
Complejidad y arquitectura de redes sostenibles entre la biosfera y la tecnoosfera: de internet a gaia

Ignacio Ayestarán

Departamento de Filosofía, UPV/EHU

Abstract. *Complexity and architecture of sustainable networks between the biosphere and the technosphere: from the internet to gaia.*

Focusing on a global world, we should seek to understand the architecture of sustainable networks between the (real) biosphere and the (virtual) technosphere, from the World Wide Web to the global ecology, from the Internet to Gaia in a symbiotic planet, where the Earth is a global brain/mind.

Keywords: Sustainability, Networks, Biosphere, Technosphere, World Wide Web, Internet, Gaia, Earth, Sciences of complexity.

Resumen

Desde un mundo global, deberíamos perseguir la comprensión de la arquitectura de redes sostenibles entre la biosfera (real) y la tecnoosfera (virtual), desde la World Wide Web hasta la ecología global, desde Internet a Gaia en un planeta simbiótico, donde la Tierra es un cerebro o mente global.

Palabras claves: Sostenibilidad, Redes, Biosfera, Tecnoosfera, World Wide Web, Internet, Gaia, Tierra, Ciencias de la complejidad.

La compleja globalización tecnoeconómica ha traído una cantidad ingente de información y comunicación que se extiende ya como una capa superpuesta a nuestro planeta. Fotos, blogs, correos electrónicos, periódicos, vídeos, televisiones y otras fuentes de emisión de información y comunicación recorren el planeta como un espectro que hubiera salido de la caverna platónica para extenderse por cada uno de los rincones de la faz de la Tierra, tal y como atestigua el informe *La expansión del universo digital*, realizado por la consultora IDC.

Este estudio, que analiza la creación e intercambio de información digital en 2006 y aventura su posible evolución hasta 2010, confirma que en el mundo hay tal cantidad de información digital que, con ella impresa, se podría envolver el planeta cuatro veces. En

2006 se crearon 161.000 millones de gigabytes de información y la información digital de dicho año es tres millones de veces superior a la de los libros escritos. Hay 900 millones de ordenadores, 550 millones de reproductores de música digital, 600 millones de teléfonos móviles con cámara, 400 millones de cámaras, 120 millones de registros en Internet y unos 1.100 millones de internautas en un planeta de 6.500 millones de habitantes humanos.

La información digital que contienen todos estos dispositivos suma 161.000 millones de gigabytes, el equivalente a tres millones de veces la información contenida en todos los libros escritos o a 12 pilas de libros que cubrieran, cada una de ellas, la distancia entre la Tierra y el Sol. Y en tres años, esa cifra se multiplicará por seis, hasta los 988.000 millones de gigabytes. El 70% de los contenidos generados en el 2006 se deben a la iniciativa de usuarios particulares. Todo un reto para la gestión de la información y comunicación, ya que presumiblemente el 85% de toda esa información será gestionada en un futuro por empresas. En cuanto a la geografía de la información, los países desarrollados controlan buena parte de este nuevo mundo digital: el 72% de los nuevos contenidos se generan en Norteamérica y Europa Occidental. Sin embargo, el ritmo de creación en los países emergentes crecerá entre un 30% y un 40% más rápidamente que en los desarrollados.

En relación a las fuentes de emisión de este mundo digital, se constata que sólo una cuarta parte del contenido digital, aproximadamente, es original, y el resto está duplicado o replicado (correos electrónicos reenviados, copias de seguridad, películas, canciones, archivos varios). La mayor parte de esa información son imágenes, que suponen una cuarta parte del total, aunque su peso sea superior al de los textos o el audio.

Con frecuencia se olvida que esta infosfera del mundo digital se asienta en la biosfera de la Tierra. Para empezar, la infosfera de las tecnologías de la información y de la comunicación produce una elevada contaminación sobre la biosfera. En esto la tercera revolución industrial informática, no resulta más limpia que la del acero o la de los carburantes.

La media de peso de 24 kilos de un ordenador de mesa con un monitor medio requiere al menos 10 veces su peso en combustibles fósiles y químicos para su elaboración, lo que significa materiales mucho más intensos que un coche o un refrigerador, que tan sólo requieren una o dos veces su peso en combustibles químicos. En concreto, para la fabricación de un ordenador de mesa y un monitor de 17 pulgadas se necesitan al menos

240 kilos de combustibles fósiles, 22 kilos de compuestos químicos y 1.500 kilos de agua. Es decir, un total de 1,8 toneladas de materiales, equivalente al peso de un rinoceronte, según los datos de la Universidad de las Naciones Unidas y Ruediger Kuehr (R. Kuehr y E. Williams 2003).

