

Láser escáner y nubes de puntos. Un horizonte aplicado al análisis arqueológico de edificios

Laser scanner and point cloud. A horizon applied to the archaeological analysis of buildings

Ismael García-Gómez*
Enklabe Koop. S.T.

Miren Fernández de Gorostiza López de Viñaspre
Enklabe Koop. S.T.

Amaia Mesanza Moraza
Universidad del País Vasco/Euskal Herriko Unibertsitatea

Resumen

En el siguiente artículo analizamos uno de los más modernos instrumentos de documentación gráfica del patrimonio, el láser escáner. Aunque profundizaremos en todos aquellos aspectos técnicos, logísticos y de método relativos a su empleo, nos centraremos en su efectiva aplicabilidad dentro del campo de la Arqueología de la Arquitectura, incidiendo en aquellas capacidades diagnósticas que pueden ayudar al estratígrafo a determinar la secuencia evolutiva de un edificio. Tomaremos como base nuestra experiencia en la iglesia de San Miguel de Vitoria-Gasteiz.

Palabras clave: Láser escáner, topología, estratigrafía, nube de puntos, análisis cronotipológico, San Miguel de Vitoria.

Abstract

This paper analyses the laser scanner, a powerful tool for graphic recording of cultural heritage sites. Although attention will be drawn to those technical and logistical aspects and methods related to its employment, this report will mainly focus on its applicability on Building Archaeology, highlighting those diagnosing capacities which may help the stratigrapher to establish an evolutionary sequence of the building. The basis of this study is our work on San Miguel church in Vitoria-Gasteiz.

Key words: laser scanner, topology, stratigraphy, point cloud, chronotypological analysis, San Miguel in Vitoria.

* ism.garc@gmail.com; mgorosvi@gmail.com; amaia.mesanza@ehu.es

1. INTRODUCCIÓN

Como todo instrumento, el láser escáner es un *medio* y, como tal, sirve a una *finalidad*. En este sentido, y por más que tecnológicamente no resista comparación, la *finalidad* del láser escáner es esencialmente la misma que la de la cinta métrica, esto es, medir; medir para conocer la geometría de la realidad física que se despliega ante nuestros ojos.

Esa *finalidad*—evidente y primaria— del láser escáner requiere múltiples matizaciones cuando entramos en contexto arqueológico. Al *cómo medir* se añaden otras cuestiones clave que no sólo tienen que ver con los fines de los proyectos de investigación (*qué medir, para qué medir...*) sino también con la logística que los hace posibles (*con qué medios, a qué coste...*). Esa dialéctica que se establece entre los objetivos inherentes al registro gráfico y aquellos propios del análisis arqueológico, es la que pretendemos constituya el telón de fondo de nuestra reflexión sobre el láser escáner.

Somos conscientes de que este planteamiento puede volverse en nuestra contra, situándonos en una suerte de *tierra de nadie*, pues en los aspectos arqueológicos difícilmente satisfaremos al arqueólogo y, desde luego, sería del todo ingenuo intentar sorprender a los especialistas en documentación gráfica del patrimonio en cuestiones de láser escáner, o a los profesionales de la programación con nuestra torpe incursión en el terreno de los sistemas expertos (SS.EE.). Ahora bien, pensamos que el interés y la justificación de las líneas que siguen radica precisamente en el intento de establecer puentes entre nichos disciplinares.

Con objeto de alcanzar ese horizonte interdisciplinar, creemos que no queda otra opción que centrarse en cuestiones muy básicas, porque en esencia se trata de introducir a especialistas de diversos campos en terrenos que, en principio, no les son propios. Con todo, es preciso advertir que el presente artículo va preferentemente dirigido a arqueólogos que quizá ya hayan oído hablar del láser escáner, deseen tener una idea más concreta de cómo funciona y de cómo en un futuro —quizá gracias al desarrollo de herramientas informáticas *ad hoc*— puede ayudarles en el análisis arqueológico. Asimismo, como probablemente el mejor modo de exponer nuestros planteamientos acerca de la relación entre láser escáner y arqueología consista en tratar algún ejemplo práctico, en la última parte de esta contribución nos referiremos brevemente al ensayo que desarrollamos en el contexto de la iglesia de San Miguel de Vitoria-Gasteiz¹.

