

## METODOLOGÍAS PARA LA GENERACIÓN Y ANÁLISIS DE SUPERFICIES TRIDIMENSIONALES EN LA RESTITUCIÓN VIRTUAL DE LA ARQUITECTURA

JOAQUÍN REGOT / ANDRÉS DE MESA

Profesores del Departamento de Geometría Descriptiva

Universidad Politécnica de Cataluña

Barcelona – España

[www.upc.edu/ega1](http://www.upc.edu/ega1)

---

Nota: El presente trabajo no se podría haber realizado sin las bases de datos de las nubes de puntos facilitadas por el Dr. Francisco Muñoz en colaboración con el Arq. Salvador Balcells correspondientes a una parte del Auditorio de Santa Cruz de Tenerife de Santiago Calatrava. Estas nubes de puntos fueron obtenidas mediante un escáner de tipo láser CYRAX facilitado por el CPSV. de la UPC. La gestión informática de dichas nubes de puntos no se podría haber llevado a cabo sin el *Software* facilitado por el *Centre de Política de Sòl y Valoracions* dirigido por el Catedrático Josep Roca Cladera.

### Resumen y objetivos.

La utilización del escáner láser para la obtención de datos de edificios y espacios arquitectónicos ha supuesto una reconsideración de los métodos de levantamiento tridimensional tradicionales a partir de imágenes. Esta nueva tecnología, empleada fundamentalmente en el campo de las instalaciones industriales y en trabajos de ingeniería civil y/o topográfica, está siendo adaptada recientemente al campo de la arquitectura, sobre todo en el levantamiento de edificios pertenecientes al patrimonio arquitectónico.

Si bien es cierto que los resultados obtenidos en las presentaciones comerciales de estos aparatos y en estudios de investigación muestran un cambio radical en las técnicas de levantamiento, también es verdad que las soluciones de formalización definitivas presentan problemas bastante importantes en la metodología y en el procesamiento de los datos obtenidos con el fin de generar resultados fiables y rápidos.

En el campo de la arquitectura el problema fundamental reside en la transformación de los conjuntos de puntos tridimensionales (*Cloud-Points* o *Nubes de Puntos*) en formas que puedan ser definidas geométricamente, y así poder controlarlas, con precisión, mediante funciones matemáticas. Actualmente, las tres maneras de realizar este proceso se corresponden a las tres tipologías fundamentales para simular objetos tridimensionales en el mundo gráfico de la informática: el sistema de mallas trianguladas, el sistema de objetos sólidos con geometrías básicas simples y el sistema de generación de superficies libres tipo NURBS.

Nuestra propuesta consiste en realizar un estudio de metodologías y procesos más adecuados para obtener formas racionales que sean geométricamente controlables por cualquier sistema de CAD que utilice NURBS. El estudio que se propone, se desarrolla a partir de un repertorio formal básico y representativo de la arquitectura, y de un método de análisis exhaustivo con carácter cuantitativo. La idea fundamental es comparar el grado de precisión y de error con el que se aproximan las formas obtenidas mediante los sistemas de CAD mencionados para formalizar objetos respecto a las *nubes de puntos* iniciales obtenidas mediante el escáner tipo láser. Al mismo tiempo, nuestra propuesta, pretende evaluar la capacidad que tienen estos sistemas para modificar, transformar, evaluar y extraer datos de la forma construida mediante estos sistemas.

### Introducción y conceptos.

Actualmente la metodología más utilizada por la informática gráfica para obtener una forma continua a partir de un conjunto o *nube* puntos es su transformación en una malla. El principio geométrico que se utiliza en este caso es muy simple, todos los puntos que definen la forma se unen mediante superficies planas triangulares lo más pequeñas posibles simulando la forma tridimensional por medio de un poliedro de múltiples caras. Sin embargo, aunque este sistema constituya una manera muy rápida y efectiva de obtener una forma tridimensional unitaria que se adapta a cualquier tipo forma, en múltiples direcciones del espacio, (gracias al método de la triangulación), la aplicación de mallas a la simulación tridimensional de objetos presenta dos inconvenientes muy importantes. El primero, es que con este tipo de entidades no se pueden obtener formas con recorridos suaves y uniformes aunque el objeto final sea continuo, puesto que en este sistema se reproducen literalmente todas las imperfecciones e irregularidades de un proceso de escaneado con limitaciones importantes en el barrido de puntos.

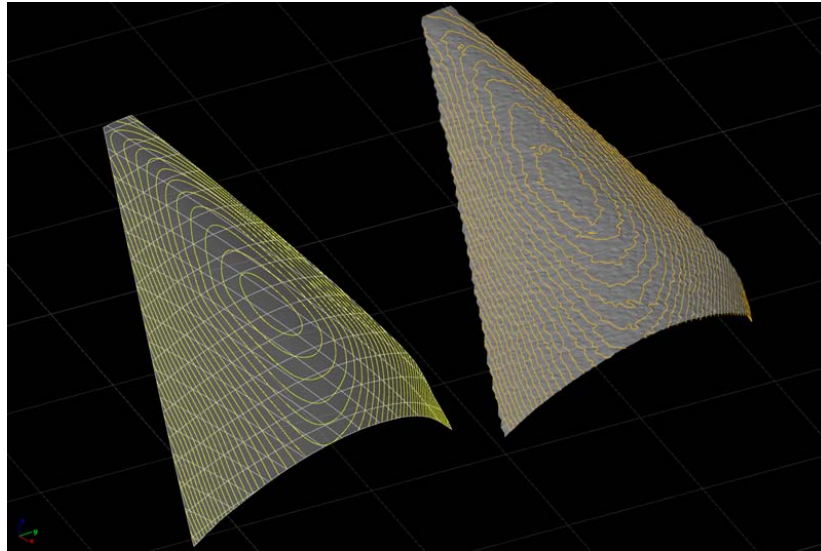


Figura 01.- Comparación de las irregularidades de una superficie generada por una NURB y una malla.

De hecho, el muestreo regular de puntos tridimensionales que realizan los escáneres de tipo láser, en sí no constituye una unidad homogénea, sino más bien un muestreo de posiciones tridimensionales cuya fiabilidad depende de la cantidad, la dirección y el intervalo que se han utilizado el momento de realizar los barridos de puntos. Sin embargo el inconveniente más importante que presenta la técnica del mallado reside en la propia estructura geométrica de este tipo de entidad, puesto que se trata de una malla poliédrica que geoméricamente no corresponde una forma continua y única, sino que esta compuesta por un gran conjunto de diferentes vértices y triángulos adyacentes que presenta problemas insuperables si se quieren realizar cualquier tipo de operaciones geométricas de análisis o de transformación como si se tratase de un objeto homogéneo.

Es evidente, que la versatilidad del sistema de mallas está en su gran capacidad para abarcar formas irregulares, como en el caso de la topografía de los terrenos o el de las formas naturales orgánicas, pero esta ventaja se convierte en un verdadero inconveniente si se quiere simular formas tridimensionales continuas y regulares que sean geoméricamente controlables, como es el caso de todas las formas básicas utilizadas en arquitectura.