Si en el mundo hay 900 millones de ordenadores, su huella ecológica alcanza por lo menos el peso equivalente a 900 millones de rinocerontes, ya que hay ordenadores potentes en centros de investigación que superarían el peso medio de 1,8 toneladas. La propia Agencia Europea del Medio Ambiente calcula que el volumen de 'e-basura' aumenta tres veces más rápidamente que otras formas de basura municipal, hasta el punto de que el volumen total ya es cercano a 40 millones de toneladas métricas, que, cargadas en camiones, supondría una caravana de vehículos que abrazaría la mitad de la circunferencia de la Tierra. Todos estos datos confirman la modificación material y planetaria del ser humano.

Ya Marshall McLuhan fue uno de los pioneros en destacar que con el advenimiento de la era electrónica y la electricidad, el mundo de la materia se había convertido en un gran nervio, vibrando a miles de kilómetros en una milésima de segundo. Así, el globo del planeta se habría transformado en una vasta cabeza, un cerebro, un instinto con capacidad de inteligencia global mediada tecnológicamente.

Llegó a esa conclusión a partir de una premisa ontológica y antropológica: todos los artefactos del ser humano, el lenguaje, las leyes, las ideas e hipótesis, las herramientas, la ropa y los ordenadores son extensiones del cuerpo humano. Todos los medios de comunicación son una reconstrucción, un modelo de alguna capacidad humana o biológica: la rueda es una extensión del pie, el libro es una extensión del ojo, la ropa una extensión de la piel y el sistema de circuitos electrónicos es una extensión del sistema nervioso central.

Desde esta premisa ontológica y antropológica McLuhan exploraba la tecnosfera como una prolongación del ser humano sobre la biosfera, donde el ser humano desarrollaba extensiones o prolongaciones para realizar casi todos los actos que antes efectuaba sólo con su cuerpo. Diríase que todas las cosas materiales realizadas por el ser humano pueden considerarse como extensiones de lo que antes hizo con su cuerpo o con alguna parte especial de él:

- La evolución de las armas comenzó en los dientes y el puño y continúa a escala planetaria en la bomba atómica.
- El vestido y la casa son extensiones del mecanismo biológico para la regulación de la temperatura.
- Los muebles han sustituido a los talones o al suelo, cuando el ser humano necesita sentarse y descansar.
- Las máquinas-herramienta, las lentes, la televisión, los teléfonos y los libros, que transmiten la voz a través del tiempo y el espacio, son extensiones materiales para la información y la comunicación.
- El dinero aparece como un medio para extender y almacenar el trabajo.
- Las redes de transporte hacen ahora lo que antes hacían nuestros pies y nuestras espaldas.

Incluso McLuhan se atrevía a enfatizar que el antecesor del *homo ciberneticus* actual, esto es, el hombre electrónico, usa su cerebro fuera del cráneo y su sistema nervioso encima de su piel (M. McLuhan y B. R. Powers 1986). Sin conocer todavía las potencialidades de la red Internet y de la telaraña de las teletecnologías actuales, McLuhan declaraba que el ser humano electrónico de la aldea global es como una araña expuesta agazapada en una telaraña, resonando con todas las demás arañas. El ser (humano) se comprende y se altera en una fusión de la ontología y la tecnología en una nueva premisa tecnontológica.

En el caso de McLuhan esta premisa deriva de su lectura de Pierre Teilhard de Chardin. En las primeras páginas dedicadas a la génesis del ‘homo typographicus’ y al advenimiento de la galaxia Gutenberg, McLuhan reconocía ya en 1962 que Teilhard de Chardin se había percatado de la membrana cósmica que la dilatación eléctrica de nuestros sentidos ha envuelto el planeta. “Este mayor alcance externo de nuestros sentidos crea lo que Chardin llama la noosfera o cerebro tecnológico del mundo. En lugar de evolucionar hacia una enorme biblioteca de Alejandría, el mundo se ha convertido en un ordenador, un cerebro electrónico, como en un relato de ciencia-ficción para niños. Y a medida que nuestros sentidos han salido de nosotros, el ‘Gran Hermano’ ha entrado en nuestro interior” (M. McLuhan 1997).

McLuhan atribuye esta premisa tecnontológica a Teilhard de Chardin, pero

en realidad no es un pensamiento exclusivo de él. El concepto ‘noosfera’ nació en la década de los años 20 del pasado siglo, cuando, en un fecundo diálogo, el geoquímico ruso Vladimir Ivanovich Vernadsky, el filósofo y matemático francés Édouard Le Roy y el jesuita paleontólogo galo Pierre Teilhard de Chardin reconocieron que por primera vez en la historia de la humanidad la biosfera del planeta era recubierta por una capa de pensamiento que denominaron noosfera, la “Tierra pensante”.