¹ Este proyecto de análisis configuracional fue posible gracias a una coincidencia de intereses metodológicos entre nuestro equipo (Enklabe KST) y el Grupo de

2. LA CUESTIÓN TOPOLÓGICA Y EL REGISTRO GRÁFICO

Como arqueólogos, a menudo estamos tan centrados en la obtención de la secuencia cronológica, que tendemos a obviar la naturaleza intrínsecamente espacial de los sistemas estratificados. El proceso de confección del diagrama Harris constituye a nuestro juicio una buena muestra de ello. Obsérvese al respecto cómo en su estado primario de elaboración éste tiene un carácter topológico más que cronológico (Cattani y Fiorini, 2004: 325), puesto que para confeccionarlo hay que tomar en consideración *todas* las relaciones físicas registradas en las fichas (redundantes o no); estas relaciones físicas constituyen el material en bruto sin el cual no se podrían dar los siguientes pasos para lograr el diagrama con la secuencia temporal relativa, pero a pesar de su importancia es probable que no pasen al papel ni siquiera como borrador.

A nuestro juicio es tal el énfasis el que se ha puesto sobre el hecho (indiscutible por otra parte) de que *«la representación global de la estratigrafía no puede ser topográfica sino estratigráfica, es decir, reducida a la dimensión del tiempo relativo»*, y tan taxativa la directriz que establece que en el diagrama *«sólo deben expresarse las relaciones esenciales entre unidades, descartando las líneas de conexión redundantes»* (Carandini, 1996: 79-80), que el problema del análisis topológico viene sistemáticamente soslayado.

A efectos de este artículo, la cuestión topológica es relevante entre otras razones porque según se le dé o no importancia, el rol de la documentación gráfica en contexto arqueológico será uno u otro; más pasivo o más activo. Así, desde el momento en que *«la excavación estratigráfica presupone siempre representaciones topográficas en relación a la necesidad de la reconstrucción científica y por lo tanto de las relaciones estratigráficas y su periodización»* (Carandini, 1996: 65), es decir, desde el momento en que el análisis topológico puede solventarse con el recurso al registro alfanumérico y el papel de la documentación gráfica queda reducido a su vertiente descriptiva —mero soporte para la visualización de los resultados—, huelgan prácticamente reflexiones técnicas sobre la necesidad de uno u otro sistema de medición. Toda observación acerca de la precisión métrica, o acerca de los errores inherentes al instrumental, pierde entonces sentido en favor de consideracio-

nes que tienden a primar la estética y capacidad expresiva de las imágenes que servirán para respaldar la síntesis interpretativa.

Ahora bien, en cuanto la cuestión topológica salta al centro del análisis arqueológico, el papel del registro gráfico deviene mucho más activo, y esto es lo que sucede en los análisis de tipo configuracional. En estudios de este género, cuando a menudo la presencia de enlucidos impide una visualización directa de la estructura —y por lo tanto un análisis estratigráfico propiamente dicho—, un buen levantamiento geométrico resulta fundamental: *«Un levantamiento geométrico detallado y preciso es un óptimo indicador de las medidas y de las coincidencias a diferentes planos de aquello que no se ve»* (Mannoni, 1998: 83). Ya no sólo como mallazo sobre el que articular un SIG y georreferenciar las variables cronotipológicas (Azkarate, 2002: 67), sino para la propia caracterización e individualización de estas últimas. En este caso, cuestiones como la precisión métrica o los errores inherentes al instrumental son del todo pertinentes, porque pueden afectar de un modo crítico a la definición de la secuencia cronotipológica relativa.

