

Schumacher, Patrik. "In Which Style Should We Build?" parametricism2.org

Science Advances. "Accelerated modern human-induced species losses: Entering the sixth mass extinction." Junio 2015. <http://advances.sciencemag.org/content/1/5/e1400253.full>

Scientiablog. "La verdadera historia de los alimentos "Bio".” Marzo 2011. <http://scientiablog.com/2011/03/16/la-verdadera-historia-de-los-alimentos-%E2%80%9Cbio%E2%80%9D/>

Secondsky. "Join string into the format function." *Grasshopper*. Agosto, 2012. <http://www.Grasshopper3d.com/forum/topics/join-string-into-the-format-function>

Sethbling. "Marl/O Machine Learning for video games." *Youtube*. https://www.youtube.com/watch?list=PLrEnWoR732-BHrPp_Pm8_VleD68f9s14-¶ms=OAFIAvgF&v=qv6UVOQ0F44&mode=NORMAL&app=desktop

Siggraph. "Metaballs." <http://www.siggraph.org/education/materials/HyperGraph/modeling/metaballs/metaballs.htm>

Skitterbot. "Las tortugas de Grey Walter (1948)." *Youtube*. <https://www.youtube.com/watch?v=iLULRImXkKo>

Sims, Karl. <http://www.karlsims.com/>

Siroky, Dan. "ACADIA 2015 Hackathon - Sending Snippets via Flux." *Grasshopper*. Octubre, 2015. <http://www.Grasshopper3d.com/profiles/blogs/acadia-2015-hackathon-sending-snippets-via-flux>

Sitler, Ben. "Guide to creating custom Grasshopper 0.6.X components." *Grasshopper*. Marzo, 2010. <http://www.Grasshopper3d.com/forum/topics/guide-to-creating-custom>

Slezak, Michael. "Giant leaps of evolution make cancer cells deadly." *New Scientist*. Enero, 2014. http://www.newscientist.com/article/mg22129533.100-giant-leaps-of-evolution-make-cancer-cells-deadly.html?full=true#.VY7Xs_ntlBc

Slezak, Michael. "Monster cancer chromosome is made from shattered DNA." *New Scientist*. Noviembre, 2014. <http://www.newscientist.com/article/dn26530-monster-cancer-chromosome-is-made-from-shattered->

dna.html#.VY7T4PntlBf

Space Symmetry Structure. "Project Kangaroo. Live 3D Physics for Rhino/Grasshopper. Update" <https://spacesymmetrystructure.wordpress.com/2010/01/21/kangaroo/> podemos encontrar rastros de los primeros tests en este artículo de enero de 2010.

Stadler, Peter F. *Special Issue on Applications of Cellular Automata in Complex Systems*. Singapore: World Scientific, 2002.

Stasiuk, David, "Marching Cubes: Curve Wrapping & More Metaballs" *Grasshopper*. Enero, 2014. <http://www.Grasshopper3d.com/profiles/blogs/marching-cubes-curve-wrapping-more-metaballs>

Stockton, Nick. "How it's possible for a baby to have three parents." *Wired*. Abril, 2015. http://www.wired.com/2015/02/baby-two-mommies-daddy-cool/?mbid=social_twitter

Suckerpunchdaily. "Patternism." <http://www.suckerpunchdaily.com/2015/06/08/patternism-2/>

Syp, Marc. "Pain points in Grasshopper." *Grasshopper*. Mayo, 2013. http://www.Grasshopper3d.com/forum/topics/pain-points-in-grasshopper?xg_source=msg_com_forum&id=2985220%3ATopic%3A1069769&page=2#comments

Tangible Media Group. *Biologic*. MIT, Noviembre, 2015. <https://vimeo.com/142208383>

Terraform One. *In vitro meat*. <http://www.archinode.com/arch.html>

The Architectural Review. "Farewell modernism - and modernity too." Enero 2012. <http://www.architectural-review.com/the-big-rethink-farewell-to-modernism-and-modernity-too/8625733.article>

The Daily Beast. "How Humans Are Still Evolving To Avoid Extinction." Marzo, 2015. <http://www.thedailybeast.com/articles/2015/03/15/humans-nature-unnatural-selection.html>

The Daily Beast. "The Sixth Mass Extinction: We Aren't The Dinosaurs, We're The Asteroid." Junio, 2015. <http://www.thedailybeast.com/articles/2015/06/28/the-sixth-mass-extinction-we-aren-t-the-dinosaurs-we-re-the-asteroid.html>

The economist. "A is for algorithm." Abril, 2014. <http://www.economist.com/news/international/21601250-global-push-more-computer-science-classrooms-starting-bear-fruit>

The ryg blog. "Half edge based mesh representations theory." <https://fgiesen.wordpress.com/2012/02/21/half-edge-based-mesh-representations-theory/>