Vernadsky refiere en su publicación “La biosfera y la noosfera” cómo pudo surgir este término. El geoquímico ruso pronunció una serie de conferencias en la Sorbona de París entre 1922 y 1923, donde reconocía los fenómenos geoquímicos como la base de la biosfera. El contenido de parte de esas conferencias se publicó en su libro *Estudios de Geoquímica*, obra que apareció primero en francés, en 1924, y después en traducción rusa, en 1927. El matemático francés Le Roy, un filósofo bergsoniano, aceptó como punto de partida el fundamento biogeoquímico de la biosfera, y en sus conferencias pronunciadas en el College de France en París introdujo en 1927 el concepto de la noosfera como fase por la que se encuentra pasando actualmente la biosfera desde el punto de vista geológico. Le Roy subrayó que había llegado a tal idea en colaboración con su amigo Teilhard de Chardin, geólogo y paleontólogo, y así lo admitía Vernadsky.

Le Roy seguramente fue punto de encuentro entre Vernadsky y Teilhard de Chardin y de hecho fue el primero que habló de la noosfera (E. Le Roy 1927). A partir del *élan vital* en la evolución creadora de Henri Bergson y del empleo del concepto de biosfera por Vernadsky, tras diversas conversaciones con Teilhard de Chardin, concibió la hominización como la transición de la biosfera a la noosfera de forma que el ser humano dejase de ser una excrescencia paradójica o un tipo de anomalía en la evolución, estableciendo una doble relación por la que la humanidad se explica por la naturaleza y, recíprocamente, la naturaleza por la humanidad, ya que la ‘vitalización’ de la materia ha condicionado la hominización y viceversa: ésta puede ayudarnos a comprender el proceso de ‘vitalización’ planetaria (E. Le Roy 1928).

En esta línea de pensamiento, Vernadsky pensó la noosfera a partir de las bases geoquímicas de la biosfera. El concepto de biosfera como “área de la vida” ya había sido introducido en biología por Jean Baptiste Lamarck y Eduard Suess. Vernadsky retoma este término aduciendo que la biosfera se caracteriza por ser el campo de la vida, que incluye

la totalidad de la troposfera atmosférica, los océanos y una delgada capa de las zonas continentales, de un espesor de tres o más kilómetros. A partir de ahí se plantea cuál es el impacto de la humanidad en la biosfera planetaria.

Vernadsky (1945) se percató de que en el siglo XX, el ser humano, por primera vez en la historia de la Tierra, ha conocido y abarcado la biosfera en su totalidad, ha completado el mapa geográfico del planeta y ha colonizado toda su superficie. “La humanidad se ha convertido en una sola totalidad en la vida de la Tierra”. No hay lugar alguno en la Tierra donde el hombre no pueda vivir si así lo desea, como lo demostraba, según Vernadsky, la estancia del pueblo ruso en los hielos flotantes del Polo Norte en 1937-1938. Al mismo tiempo, gracias a las poderosas técnicas y a los éxitos del pensamiento científico, de la radio y de la televisión, el ser humano es capaz de dirigirse de forma instantánea a todo aquel a quien desee en cualquier punto del planeta. El transporte aéreo se realiza a una velocidad de varios cientos de kilómetros por hora, y todavía no había alcanzado su límite máximo, escribía en 1945.

Según el geoquímico ruso, tomada en su conjunto, la humanidad se está convirtiendo en una poderosa fuerza geológica. Se plantea entonces el problema de la “reconstrucción de la biosfera en interés de la humanidad libre pensadora como totalidad”. “Este nuevo estado de la biosfera, al que nos aproximamos sin darnos cuenta, es la *noosfera*”.

Para Vernadsky por primera vez en la historia de la humanidad, los intereses de las masas por un lado y el libre albedrío de los individuos por otro determinan el curso vital de la humanidad a escala planetaria. Así, surge la noosfera como una fuerza biogeológica en la Tierra. “La noosfera constituye un nuevo fenómeno geológico en nuestro planeta. En él, y por primera vez, el hombre deviene una *fuerza geológica de enorme magnitud*”. La noosfera es la última de las etapas habidas en la evolución de la biosfera en la historia geológica. Todo ello, a juicio del científico ruso, “es el resultado de la ‘cefalización’, del crecimiento del cerebro humano y del trabajo dirigido por ese cerebro”, es decir, la noosfera es un proceso de cefalización planetaria por la hominización global.