Si las formas arquitectónicas que se pretende modelar a partir de un barrido de puntos tridimensional corresponden a cualquier tipo de forma que pueda ser codificada mediante los parámetros de una geometría simple, como en el caso de las superficies planas, las superficies cilíndricas, las superficies cónicas o cualquiera otra de este tipo, los sistemas de generación formal con los que cuentan los programas de *CAD* resuelven el problema fácilmente y con gran precisión, mediante los sistemas de creación objetos sólidos simples definidos paraméricamente. Pero, en cambio, si estas formas corresponden al desarrollo de cualquier forma con un recorrido libre en el espacio tridimensional, que no es asimilable a ningún tipo de superficie geométrica conocida, el problema es insuperable por este tipo de simulación formal, y la alternativa más adecuada, actualmente, es su modelado mediante la aplicación de curvas y superficies basadas en el principio de la geometría que aplican los algoritmos matemáticos de las *NURBS*.

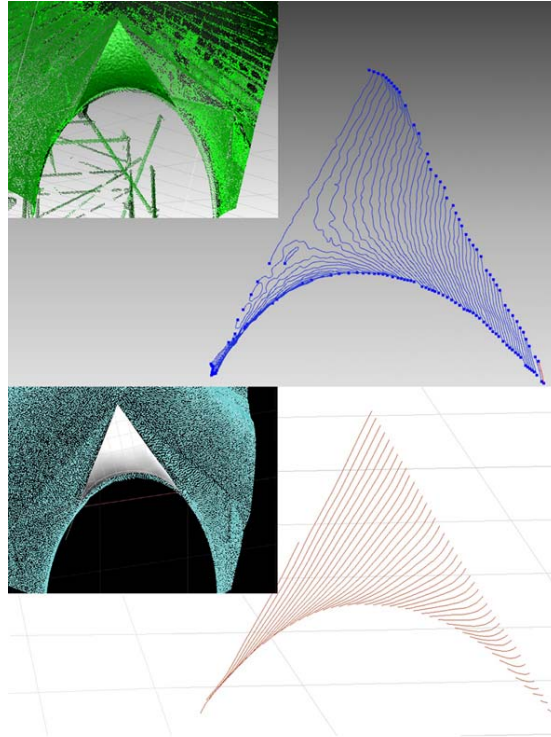


Figura 02.- Modelos de un detalle de la Sagrada Familia de A. Gaudi, generados por mallas y por NURBS a partir de la misma nube de puntos. Comparación de secciones planas en ambas metodologías de generación.

La gran ventaja de este sistema, basado en la geometría de recorrido libre de las *Splines*, es que el tratamiento de la forma modelada mediante esta técnica, no solo presenta un alto grado de continuidad y uniformidad, sino que al mismo tiempo la forma obtenida queda definida por funciones matemáticas que permiten transformarla, controlarla y analizarla con gran precisión a través de una gran variedad parámetros. Si bien es cierto, que la estructura de simulación geométrica formal que aplica este sistema es definitivamente de muestreo y aproximación, las ventajas que presenta a la hora de modificar, transformar y evaluar la forma, en comparación con los sistemas que simulan la forma mediante entidades tipo malla o tipo sólido, son realmente importantes. Esta es la razón, que nos ha llevado a estudiar este sistema de modelado en relación con las *nubes* de puntos tridimensionales aplicadas al campo de la arquitectura, sobre todo si tomamos en cuenta que las tolerancias de precisión que aplica el sistema de las NURBS al realizar aproximaciones a la forma está realmente muy por encima de los requerimientos que presentan en este campo las obras de arquitectura.

### Ejemplo de estudio y métodos de análisis.

Para mostrar los alcances y las limitaciones de la transformación de los conjuntos de puntos obtenidos mediante un escáner láser tridimensional en formas compuestas por superficies definidas como NURBS, se ha realizado el estudio detallado de un pequeño sector de la pared izquierda del interior del escenario del Auditorio de Santa Cruz de Tenerife diseñado por Santiago Calatrava.

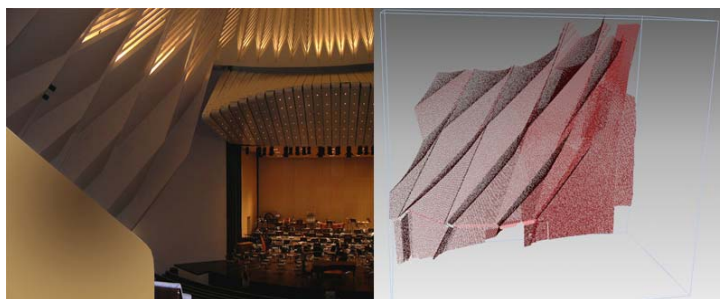


Figura 03.- Interior del Auditorio de Tenerife de S. Calatrava. Nube de puntos de la zona que se muestra en la imagen.

La idea no es abarcar todos los problemas que pueda presentar el modelado tridimensional de un conjunto arquitectónico completo, ni si quiera los que podrían aparecer cuando se modela una parte de él, sino desarrollar una evaluación de tres problemas realmente significativos al obtener la forma tridimensional de un modelo arquitectónico cualquiera: el tratamiento de las superficies planas, el tratamiento de superficies curvas y la definición de las aristas de intersección entre superficies.

Para poder realizar un análisis detallado del comportamiento que presentan las formas modeladas mediante el sistema de *NURBS*, a partir de las posiciones obtenidas por los puntos de barrido de un escáner láser, se ha seleccionado un conjunto de formas bastante simple en su configuración geométrica. Este conjunto está compuesto por la intersección de varias superficies planas con diferente orientación entre sí y la intersección de estas superficies con una superficie curva de recorrido libre. El conjunto elegido es lo suficientemente pequeño como para reducir significativamente los tiempos de elaboración, de cálculo y de verificación, y así poder concentrarse en una evaluación formal exhaustiva de la correspondencia entre los modelos tridimensionales generados y las posiciones de partida definidas por las diferentes *nubes* de puntos calculadas por el escáner.

La utilización del sistema de *NURBS* en el modelado tridimensional de las diferentes partes del conjunto mencionado, nos ha permitido aplicar en cada uno de los tres casos propuestos, (superficies planas, superficies curvas, y aristas de intersección), una evaluación y un análisis exhaustivo de la forma resultante según los parámetros geométricos básicos que definen a cualquier forma: posición, dirección, continuidad y uniformidad; puesto que dentro de estos sistemas, todos estos parámetros son perfectamente cuantificables con mucho rigor y precisión, algo realmente impracticable cuando la forma definitiva se ha definido mediante una malla poliédrica que se limita a unir de manera ordenada un conjunto de puntos aplicando pequeños planos triangulares.