3. ANÁLISIS CONFIGURACIONAL, CRONOTIPOLOGICO Y LÁSER ESCÁNER

A lo largo de la historia de la arqueología, han sido diversos los sistemas e instrumentos de registro gráfico empleados para complementar las capacidades perceptivas del arqueólogo a la hora de captar la geometría que formalmente define estratos, edificios, distribuciones de objetos, etc. Empezando por la cinta métrica o métodos como el de la trilateración, pasando por el teodolito, el taquímetro, las actuales estaciones totales, técnicas como la fotogrametría —estereoscópica o convergente—, la rectificación fotográfica y por supuesto el láser escáner, todos son medios que han acompañado a nuestra disciplina desde sus orígenes. Algunos siguen de plena actualidad por méritos propios, es el caso de la cinta métrica o el nivel óptico (sobre todo en excavación), otros sin embargo han quedado fuera de uso al ser sustituidos por herramientas tecnológicamente más eficaces.

Ahora bien, en nuestra opinión, la eficacia de un sistema o instrumento de registro gráfico no depende tanto de sus teóricas prestaciones, sino de su versatilidad o idoneidad según los objetivos y el *contexto de aplicación* (volviendo al ejemplo de la cinta métrica, es precisamente su sencillez la que la hace versátil, su bajo coste el que la hace accesible, y de ahí deriva su eficacia). Desde esta perspectiva, puede que el láser escáner no sea el instrumen-

Investigación en Patrimonio Construido de la UPV/EHU (GPAC). Nosotros empezábamos a hablar de la necesidad de «sistematizar para automatizar», cuando de hecho la noción de «sistema experto» ya venía sirviendo como idea articuladora de algunos de los últimos proyectos que, bajo la dirección de A. Azkarate, se están desarrollando en el GPAC y en los que también participamos los firmantes de este trabajo.

to de menor coste, o el de manejo más sencillo, pero a cambio ofrece precisión y exhaustividad, amén de otras cualidades que trataremos de destacar a lo largo de las próximas líneas.

Es evidente que si pensamos en un contexto de aplicación limitado a las habituales necesidades del registro arqueológico, el empleo del escáner resultará —sobre todo por cuestión de costes— escasamente rentable frente a otros métodos (si bien el abaratamiento de los equipos y su creciente autonomía empiezan a poner incluso este extremo en entredicho). Por contra, si en lugar de centrarnos en los usos habituales, reflexionamos sobre el conjunto de líneas de investigación abiertas en el campo arqueológico, y trabajamos en aquellos contextos de aplicación donde las especificidades del láser escáner mejor se ajusten a las necesidades del método, los ensayos pueden resultar eficaces y asumibles en términos económicos.

La presencia de enlucidos y de otro tipo de enmascaramientos convierten al análisis configuracional o cronotológico en el único análisis de tipo arqueológico al que

pueden aspirar gran parte de los templos y edificios residenciales que conforman nuestros cascos históricos (Mannoni, 1998: 85); pues bien, este es un contexto en que —a nuestro modo de ver— el láser escáner tiene mucho que aportar, coadyuvando incluso a una mejor gestión del patrimonio arqueológico.

4. SISTEMAS EXPERTOS EN ARQUEOLOGÍA DE LA ARQUITECTURA; UN HORIZONTE

Es tal la cantidad de información que comportan las nubes de puntos obtenidas por medio del láser escáner, que —más allá de la propia visualización— resulta verdaderamente difícil para el operador humano procesarla y comprenderla de un modo satisfactorio. Una disección sistemática de los modelos de nube de puntos ejecutada con el fin de elaborar corpus planimétricos que comprendan un completo juego de secciones en planta y alzado, será en ese sentido de gran ayuda. Sobre este corpus el arqueólogo podrá trabajar como hasta el momento venía haciéndolo; comparando perfiles de basas, capiteles o nervaduras,