Esta idea de cerebrización o cefalización planetarias la adquiere Vernadsky de J. D. Dana y J. Le Conte, que expusieron, antes de 1859, la generalización empírica de que la evolución de la materia viva avanza en una misma dirección categórica. A ese fenómeno lo llamó Dana “cefalización” y Le Conte “era psicozoica”. Así se constata desde una visión

material(ista) que toda la humanidad junta representa una masa insignificante en relación con la materia del planeta y que su fuerza deriva no de su materia, sino de su cerebro. “Si el hombre comprende todo esto y no usa su cerebro y su trabajo para autodestruirse, se abre delante de él un inmenso futuro en la historia geológica de la biosfera” (V. I. Vernadsky 1945).

En resumen, para Vernadsky, existe una capa pensante de materia organizada en crecimiento que altera la superficie terrestre y que asocia con la humanidad y su tecnología. Para identificarla adoptó el término *noosfera*, del griego *noos*, mente o espíritu. Teilhard de Chardin adoptará el mismo término pero con otro uso. Para él la noosfera era la capa planetaria “humana”, una capa “externa a la biosfera y por encima de ella”, mientras que para Vernadsky la noosfera hacía referencia a la humanidad y la tecnología como parte integral de la biosfera planetaria (L. Margulis y D. Sagan 1995: 44-45; D. Sagan 1990: 57).

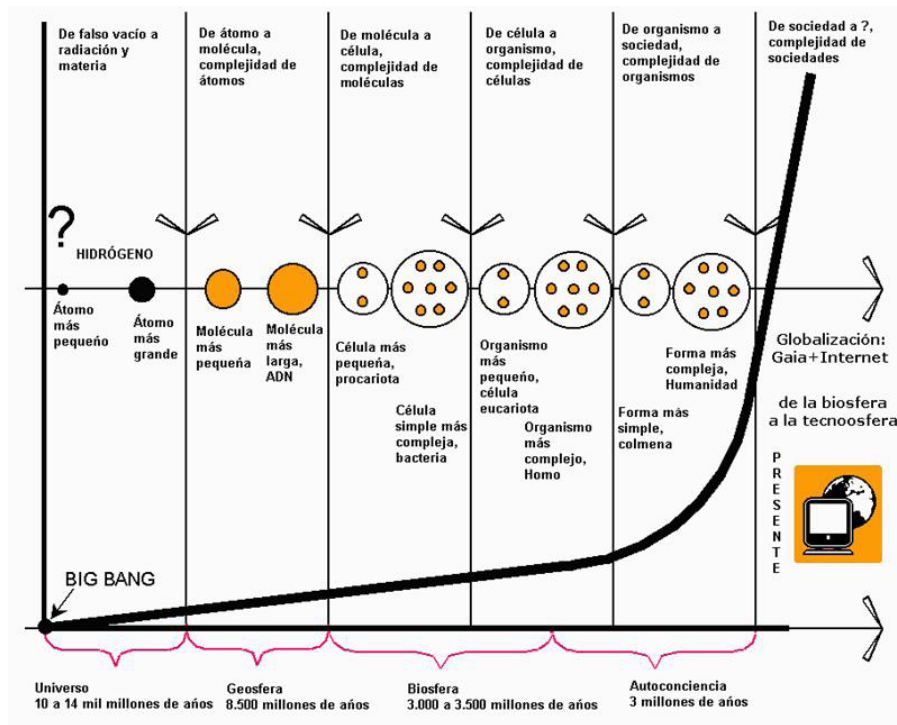
Teilhard de Chardin alude a la formación, a partir de y por encima de la biosfera, de una envoltura planetaria más, la envoltura de sustancia pensante a la que, por comodidad y simetría, le concede el nombre de noosfera. Teilhard de Chardin reconoce tomar de Suess y Vernadsky el término ‘biosfera’ que originariamente sugiere la zona terrestre que contiene la vida, mientras que para el jesuita francés significa la propia capa de sustancia vitalizante que envuelve la Tierra, para así concebir la noosfera como la esfera terrestre de la sustancia pensante.

De esta manera, la noosfera es la “Tierra pensante” cuando el planeta adquiere una grado de ultra-cerebrización y un tinte psíquico. La capa pensante de la Tierra, la envolvente neoplanetaria de la noosfera es “estrechamente solidaria de la biosfera, con la que enraíza, y, no obstante, bien separada de ella por un sistema autónomo de circulación, de invasión y, finalmente, de cerebrización”. En el curso de un solo siglo, debido al salto industrial de las comunicaciones y de las poblaciones, se pergeña un nuevo acontecimiento, donde la sustancia humana empieza a “planetizarse”, es decir, a interiorizarse y a animarse globalmente sobre sí, en expresión de Teilhard de Chardin (1959).