#### **Las superficies planas.**

El primer caso que se ha enfrentado es el de las superficies planas. Para construir el modelo tridimensional de las superficies planas se ha aplicado el promedio de desviación mínima respecto al conjunto de puntos de paso utilizado. Con la finalidad de comprobar las posibles variaciones que pueden existir al aplicar este método cuando se cuenta con un menor número de puntos de paso o con una distribución que no es uniforme, se han realizado tres verificaciones. La primera, utilizando un conjunto de puntos exhaustivo distribuido uniformemente a lo largo de toda la superficie. La segunda, empleando un conjunto de puntos reducido situado en la zona central de la superficie. Y la tercera, utilizando tres zonas distintas situadas en los extremos de la superficie. Al tratarse de superficies planas en todos los casos sólo se han estudiado dos parámetros, la desviación de la posición de la superficie obtenida respecto a los puntos de referencia y la variación de su orientación. Es evidente que con este tipo de superficies el análisis de los parámetros de continuidad y uniformidad no es necesario puesto que ambos son inherentes a su propia definición.

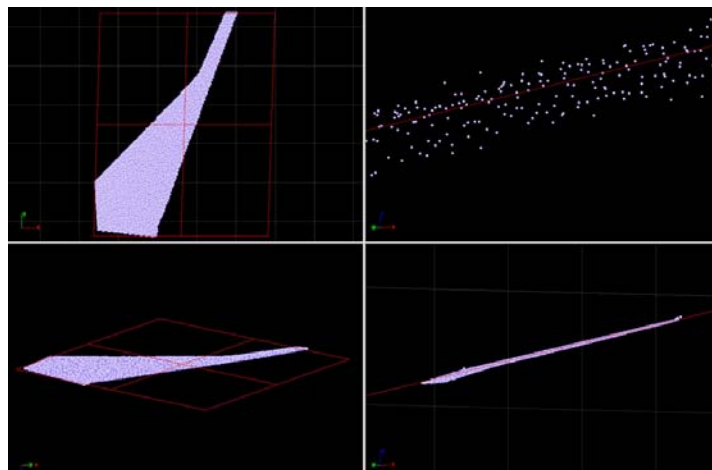


Figura 04.- Determinación de una superficie plana por aproximación a una nube de puntos.

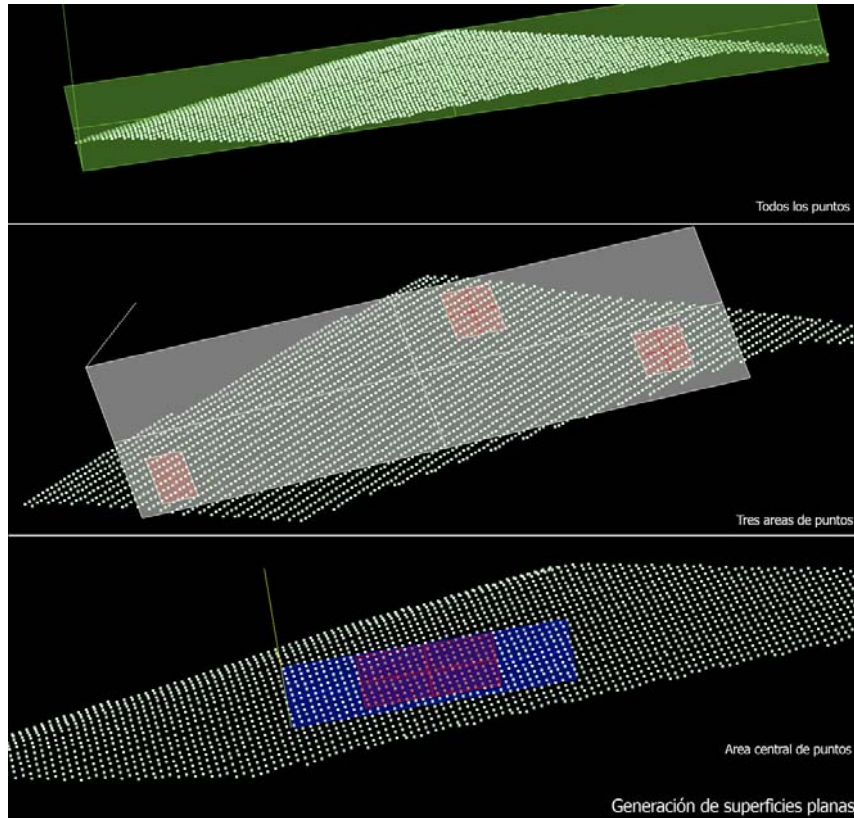


Figura 05.- Sistemas de selección de puntos para la generación de modelos de superficie plana.

Los resultados de posición y orientación que se han obtenido en las distintas superficies planas, al variar el número y la posición de los puntos de paso utilizados, demuestran que para definir este tipo de superficies no es tan importante la cantidad de puntos utilizada como su distribución. De hecho, las variaciones más significativas de posición y orientación de la superficie obtenida se han presentado cuando para definirla solamente se ha utilizado un grupo de puntos en su zona central, mientras que las diferencias entre los parámetros de posición y orientación, cuando se han utilizado una gran cantidad de puntos uniformemente distribuidos y tres zonas distintas de puntos en los extremos, realmente no han sido significativas.

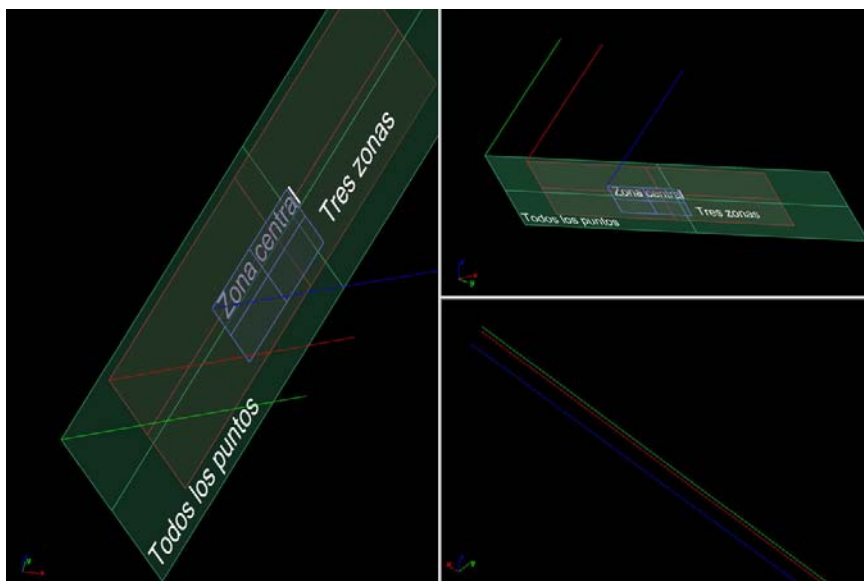


Figura 06.- Comparación de las desviación de las normales obtenidas en los diferentes métodos de generación.