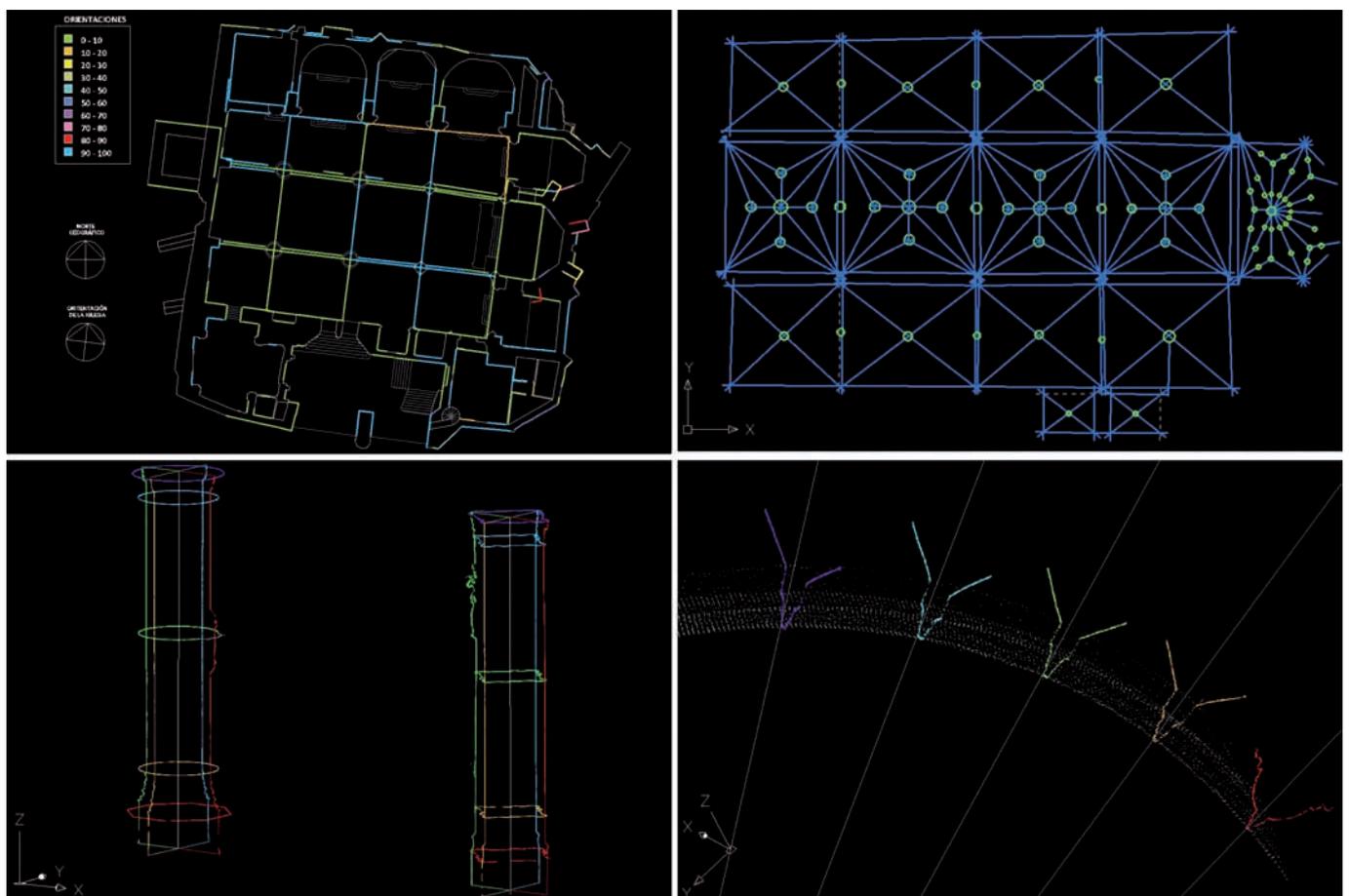


Fig. 1. Para el análisis configuracional de San Miguel de Vitoria, se estudiaron —entre otras— las orientaciones de paramentos, la geometría de las bóvedas, las secciones verticales de los pilares y las de las nervaduras

analizando la disposición del dovelaje de los arcos (Gabrielli, 1998: 44) o señalando cambios en el desplome de los muros. Esta es la línea de trabajo que —como se verá— hemos intentado explorar con ayuda del láser escáner en San Miguel de Vitoria, una tímida experiencia que nos ha abierto a un horizonte insospechado que excede con mucho las pretensiones del propio ensayo, pero al que nos gustaría dedicar una breve reflexión final; el citado horizonte tiene que ver con los medios informáticos y el software para el procesado de datos (ver fig. 1).