Teilhard de Chardin (1959) se atreve a comparar la noosfera con el cerebro humano a modo de un cerebro planetario o un cerebro de cerebros. Entre el encéfalo humano, con sus billones de células nerviosas entrelazadas, y el aparato pensante social, con sus millones de individuos reflexionando solidariamente, existe una paridad. A escala orgánica,

se presenta un cerebro elemental formado de núcleos nerviosos, y a escala planetaria, un cerebro de cerebros. Entre los dos complejos orgánicos existe, sin embargo, una diferencia capital. Mientras que en el cerebro individual el pensamiento emerge sobre un sistema de fibras nerviosas no pensantes, en el caso del cerebro colectivo, por el contrario, cada elemento es en sí mismo un centro autónomo de reflexión.

Desde esta óptica, cabe preguntarse por la causa del ser humano (V. Gómez Pin 2006a y 2006b) y describir la evolución planetaria en un cronograma global desde el comienzo del planeta hasta el proceso actual de globalización, como si viviésemos en la sensibilidad global de una nueva ecología cyborg (D. de Kerckhove 1999a) a partir de la planetarización de la conciencia evolutiva conectada en la *Webness* (D. de Kerckhove 1999b). En el siguiente cronograma esquemático (resumido y modificado de Allerd Stikker 1992) se exponen los pasos hacia Internet y Gaia (de la que luego se hablará) desde esta globalización planetaria en la biosfera y la tecnoesfera:



La relación entre la biosfera y la tecnoosfera (conjunción de tecnosfera y noosfera) que McLuhan, Le Roy, Vernadsky y Teilhard de Chardin aventuraron como una hipótesis de investigación, se ha consolidado en las ciencias de la arquitectura de redes complejas. Recientemente, con la proliferación constante de Internet, se ha abierto una línea de investigación que piensa en la red de redes desde el punto de vista biológico: como un floreciente ecosistema de ordenadores o un cerebro en expansión con neuronas que reciben su energía de los Pentium. Estas ciencias empiezan a vislumbrar que las redes de moléculas de una célula, de especies en un ecosistema y de personas en un grupo social pueden estar entrelazadas con el mismo tejido matemático que Internet y la World Wide Web. Los primeros resultados apuntan a que el elevado grado de orden y universalidad de las redes (biológicas, ecosistémicas, artificiales o tecnológicas) y sus nodos distan mucho de ser aleatorias.

Las redes parecen organizarse de forma que la mayoría de los nodos tiene muy pocas conexiones, y un número muy pequeño de nodos, llamados *hubs* o centros, dispone de muchas conexiones. Tales conexiones parecen responder a un patrón denominado 'ley de potencia', esto es, para calcular la probabilidad de que un nodo disponga de un cierto número de conexiones se eleva ese número a una potencia, como el cuadrado o el cubo, y después se obtiene el inverso.

Este tipo de estructuras ayuda a explicar la estabilidad y resistencia de redes tan diversas como los metabolismos, los ecosistemas o Internet, aunque sean propensas a ocasionales colapsos. Dado que la mayoría de los nodos (moléculas, especies, servidores de ordenador) están escasamente conectados, se puede eliminar una gran fracción y la red se mantendrá. Pero si se eliminan unos cuantos nodos con gran número de conexiones, todo el sistema incurrirá en una extinción (biológica, ecosistémica) o en un colapso (tecnológico, informacional).

En la World Wide Web se conoce este fenómeno como 'grados de separación': la World Wide Web es un pequeño mundo donde cualesquiera documentos o sitios de Internet están separados entre sí sólo por un pequeño número de clics de ratón. En concreto, se calcula que no hay más de 19 links o enlaces entre cualquier página web (A-L. Barabási, 2002). Así la Red está estructurada según una ley de potencia, con un conjunto de centros fuertemente conectados y un número cada vez mayor de nodos menos

conectados. También se pueden analizar igualmente las conexiones de un chip informático, la red de citas de las publicaciones científicas e incluso redes biológicas y ecológicas. Se ha comprobado que tres es el número aproximado de enlaces entre elementos químicos en las células, dado que unas pocas moléculas participan en la mayoría de reacciones y la mayoría de las moléculas participan sólo en una o dos reacciones. De la misma manera sólo hay tres grados de separación entre dos palabras inglesas cualesquiera. Asimismo las especies están generalmente conectadas por dos enlaces en las cadenas tróficas. Igualmente seis grados de enlaces separan a dos estadounidenses cualesquiera y entre cuatro y seis separan a los miembros de redes científicas.