## Superficies... ¿planas o curvas?

Sin embargo, el estudio de la transformación de las *nubes* de puntos correspondientes a las tres superficies planas, mostró un fenómeno sorprendente: dos de las superficies analizadas no corresponden a superficies completamente planas. Aplicando los diagramas de cálculo estadístico de desviación de puntos, respecto a la superficie generada, se pudo observar que la primera de ellas presentaba una desviación máxima en uno de sus extremos de 4.2cm en 680cm de longitud, y la segunda, una desviación máxima de 5.8cm a ambos lados de su dirección más larga de 1080cm. La desviación que presenta la primera superficie, se produce en una zona relativamente pequeña de uno de sus extremos y está claramente delimitada, por esta razón a esta superficie se la ha considerado plana. En cambio, la desviación de la segunda superficie, se produce en tres zonas distintas. Dos desviaciones se sitúan en los extremos y se desarrollan hacia abajo, y una se sitúa en el centro y se desarrolla hacia arriba. Por esta razón, la forma definitiva de esta superficie, se la ha generado como una superficie curva con pandeo en la zona central y caída en sus extremos.

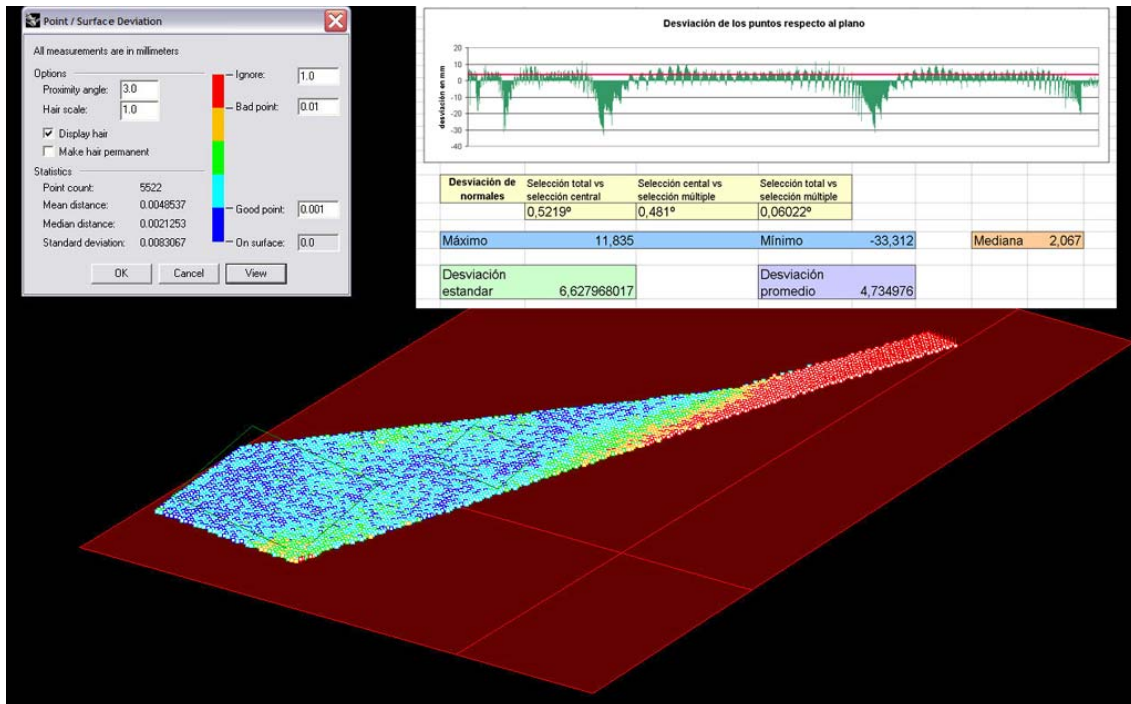


Figura 07.- Desviación de puntos respecto a la superficie plana.

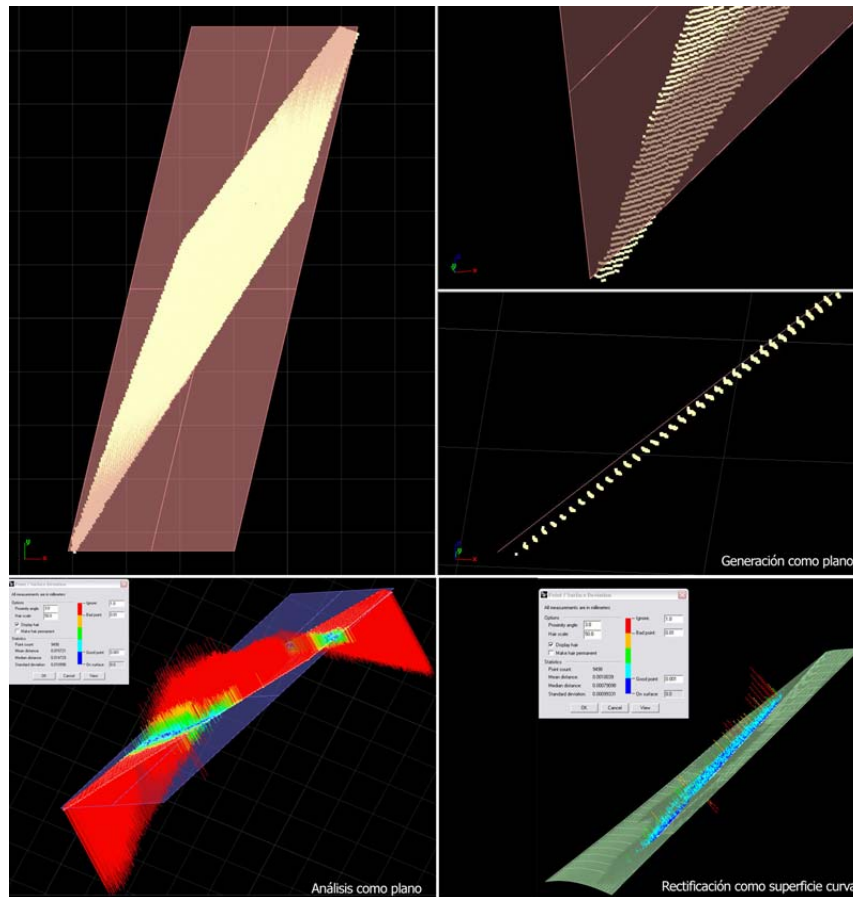


Figura 08.- Comparación y análisis de los resultados obtenidos al considerar la nube de puntos como generadora de una superficie plana o una superficie curva adaptada.