Trofa, Francesco. "Rhino 6 - adelanto exclusivo de DDD." *Treddi.com*. Mayo, 2016 <http://www.treddi.com/cms/news/rhino-6-anteprima-esclusiva-al-ddd-2016/3011/>

Usai, Sylvain. "Random true false pattern controlling items." *Grasshopper*. Agosto, 2013. En: <http://www.Grasshopper3d.com/forum/topics/random-true-false-pattern-controlling-n-items>

Ussía, Alfonso. "Plan de emergencia para la tierra." *LA RAZÓN*. Junio, 2012. <http://www.larazon.es/noticia/3602-los-humanos-podrian-estar-provocando-un-nuevo-estado-planetario>

UW CSE News. "Responding to the explosion of student interest in computer science." Mayo, 2014. <https://news.cs.washington.edu/2014/05/19/responding-to-the-explosion-of-student-interest-in-computer-science/>

Vegetarian Architecture. <http://architecture.mit.edu/lecture/vegetarian->

architecture

Vertical Garden Patrick Blanc. <http://www.verticalgardenpatrickblanc.com/>

Vimeo. "e-David Robot Painting." 2013. <https://vimeo.com/68859229>

Vottl, Christopher. "Karamba+Galapagos video tutorial." Grasshopper. Abril, 2015. <http://www.grasshopper3d.com/forum/topics/karamba-galapagos-video-tutorial>

Wang, Yuwei. *Barcelona: block city*. AA projective cities, Abril, 2012. <http://projectivecities.aaschool.ac.uk/portfolio/yuwei-wang-barcelona-block-city/>

Wolfram, Stephen. "A new kind of science and the future of mathematics." Enero, 2004. <http://www.stephenwolfram.com/publications/a-new-kind-of-science-future-mathematics/>

Wolfram. "Demonstrations Projects." <http://demonstrations.wolfram.com/topic.html?topic=NKS+%2F+Wolfram+Science&limit=20>

Wouters, Niels. "Thesis - Parametric Design." *Vimeo*. 2011. <https://vimeo.com/20281163>

Xataka Ciencia. "Hemos alcanzado los límites de la agricultura." <http://www.xatakaciencia.com/medio-ambiente/hemos-alcanzado-los-limites-de-la-agricultura>

Young, Liam. "On speculative architecture and engineering the future." *Next Nature*. Marzo, 2015. <http://www.nextnature.net/2015/03/interview-liam-young-on-speculative-architecture-and-engineering-the-future/>

Zas, Mónica. "Alan Turing recibe el indulto póstumo." *eldiario.es*. Diciembre, 2013. http://www.eldiario.es/turing/Alan-Turing-indulto-homosexualidad_0_210678993.html

Zizek, Slavoj. "Nature does not exist." *Youtube*. Abril, 2011. [I eat bugs for breakfast. Octubre, 2012. <http://ieatbugsforbreakfast.wordpress.com/2012/10/23/architectural-design-magazine-publication/>](http://www.youtube.com/watch?v=DIGeDAZ6-q4&feature=relatedagbogbloshe/?mbid=social_twitterRutten, David.)

6.3. Índice extendido

1. Introducción	15
1.1. Objetivos	17
1.2. Justificación	19
1.3. Metodología	25
Recopilación: interdisciplinariedad	25
Otras consideraciones	30
Asociación y aplicación: experimentos en Grasshopper	31
Contrastación: AA Londres y ESARQ Barcelona	32
2. Contexto bio-digital:	35
2.1. Naturaleza y su papel en la arquitectura	37
2.1.1. Naturaleza como arquitectura durante lo pre-digital	37
Arquitectura primigenia: cuevas y casas-árbol	37
Emancipación: naturaleza y cultura	39
Retorno a la naturaleza: el jardín y el espejo	42
Naturaleza como elemento verdaderamente arquitectónico	46
2.1.2. Abstracción del concepto natural en la arquitectura	48
Antoni Gaudí: geometría de la naturaleza	53
2.1.3. Naturaleza contemporánea	57
Naturaleza estanca / crítica al modelo maceta	57
El ser humano como fuerza de la naturaleza	61
'Next Nature'	63
2.2. Herramientas como naturaleza humana	69
2.2.1. La esfera digital	71
Estado actual y adopción	75
2.2.2. Máquinas computadoras	81
2.2.3. Diseño por computación	84
2.2.4. El lenguaje de la lógica	91
Ecuaciones y algoritmos	92
Código y programación	94
2.2.5. Grasshopper, software para una tesis	107
Grasshopper, modelado algorítmico	107
Comunidad de Grasshopper	109
Ecosistema de Grasshopper	110
Listado de plug-ins/add-ons	113