Las redes, tanto en la biosfera como en la tecnoosfera, pueden representarse como un grafo $G(N,C)$, donde N representa los nodos de la red y C las conexiones entre los nodos (R. V. Solé, R. Ferrer-Cancho, J. M. Montoya y S. Valverde 2002). Entre otras, se han estudiado redes celulares y metabólicas (donde N son enzimas o sustratos y C las reacciones metabólicas), la red neuronal del gusano *Caenorhabditis elegans* (en este caso N son neuronas y C son sinapsis), redes de interacción social (por ejemplo, la red de colaboraciones científicas, donde los nodos son científicos y existe conexión si tienen publicado algún trabajo conjunto), la red física de Internet, la estructura de enlace virtual de la WWW y otras redes tecnológicas. Todas estas redes comparten el ampliamente conocido fenómeno de los “pequeños-mundos” (small-worlds). Básicamente, este fenómeno tiene dos manifestaciones: (1) un grado de compartimentalización muy grande respecto a lo observado en una red donde las conexiones se distribuyesen al azar entre los nodos, es decir, en una red existen grupos de nodos muy conectados entre sí (pequeños-mundos) pero poco conectados con otros grupos de nodos; y (2) el número mínimo de conexiones para conectar dos elementos de la red es muy bajo (R. V. Solé y J. Bascompte, 2006; D. J. Watts, 1999 y 2006; M. Buchanan, 2002). De hecho se pueden comparar las características y propiedades de estas redes complejas, tanto naturales (biosfera) como artificiales (tecnoosfera):

REDES COMPLEJAS NATURALES (BIOSFERA) Y ARTIFICIALES (TECNOOSFERA)				
Resumen de características básicas que relacionan y diferencian distintos tipos de redes complejas de la biosfera y de la tecnosfera, tanto naturales como artificiales.				
Propiedad	Proteómica	Ecología	Lenguaje	Tecnología
Reparación	Restablecimiento y duplicación de genes	Ensamblajes locales desde reservas de especies regionales y efectos prioritarios	Creación de palabras desde las que ya están establecidas	Reutilización de módulos y componentes
Centros (hubs)	Genes de señalización celular	Especies más abundantes y omnívoras	Palabras provistas de funciones	Componentes más usados
¿Qué puede ser optimizado?	Velocidad de comunicación y coste de conexión	Quizá biodiversidad y equilibrio ecosistémico	Velocidad de comunicación con restricciones	Minimizar el esfuerzo de desarrollo dentro de unos límites
Fallos	Pequeños efectos fenotípicos de mutaciones aleatorias	Pérdida de sólo una pocas funciones específicas de especies	Mantenimiento de la expresión y comunicación	Pérdida de funcionalidad
Ataques	Extensas alteraciones de ciclos celulares y apoptosis (por ej., cáncer)	Muchas coextinciones y pérdidas	Agramaticalismo (es decir, grandes dificultades para construir frases complejas)	Avalanchas de cambios y elevados costes de desarrollo
Redundancia y degeneración (R, D)	Pérdida rápida de genes redundantes	R minimizada y D restringida a especies no-claves	Gran D	Cierto grado de R pero no de D
Se han considerado aquí diferentes características de redes complejas, así como su comportamiento bajo diferentes fuentes de perturbación. Adaptado, con modificaciones del autor, de R. V. Solé, R. Ferrer-Cancho, J. M. Montoya y S. Valverde 2002.				

Muchas redes con pequeños-mundos muestran una distribución de conexiones por nodos de tipo potencial: muchos nodos con muy pocas conexiones y muy pocos nodos con un gran número de conexiones. Las redes metabólicas de muchos organismos e Internet son ejemplos de redes con esta distribución característica. Ante perturbaciones que eliminan nodos al azar, estas redes son muy homeostáticas: recuperan las condiciones existentes antes de la perturbación. Sin embargo, ante la eliminación selectiva de los nodos más conectados, la red se manifiesta enormemente frágil. En el caso de Internet y la WWW

(el primer sistema en el que se observó este tipo de respuesta), un ataque al azar no tiene apenas efectos sobre la estructura y función de la red: se puede eliminar un porcentaje muy elevado de nodos sin que esto afecte a la transmisión global de información. Por contra, un ataque dirigido a la eliminación de un porcentaje muy bajo de los nodos más conectados (por ejemplo, Google, Altavista, Yahoo) provoca la incomunicación entre partes de la red anteriormente conectadas de manera muy efectiva (R. Albert, H. Jeong y A-L. Barabási, 2000).

Las redes sin escala como Internet y la World Wide Web presentan una fracción pequeña de nodos muy conectados con muchos enlaces y una fracción numerosa de nodos con pocos enlaces. Las redes sin escala son muchos más resistentes a los fallos aleatorios que cualquier otra red aleatoria. Las redes sin escala tienden a estar dominadas por una pequeña fracción de nodos conectores o *hubs* que presentan un elevado índice de conectividad. Dado que son escasos, estos nodos conectores tienen una probabilidad menor de fallar ante un ataque o un fallo aleatorios que sus nodos homólogos menos conectados y mucho más abundantes. Asimismo la pérdida de un nodo poco conectado apenas altera el funcionamiento de la red. Éste es el motivo de que Internet, una red sin escala, funcione de una manera fiable, pese a que los direccionadores o *routers* individuales fallen constantemente. Ahora bien, en una red sin escala como ésta los nodos más conectados son mucho más críticos para la funcionalidad general de la red que sus homólogos en una red aleatoria más uniforme (M. Newman, A-L. Barabási y D. J. Watts, 2006).