La detección de estas anomalías en las superficies planas no habría sido posible sin contar con unas *nubes* de puntos realizadas con una trama de barrido bastante densa, en este caso con una media de 3.5cm de intervalo entre punto y punto. Una relación que permitió contar con 5524 puntos para 6.10m<sup>2</sup>, en el caso de la superficie plana con desviación en un sólo extremo, y 9498 puntos para 13.70m<sup>2</sup> para la superficie con desviación en el centro y en sus dos extremos. Por otro lado, las desviaciones detectadas en estas dos superficies, en principio planas, o por lo menos construidas con esa voluntad, se han podido apreciar mediante sistemas de análisis que sólo se pueden aplicar a superficies definidas uniformemente, con continuidad y mediante funciones matemáticas como es el caso de las *NURBS*.

### Las superficies curvas.

El segundo caso que se ha estudiado es el de las superficies curvas con recorrido libre. Para construir este tipo de superficies, en una primera instancia, se ha aplicado el mismo principio que para las superficies planas, es decir el promedio de desviación mínima respecto al conjunto de puntos de paso. De esta manera, primero se obtiene una superficie plana con una orientación y una desviación regular respecto a los puntos de paso, y que sirve de referencia para construir la superficie definitiva. La superficie final, se obtiene mediante la transformación de esta superficie plana inicial en una trama regular, una trama con una determinada densidad que se adapta al conjunto de puntos de paso, por la variación continua de la posición y la curvatura de la estructura que define a cada una de sus celdas. Este sistema de generación de superficies con recorrido libre, y que están obligadas a pasar por una serie de distintas posiciones, se denomina *Patch*. Con estas condiciones de generación, es evidente que la posición definitiva y el recorrido espacial de la superficie curva que pasa por los puntos obtenidos mediante el escáner dependen de tres parámetros: la densidad de puntos de paso utilizada, el número de celdas de su trama estructural, y el grado de adaptación de curvatura utilizado para cada una de estas celdas.

La cantidad de distintos parámetros que se aplican para generar este tipo de superficies curvas, nos ha obligado a verificar el grado con el cual la superficie definitiva se adapta a los puntos de paso, utilizando varios parámetros de verificación complementarios a los utilizados en el análisis de las superficies planas. El primero de ellos es común a ambos tipos de superficies, y no es otro que el cómputo de la desviación de la posición de la forma final respecto a los puntos de paso iniciales, calculada mediante la variación de la longitud de las normales a la superficie que pasan por cada uno de los puntos de referencia. En cambio, para controlar el grado de variación de continuidad y de uniformidad del recorrido espacial de la superficie final se han aplicado dos nuevos tipos de parámetros.

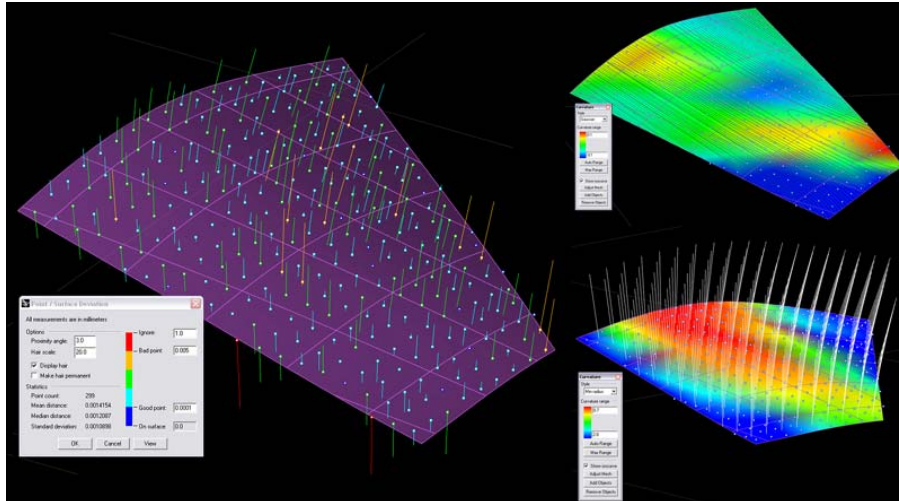


Figura 09.- Modelo de análisis de una superficie curva: por desviación, por continuidad, por torsión.

El primero, corresponde a las variaciones de continuidad de la curvatura que se desarrolla sobre la propia superficie y a lo largo de toda su forma. Este comportamiento se ha evaluado mediante un análisis de la variación de su curvatura *Gausiana*. Un tipo de análisis, que no sólo permite detectar la desviación de curvatura de cada zona de la superficie respecto su curvatura media, sino también detectar si los valores de estas variaciones son mayores o menores que la media, y por lo tanto si la superficie presenta hendiduras o protuberancias a lo largo de su recorrido.

El segundo tipo de análisis está dirigido a detectar el grado de variación o uniformidad que presenta la orientación de la superficie obtenida a lo largo de todo su recorrido. Este comportamiento se ha evaluado a partir del cómputo de los radios de curvatura mínimos que presenta la superficie en cada una de sus partes, un cómputo que permite diferenciar con claridad las partes más planas de la superficie de aquellas que presentan mayor curvatura. El análisis de este fenómeno permite detectar con claridad la variación de orientación que sufre su forma en cada zona, o lo que es lo mismo el grado de uniformidad con el cual se tuerce o cambia la dirección de su orientación.

Los tres tipos de análisis formales de superficies que se han expuesto, (el cómputo de su desviación respecto a los puntos de paso, la variación de continuidad de su curvatura y la uniformidad de su orientación), nos ha permitido realizar una evaluación exhaustiva del comportamiento que presentan las superficies de recorrido libre obtenidas aplicando el sistema de *Patches* al modificar los parámetros de su generación.

El primer ensayo se realizó disminuyendo sustancialmente el número de puntos de paso con el cual se define la superficie. Sin embargo, en este caso el promedio de la desviación de la superficie respecto a los puntos de paso no presentó una variación tan sustancial o al menos proporcional a la de los puntos con los que se la ha definido. Lo propio sucedió con la variación de la continuidad de su orientación. El parámetro que sufrió más cambios fue la continuidad de su curvatura, en el cual se incrementaron las hendiduras y protuberancias. Lo cual permite ver que una variación sustancial del número de puntos de paso, siempre y cuando su distribución sea uniforme, no tiene mayor influencia en la posición y la orientación de la superficie, sino más bien en la continuidad de su curvatura.



El segundo ensayo se llevó a cabo disminuyendo el número de celdas o densidad de la trama que controla la generación de la superficie libre. En este caso, la uniformidad de la curvatura de la superficie resultante se incremento notablemente, al mismo tiempo que las variaciones de su orientación disminuyeron, mostrando una superficie más homogénea. Sin embargo, la desviación respecto a sus puntos de paso aumentó sustancialmente. Esto significa, que con un menor número de celdas estructurales la superficie resultante es mucho más homogénea, pero su recorrido se desvía de forma importante de los puntos por los que tiene que pasar.

En el tercer ensayo aplicamos una mayor flexibilidad a la curvatura de cada una de las celdas que componen la trama estructural de la superficie. El resultado fue un incremento importante en la variación de sus curvaturas, y aunque en este caso la desviación de su recorrido respecto a los puntos de paso propuestos no se modificó sustancialmente, la continuidad de su curvatura quedó muy afectada, mientras que la variación de las orientaciones de la superficie a largo de todo su recorrido no se modificaron demasiado.