Hoy día ya nadie discute la utilidad de los Sistemas de Información Geográfica en campo arqueológico, ésta es desde hace tiempo nuestra herramienta de cabecera a la hora de gestionar las —cada vez— más ingentes cantidades de información georreferenciada que generamos, pero, por ceñirnos más específicamente al láser escáner, debemos sobre todo hablar de los algoritmos para el procesado y síntesis gráfica de las nubes de puntos que todo software de tratamiento de nubes incluye en sus paquetes más básicos. Aunque éstos no han sido pensados específicamente para su uso en arqueología, lo cierto es que —al menos algunos de ellos— pueden resultar de gran ayuda. Empleados del modo adecuado, aquellos algoritmos diseñados para la obtención de mapas de elevaciones por ejemplo, pueden servirnos para detectar cambios en el desplome en los muros, los cuales a su vez pueden estar denotando la presencia de interfaces horizontales. De hecho, si vamos al caso de los escáneres aerotransportados (*LiDAR*²), ya hace tiempo que el *English Heritage* está ensayando con algunos de estos para su empleo en arqueología, comprobándose cómo éstos empiezan a facilitar tareas de prospección aérea hasta el momento inconcebibles, como la localización de yacimientos en zonas de bosque cerrado (Cruthley, 2010: 26).

En nuestra opinión, a poco que nos proyectemos en el futuro partiendo de hechos constatables como los apenas mencionados, no parece aventurado prever que el desarrollo de SS.EE. pensados desde y para la arqueología, serán una realidad en no demasiado tiempo.

Con todo, por más que intuyamos la inminencia con que probablemente se producirá el desarrollo de estos sistemas de asistencia experta, debemos ser realistas y reconocer que aún queda mucho trabajo que hacer. Primero está el problema de ponernos de acuerdo dentro de la propia disciplina arqueológica (no podemos automatizar ningún proceso que previamente no tengamos sistematizado desde el punto de vista metodológico) y, en segundo lugar, está la necesidad de abrirnos a otros campos como el

de la programación informática o el de los sistemas de captura y gestión exhaustiva de datos geométricos; no se trata de convertirnos en especialistas, pero sí de controlar los rudimentos básicos para poder establecer una comunicación eficaz con quienes lo son.

5. LÁSER ESCÁNER Y NUBE DE PUNTOS: FUNDAMENTOS BÁSICOS

Empecemos haciendo un poco de historia. Si hubiera que destacar un punto de inflexión en la reciente evolución tecnológica del instrumental aplicado a la documentación geométrica del patrimonio, deberíamos retrotraernos al filo del cambio de milenio, momento en que empezaron a utilizarse las estaciones totales con medida directa de distancia, aquéllas que gracias al láser eran capaces de medir distancias sin necesidad de emplear prisma reflectante (Martínez Rubio, 2010: 67). Atrás quedaban los teodolitos con distanciómetro acoplado o los tediosos cálculos de las bisecciones, necesarios para determinar la situación de los puntos medidos en un alzado. Los equipos empezaron a incorporar asimismo servomotores, una innovación que en primera instancia dio lugar a las estaciones totales robotizadas, y más adelante al láser escáner, que como el resto de instrumental topográfico de uso corriente en la actualidad, se beneficia de las últimas mejoras en la electrónica de la medida de distancias, tanto en precisión como en velocidad.

5.1. Mecánica del láser escáner

En síntesis, podríamos decir que el láser escáner consta de dos componentes básicos. Por un lado, y como es obvio, de un dispositivo de medida de distancias, el láser; y por otro, de un mecanismo de barrido, que no es sino un sistema motorizado de espejos que desvía el láser procedente del distanciómetro en las direcciones vertical y horizontal (ver fig. 2). Provisto de este equipamiento, el escáner es capaz de medir la distancia de una gran cantidad de puntos, obteniendo al mismo tiempo datos referidos a los ángulos y al valor de la reflectancia de las distintas superficies impactadas por el láser. Con los valores angulares y la distancia registrados, se podrán calcular las coordenadas tridimensionales —x, y, z— de cada uno de esos puntos (Farjas *et alii*, 2010: 81).