Sorprendentemente, las redes complejas de la biosfera comparten propiedades con estas redes de la tecnoesfera. Las redes ecológicas también parecen ser muy frágiles ante la eliminación de los nodos (especies) más conectados, mientras que son muy robustas ante la desaparición de nodos (especies) al azar (J. M. Montoya, S. L. Pimm y R. V. Solé 2006). La pérdida de biodiversidad asociada a la eliminación de especies y la fragmentación de la red ecológica en subredes desconectadas entre sí responde a un comportamiento similar a las redes sin escala. Así no es igual tener una única red con muchas especies que tener muchas pequeñas subredes con pocas especies cada una. El riesgo de extinción es mucho mayor en el segundo caso dado el llamado ‘efecto del seguro biológico’. Puesto que las especies más conectadas desde un punto de vista trófico (tanto depredadoras como depredadas) en un ecosistema son especies claves, pues su eliminación tiene grandes

efectos sobre la estabilidad y persistencia de la red ecológica, una mayor biodiversidad aumenta la probabilidad de que un ecosistema tenga, por un lado, especies que pueden responder de manera distinta bajo diferentes condiciones ambientales y perturbaciones, y por otro lado, redundancia funcional, es decir, especies que son capaces de reemplazar la función de una especie extinguida.

La arquitectura sin escala de todas estas redes complejas parece estar en la base de la biosfera y también en la tecnoesfera que los seres humanos hemos construido en torno a ella. La sostenibilidad de dichos sistemas supone mantener la robustez de estas redes sin escala, tanto físicas como virtuales, y evitar el colapso o la ruptura de su arquitectura que conduce a la insostenibilidad física y virtual.

Todo ello lleva a concluir que el planeta funciona de acuerdo con la teoría Gaia, que contempla la Tierra como un sistema autorregulado de redes que surge de la totalidad de organismos que la componen, las rocas de la superficie, el océano y la atmósfera, estrechamente unidos como un sistema en evolución (J. Lovelock 1993, 2007), en una conjunción de biosfera y noosfera (R. Serafín 1988). La Tierra se comporta como un sistema único y autorregulado, formado por componentes físicos, químicos, biológicos y humanos, según recogía la declaración firmada por más de mil delegados de la conferencia de Ámsterdam en 2001, en la que estaban representadas las cuatro grandes organizaciones que se ocupan del cambio climático global.

La clave para lograr la sostenibilidad física y virtual de Gaia presupone la interacción entre la biosfera y la noosfera en una arquitectura de redes robusta donde la biosfera sustenta la noosfera y ésta ayuda a pensar la biosfera en ciclos conectados como en el siguiente cuadro:



Vivimos así, de acuerdo con la teoría Gaia, en un planeta simbiótico (L. Margulis 2002, L. Margulis y D. Sagan 1997) con esferas superpuestas (P. Teilhard de Chardin 1963): desde la Biosfera, densa y central, rodeada por su Litosfera rocosa, envuelta ella misma por las capas fluidas de la Hidrosfera y de la Atmósfera, a la que se les suma la membrana viviente formada por el filtro vegetal y animal de la Biosfera, dentro de la cual ha surgido la capa pensante de la Tierra, la Tecnoosfera, que se ha consolidado desde el final del Terciario hasta la red actual (World Wide Web, teletecnologías, Internet). Según diversos autores (I. Ayestarán 2005, 2006 y 2007, F. Sáenz Vacas 2000, P. R. Samson y D. Pitt 1999), igual que debemos preocuparnos por los biótopos, es decir, los territorios o espacios cuyas condiciones ambientales son las adecuadas para que en ellas se desarrollen los seres vivos, también debemos ocuparnos de los nótopos, esto es, los territorios culturales y espacios de conocimiento, ideas, vocabularios e imágenes. Nótopos y biótopos, tecnodiversidad y biodiversidad son claves de sostenibilidad para este planeta simbiótico llamado Gaia.