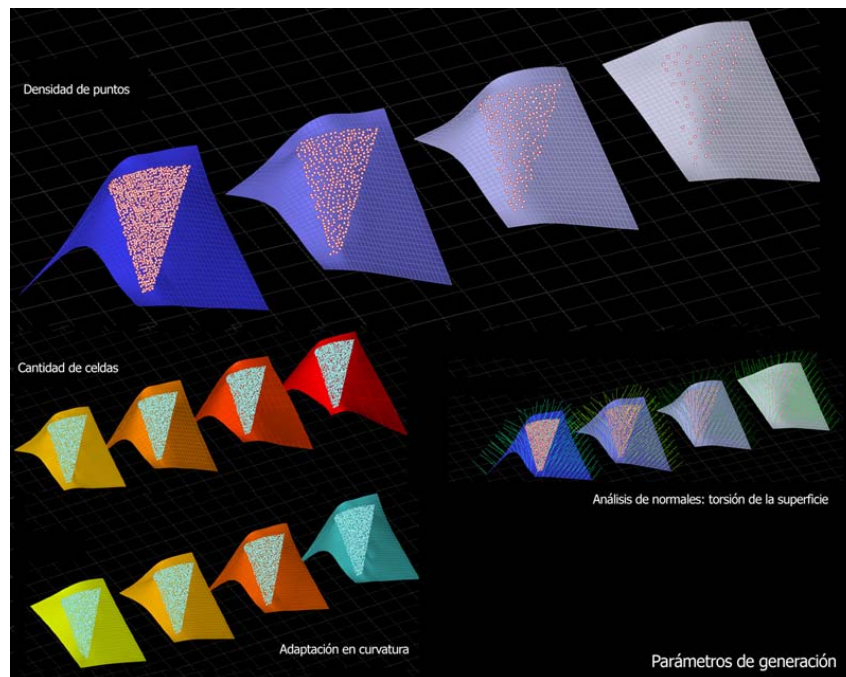


Figura 10.- Parámetros de generación de las superficies curvas. Densidad de puntos, resolución de celdas (patch) y aproximación a la curvatura (stiffness).

Los análisis del comportamiento de las diferentes superficies curvas obtenidas en los distintos ensayos que se han propuesto, demuestran de una forma fehaciente que la posición definitiva, las direcciones del recorrido espacial y la uniformidad de una superficie libre definida exclusivamente por puntos de paso en el espacio puede ser muy variable y difícil de controlar. De todas maneras, la experiencia realizada nos permite ver que los resultados son bastante óptimos si se cuenta con una distribución uniforme de puntos a lo largo de toda la superficie que no necesita ser demasiado densa. Por otro lado, estos ensayos muestran que la precisión con la cual la superficie pasa por los puntos de referencia depende de forma muy importante del número de celdas con las cuales este definida la trama de su estructura, y además del parámetro de flexibilidad de curvatura asignado a las celdas. Este fenómeno nos permite entender que cuando se cuenta con un número muy reducido de puntos de referencia, el comportamiento formal de la superficie que se quiere obtener depende casi exclusivamente de la densidad de su trama y del índice de flexibilidad de curvatura asignado. Sin duda alguna, los casos más críticos para generar una superficie curva de recorrido libre, se presentan cuando se cuenta con varios grupos de puntos de referencia aislados con densidades de puntos muy distintas y que no se encuentran distribuidos uniformemente a lo largo de toda la forma que se quiere obtener.

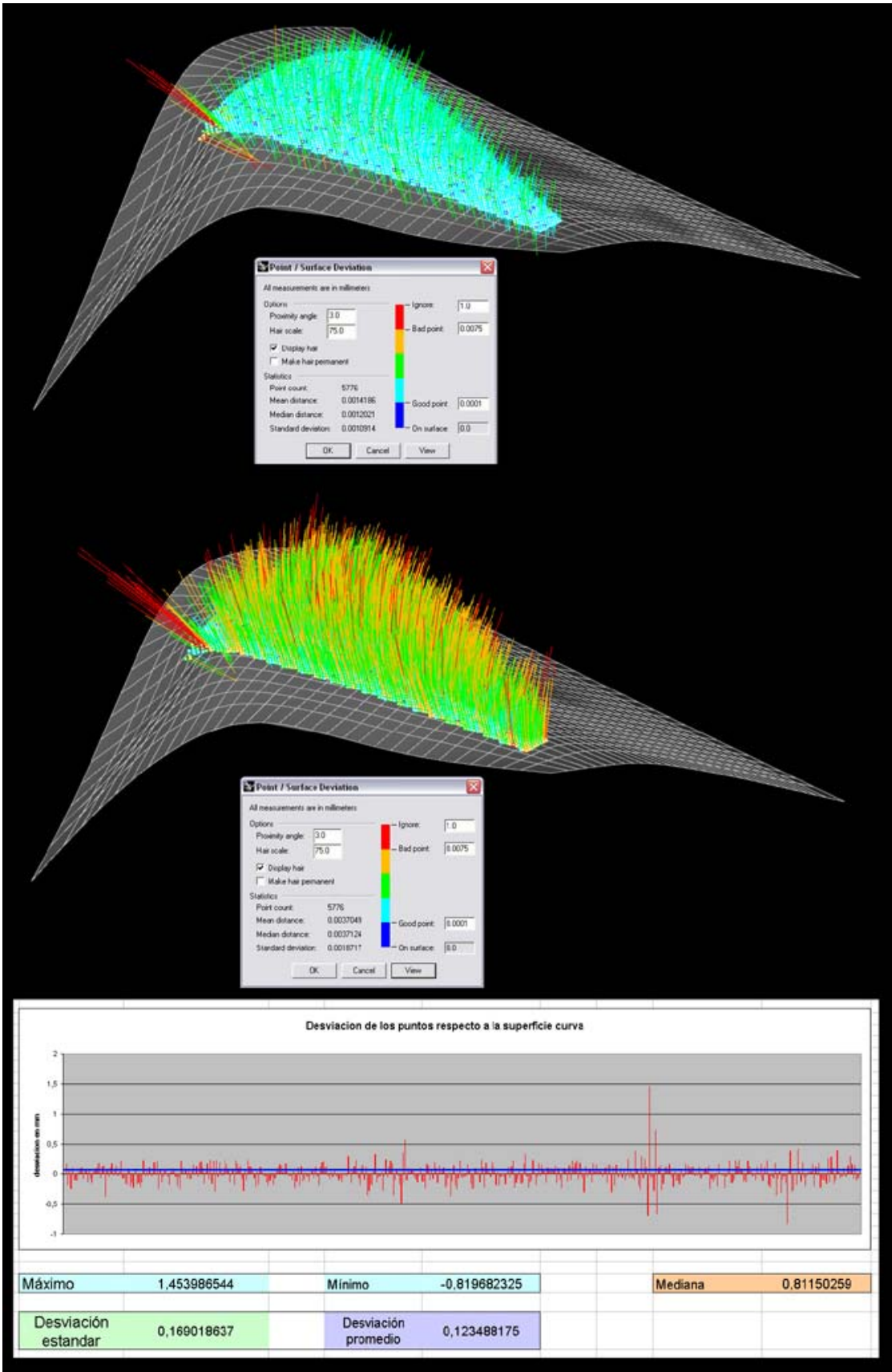


Figura 11.- Análisis de desviación de la superficie respecto a nubes con menor densidad de puntos (arriba) o mayor densidad de puntos (abajo).