Algunos plug-ins para Rhino3D	113
Urbanismo/ecología	114
Mallas/Topológico	114
Reiterativos	115
Dinámico/Genético	116
Herramientas	116
Fabrication tools	117
Exportación	117
'Algorithmic Solvers'	118
Físicos/Estructurales	119
Extras	120
Grasshopper 2.0	120
2.3. Lo paramétrico	123
2.3.1. Software y su componente paramétrica	124
2.3.2. Diseño paramétrico, el Meta-Diseño	126
2.3.3. Repercusión estilística de lo paramétrico en la arquitectura	132
El Parametricismo de Patrick Schumacher	138
Pluralismo frente a Pseudo-digital	145
2.4. 'Biolearning': cuando lo digital se torna natural	155
2.4.1. Diseño de materiales (máxel)	162
2.4.2. Lo biológico como software (biología sintética)	165
Sobre la arquitectura verdaderamente genética	170
3. Procesos de emergencia	177
3.1. Emergencia y sistemas complejos	179
3.1.1. La Morfogénesis de Alan Turing	180
3.1.2. La "Nueva ciencia" de Stephen Wolfram	183
Patrones de la arquitectura	189
3.1.3. La arquitectura genética de Karl S. Chu	192
Morfodinámico como proceso genético	195
3.2. Evo-Devo: biología evolutiva del desarrollo	197
3.2.1. Evolución (biológica)	197
Creacionismo y Reduccionismo	200
Estructuras y clasificaciones evolutivas	203
3.2.2. Desarrollo (biológico)	207
Organismos multicelulares ('selfsignaling')	208
Embriología ('switches' y 'homeobox')	210
Mutaciones ('hopeful monsters')	212
Topologías de cambio ('body-plan')	218

3.3. Algoritmos Evolutivos (ES: evolutive solver)	223
3.3.1. Descripción y funcionamiento de un ES	223
Funcionamiento de Galápagos ES	227
Enunciados para ES ('fitness')	231
Tendencias y geografías de poblaciones ('fitness landscape')	233
Algoritmos Multiobjetivo de Octopus ES	236
Consideraciones sobre ES **	239
3.3.2. Diseño evolutivo (y cibernética) en arte e ingeniería	241
Diseño evolutivo en el arte	241
Diseño evolutivo en ingeniería	244
3.3.3. Arquitectura evolutiva	247
'Wicked Problem'	255
Conceptos susceptibles de ser parametrizados	258
Aplicaciones prácticas	262
Passive Biodigital Housing, Innsbruck, 2014	262
Scale System Pavilion, Barcelona, 2015	263
Iglesia Nuestra Señora del Valle, Madrid, 2016	263
3.4. Modelo de desarrollo computacional	269
3.4.1. Estrategias de Estructuras Formales	270
Sistemas de ramificación (L-Systems)	271
Células: teselación y subdivisión	274
3.4.2. Mallas poligonales como topología	278
Flexibilidad en 'Meshes Remeshing'	278
Subdivisión y Continuidad topológica	280
Agregación de células y fusión de mallas	284
'Half Edge System'	285
'Implicit surfaces'	287
'Marching Cubes'	288
3.5. Repercusiones embriológicas en el modelo evolutivo	290
4. Desarrollo de experimentos prácticos	293
Exp. 0: 'Radiolaria development', 2011	295
4.1. Exp. 1: Superposición de patrones	299
Color, información, y voxels ('meshes')	300
Máscaras paramétricas ('switches' genéticos)	301
4.2. Exp. 2: Abstracción Evo-Devo en geometría	313
4.3. Exp. 3: Evolución de tejidos urbanos	321
'L'Eixample' de Cerdà	322
Aproximación y configuración	326

Parámetros del experimento	326
Mono-objetivo VS Multi-objetivo (múltiples 'fitness')	329
Datos del experimento	332
Estadística descriptiva	333
Resultados	334
Permutaciones e individuos en la población	340
Anexos	342
Feedback inicial del eCAADe	342
Mejoras respecto a la definición original	342
4.4. Exp. 4: Fórmula de Idefons Cerdà	345
4.5. Exp. 5: 'Evolutionary Development' a través de Grasshopper	351
Introducción de 'body-plan' y regulación de genes.	351
Modificación del 'body-plan' y el uso de 'random seeds'	354
Responsividad y Autoconsciencia	360
5. Conclusiones: implicaciones y futuribles	371
5.1. Emergencia digital: patrones aleatorios y sistemas procedurales	373
5.2. Incertidumbre en el diseño e "hiperlocalidad"	376
5.3. Arquitectura Evo-Devo: simulaciones computacionales	379
5.4. Mas allá de Evo-Devo	383
6. Bibliografía y contenidos	387
6.1. Referencias publicadas	387
6.2. Referencias en Internet	403
6.3. Índice extendido	419