Bibliografía

- Albert, Réka; Jeong, Hawoong y Barabási, Albert-László 2000: “Error and Attack Tolerance of Complex Networks”, *Nature* 406: 378-382.
- Ayestarán, Ignacio 2005: “The Living Republic. From Genetic Information to Globalising Symbiotic Planet”, in G. Banse (ed.), *Neue Kultur(en) durch Neue Medien(?) Das Beispiel Internet*, Berlín, Trafo, 2005, pp. 167-174.
- 2006: “Homo Complex – Information and Community in a Global Ecology”, in N. Ursua y A. Metzner-Szigeth (eds.), *Netzbasierter Kommunikation, Identität und Gemeinschaft / Net-Based Communication, Identity and Community*, Berlín, Trafo, 2006, pp. 145-158.
- 2007: “Otra filosofía es posible: biosfera, noosfera y globalización”, in VV. AA., *¿Qué es filosofía hoy? Zer da filosofia gaur?*, San Sebastián, Gatzka/Arteleku, pp. 124-129.
- Barabási, Albert-László 2002: *Linked: The New Science of Networks*. Cambridge, MA: Perseus.
- Buchanan, Mark 2002: *Nexus: Small Worlds and the Groundbreaking Science of Networks*. Nueva York: W. W. Norton.
- De Kerckhove, Derrick 1999a: *La piel de la cultura. Investigando la nueva realidad electrónica*.

Barcelona: Gedisa.

- 1999b: *Inteligencias en conexión. Hacia una sociedad de la web*. Barcelona: Gedisa.

Gómez Pin, Víctor 2006a: “De la caverna platónica a Internet: lo real y lo virtual”, *Le Monde Diplomatique*, septiembre 131: 28-29.

- 2006b: *Entre lobos y autómatas. La causa del hombre*. Madrid: Espasa.

Kuehr, Ruediger y Williams, Eric (eds.) 2003: *Computers and the Environment: Understanding and Managing Their Impacts*. Kluwer Academic Publishers: Dordrecht.

Le Roy, Édouard 1927: *L'exigence idéaliste et le fait d'évolution*. París: Boivin.

Le Roy, Édouard 1928: *Les origines humaines et l'évolution de l'intelligence*. París: Boivin.

Lovelock, James 1993: *Las edades de Gaia*. Barcelona: Tusquets.

- 2007: *La venganza de la Tierra. La teoría Gaia y el futuro de la humanidad*. Barcelona: Planeta.

Margulis, Lynn 2002: *Planeta simbiótico: un nuevo punto de vista para la evolución*. Madrid: Debate.

Margulis, Lynn y Sagan, Dorion 1997: *Slanted Truths: Essays in Gaia, Symbiosis and Evolution*. Nueva York: Springer-Verlag.

McLuhan, Marshall 1998: *La galaxia Gutenberg. Génesis del homo typographicus*. Barcelona: Galaxia Gutenberg-Círculo de Lectores.

McLuhan, Marshall y Powers, Bruce R. 1986: *La aldea global*. Barcelona: Gedisa.

Montoya, José M.; Pimm, Stuart L. y Solé, Ricard V. 2006: “Ecological Networks and their Fragility”, *Nature* 442: 259-264.

Newman, Mark; Barabási, Albert-László; y Watts, Duncan J. 2006: *The Structure and Dynamics of Networks*. Princeton, NJ: Princeton University Press.

Sáez Vacas, Fernando 2000: *Meditación de la infotecnología*. Madrid: América Ibérica.

Sagan, Dorion 1990: *Biosferas. Metamorfosis del planeta Tierra*. Madrid: Alianza.

Samson, Paul R. y Pitt, David (eds.) 1999: *The Biosphere and Noosphere Reader. Global Environment, Society and Change*. Londres y Nueva York: Routledge.

Serafin, Rafael 1988: “Noosphere, Gaia and the Science of Biosphere”, *Environmental Ethics* 10: 121-137.

Solé, Ricard V. y Bascompte, Jordi 2006: *Self-Organization in Complex Ecosystems*. Princeton: Princeton University Press.

Solé, Ricard V.; Ferrer-Cancho, Ramón; Montoya, José M.; y Valverde, Sergi 2002:

“Selection, Tinkering, and Emergence in Complex Networks”, *Complexity*, 8: 20-33.

Stikker, Allerd 1992: *The Transformation Factor: Towards an Ecological Consciousness*. Rockport MA: Element Books Limited.

Teilhard de Chardin, Pierre 1959: *El porvenir del hombre*. Madrid: Taurus.

- 1963: *El fenómeno humano*. Madrid: Taurus.

Vernadsky, Vladimir I. 1945: “The Biosphere and the Noosphere”, *American Scientist*, 33, 1: 1-12.

Watts, Duncan J. 1999: *Small Worlds: The Dynamics of Networks between Order and Randomness*. Princeton, NJ: Princeton University Press.

- 2006: *Seis grados de separación. La ciencia de las redes en la era del acceso*. Barcelona: Paidós.