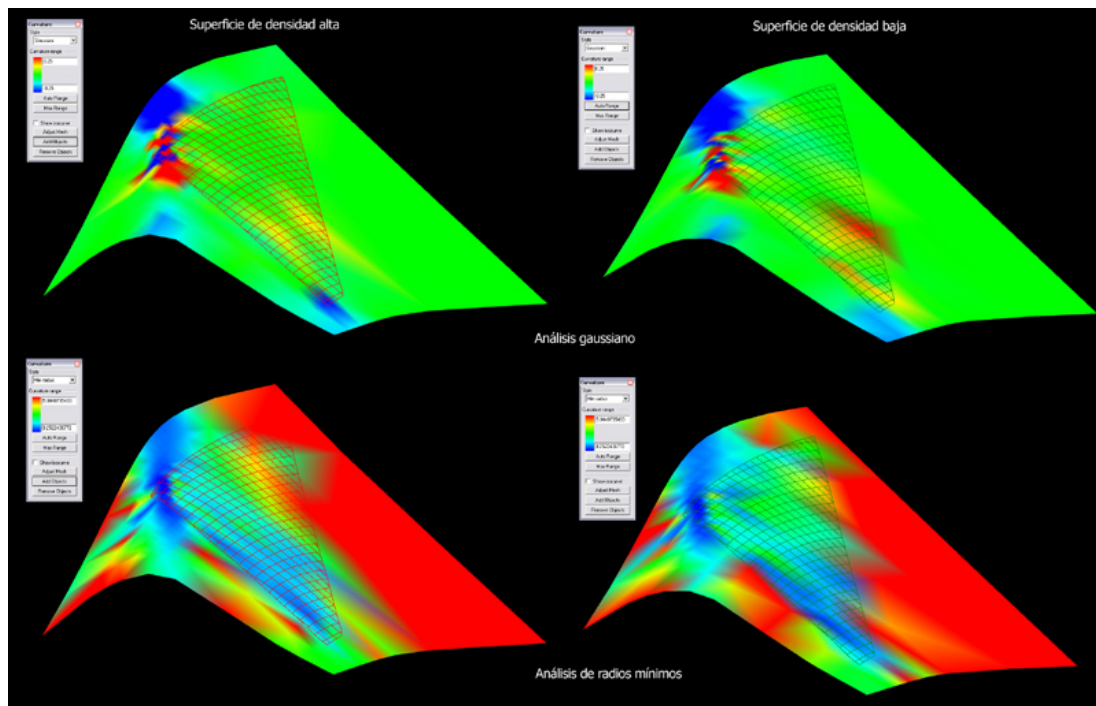


Figura 12.- Análisis de continuidad de curvatura (gaussiano) y de grado de curvatura (radios mínimos).

### Las líneas de arista.

Uno de los problemas más difíciles de abordar es la evaluación, con precisión, de la correspondencia entre el recorrido de las aristas de las superficies y los puntos obtenidos por el escáner láser para estos elementos del modelo. En la mayoría de los casos, como en el ejemplo arquitectónico que se estudia aquí, aunque existan aristas de borde, las aristas vienen definidas por la intersección de dos superficies. Esto implica que dentro del conjunto o *nube* de puntos de paso utilizado como referencia de posición, en realidad no exista un grupo de puntos con el cual se pueda definir una línea que sea una arista, por lo que definitivamente este tipo de entidad es un producto más de la geometría que de las formas reales.

Por esta razón, la precisión con cual se pueden obtener y evaluar este tipo de entidades geométricas, tan importantes en el modelado de formas arquitectónicas, es muy variable. De hecho, su posición y su recorrido dependen de la superficie que la contiene y por lo tanto la precisión de su correspondencia con los puntos de referencia son consecuencia del comportamiento que presenta la superficie. Esto sucede, tanto en las aristas de borde como en las aristas de intersección. Pero en el segundo caso, es decir en el de las aristas de intersección, la comparación con los puntos de referencia es literalmente imposible, puesto que este tipo de línea se obtiene por la intersección de las superficies que la definen y como consecuencia no pasa por ninguno de los puntos utilizados para definir la forma. Este fenómeno, nos ha obligado a evaluar las desviaciones de su posición utilizando como referencia una superficie continua compuesta por el conjunto de puntos de paso más próximos a la zona de intersección de las dos superficies que definen la arista.

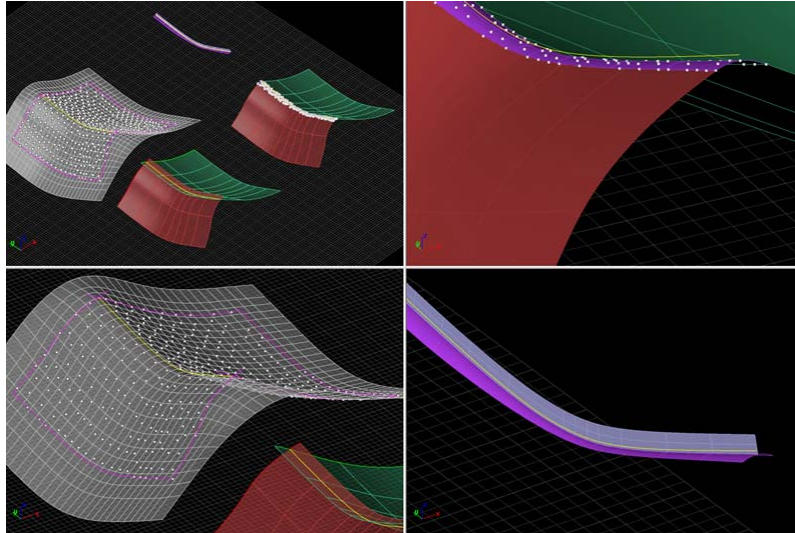


Figura 13.- Generación de superficies de referencia para el análisis de las posiciones de las aristas respecto a las nubes de puntos que las definen.

El estudio del comportamiento formal de las aristas se ha realizado para dos casos. El primero se ha realizado con una arista definida por dos superficies planas y el segundo con una arista definida por una superficie plana y otra curva. Las comprobaciones de desviación realizadas en ambos casos mediante las distancias perpendiculares desde la arista estudiada a la superficie de referencia, demuestran que las variaciones de recorrido de este tipo de líneas son mucho mayores que las que presentan las propias superficies que contienen la arista. Para la arista formada por planos se han detectado desviaciones de hasta 0.5cm en 214cm de longitud. Mientras que para la arista curva las desviaciones son mayores, entre 0.5cm y 1.7cm para una longitud de 430cm. En consecuencia, es importante tomar en cuenta que la desviación del recorrido de una arista siempre se incrementa de forma significativa en comparación a la desviación que presentan las superficies que las definen. Este fenómeno formal es natural debido a la geometría con la cual se lo define, y convierte a las aristas obtenidas por intersección como las entidades menos fiables de una forma obtenida mediante el sistema de *NURBS* a partir de una *nube* de puntos con los parámetros que ya se han explicado. Sin embargo, en realidad el problema no está en los algoritmos, las funciones matemáticas o la precisión que utiliza este sistema de simulación formal, sino en que la arista obtenida tal cual se ha expuesto no existe en la forma real, y esta es la verdadera razón del incremento en los valores de desviación obtenidos en ambos ensayos.

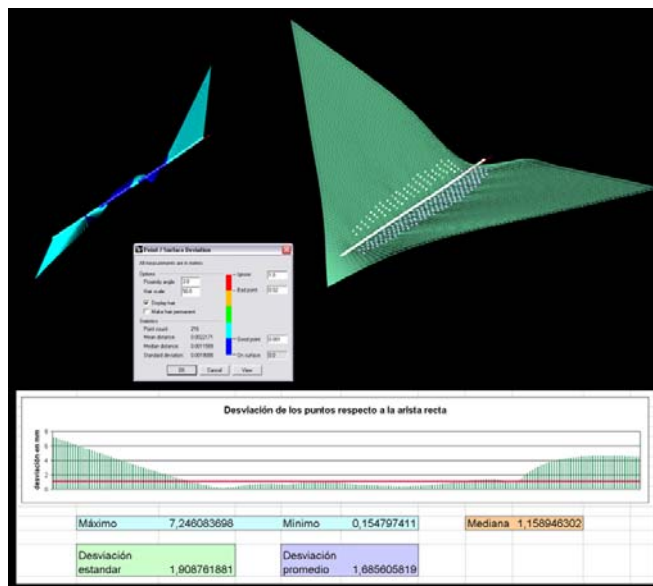


Figura 14.- Análisis y resultados de las desviaciones de una arista recta respecto a la nube de puntos de referencia.

## Conclusiones.

La transformación de *nubes* de puntos, obtenidas mediante un escáner tipo láser, en formas tridimensionales presenta diversos problemas importantes para que puedan determinar lo mejor posible aquella arquitectura que se pretende restituir. En este sentido, el estudio que se ha presentado aquí solamente pretende ser un punto de partida para desarrollar posteriormente este problema de una manera sistemática.

El primer problema, que se ha observado al transformar conjuntos de puntos en formas continuas, son los errores de precisión que existen al generar las superficies que abarcan las *nubes* de puntos y que de hecho hay que sumar a los límites de precisión que tiene el escáner. De esta manera, las formas finales no sólo dependerán de la calidad del instrumento utilizado y de los procesos empleados para obtener *nubes* de puntos, sino de manera muy importante del proceso utilizado para construir las formas tridimensionales virtuales.

La aplicación del sistema de *mallas* para configurar superficies que emulen formas tridimensionales sólo se puede aplicar a modelos que no requieran como resultado una métrica estricta y un análisis de comportamiento profundo. De todas maneras, esta técnica es muy apropiada para generar modelos virtuales rápidamente, para ser utilizados fundamentalmente en entornos visuales.

La aplicación de la técnica de figuras *sólidas* con figuras geométricas básicas, es muy precisa y admite cualquier tipo de análisis. Además, si las formas lo permiten, el proceso de obtención de los objetos tridimensionales es muy rápido y eficaz. Sin embargo, la técnica de figuras *sólidas*, no se puede aplicar a ninguna forma que se aparte de un repertorio de las geometrías elementales. Y por otro lado, no permiten modelar objetos que presenten deformaciones importantes respecto a una forma básica tal cual son.

En este sentido, la aplicación de superficies de tipo *NURBS* para transformar un conjunto de puntos en un objeto tridimensional presenta varias ventajas. Es un sistema de aproximación a la forma tridimensional de alta precisión, que puede abordar formas muy complejas mediante diversos procedimientos de control. Es decir, que no existe una solución única para cada caso. Todas las alternativas que se pueden emplear en un proceso de formalización tridimensional, pueden ser evaluadas con mucha precisión y a partir de un repertorio muy amplio de consideraciones formales todas ellas geoméricamente controlables mediante funciones matemáticas. A pesar de estas virtudes, el sistema de *NURBS* presenta tres inconvenientes: con este sistema no se pueden conseguir precisiones métricas absolutas de una forma, sobre todo cuando se conoce exactamente los parámetros geoméricos o matemáticos que la definen, ya que son modelos de aproximación. El modelado tridimensional de muchos objetos en un mismo entorno es prácticamente inviable, por la gran cantidad de cálculos y funciones matemáticas que se requiere y por lo tanto, del instrumental que se necesitaría para poder mostrar al mismo tiempo todas las formas que componen el modelo. No es posible aplicar la técnica de las *NURBS* a formas excesivamente complejas y con un comportamiento prácticamente aleatorio.

Para aprovechar todas las particularidades de la formalización de objetos mediante superficies *NURBS*, las *nubes* de puntos de las que se parte, deben tener una distribución uniforme, sobre todo si se trata de formas curvas libres. En caso de que se conozca los parámetros geoméricos o matemáticos un exceso en la cantidad de puntos escaneados sólo entorpecerá el proceso de modelado. En este caso un muestreo de puntos significativos de la forma es suficiente. Sin embargo, para abordar formas curvas irregulares, los intervalos entre puntos deben ser lo más reducidos posibles y de distribución uniforme. Si se desea un proceso de modelado tridimensional de alta precisión y con constantes verificaciones, como el que se ha expuesto aquí de forma experimental, ambos requisitos son absolutamente imprescindibles.

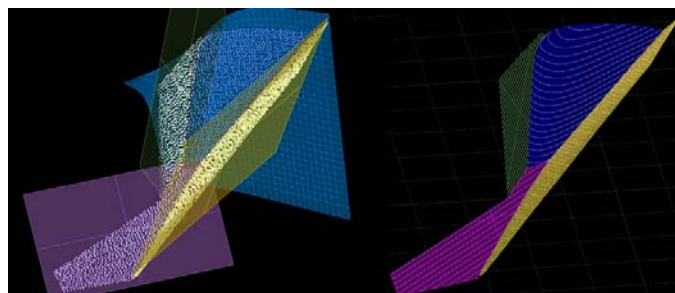


Figura 15.- Modelo geométrico de entidades *NURBS*; modelo completo y modelo limitado en sus aristas de borde.