Dentro de la familia del láser escáner existen equipos de diversas características. En primera instancia se pueden diferenciar dos grandes grupos según si van o no montados sobre alguna plataforma móvil; es por ello que se habla de *unidades dinámicas* (*LiDAR*, *Mobile Mapping*, etc.) y *unidades estáticas*. Esta última es la categoría en la

² *LiDAR* es el acrónimo de *Light Detection And Ranging*.

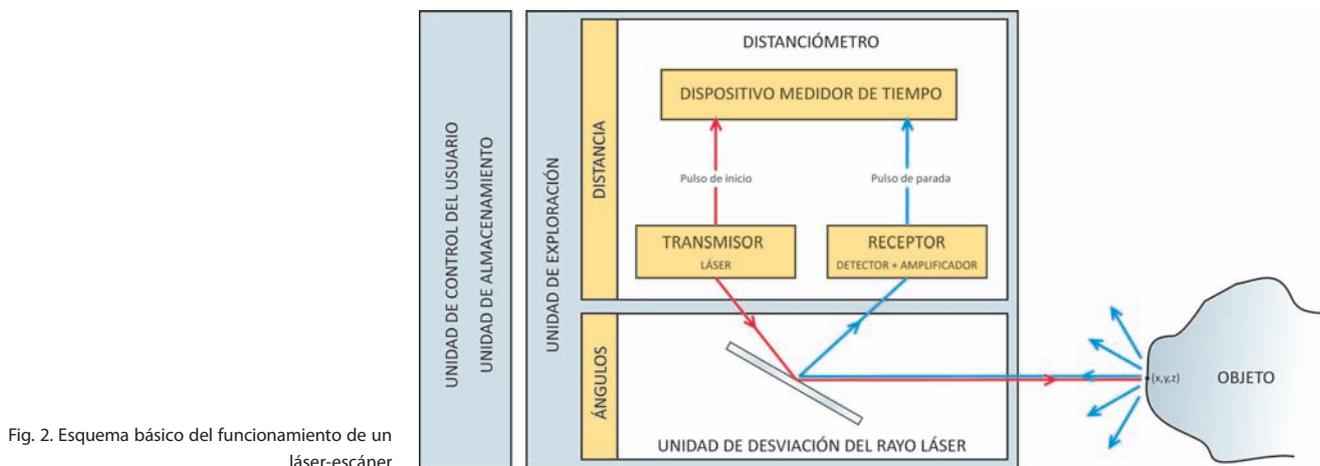


Fig. 2. Esquema básico del funcionamiento de un láser-escáner

que se engloban los escáneres habitualmente empleados para la documentación del patrimonio, que a su vez se clasifican —según el sistema de medición de distancias— en escáneres basados en la medida del tiempo y escáneres basados en la medida de una triangulación (Lerma y Biosca, 2008: 20).

Los *escáneres de triangulación* son de corto alcance (inferior a los 10 m) y alta precisión, del orden de micras. Se emplean para documentar objetos de reducidas dimensiones que exigen un muestreo con un alto grado de detalle y precisión.

Los *escáneres de medida de tiempo* son los que calculan la distancia midiendo el tiempo que transcurre entre la emisión del pulso láser y la recepción, después de que éste sea reflejado por el objeto. Dentro de éstos, de nuevo tenemos que hablar de dos subgrupos: aquéllos que se basan en pulsos (conocidos también como de *tiempo de vuelo*), y aquéllos que se basan en la *comparación de fase*. Los primeros tienen un alcance mayor, aunque la velocidad y la precisión son algo inferiores, llegan a superar los mil metros con precisiones de centímetro. Los segundos, al contrario, se caracterizan por la rapidez en la medición, proporcionando miles de puntos por segundo con precisiones milimétricas, aunque con un alcance inferior a los cien metros. Ambos tipos de escáner se emplean habitualmente en el levantamiento de edificios, los primeros son más indicados para trabajos exteriores y los segundos para interiores.

5.2. Del láser escáner a la nube de puntos

Las nubes de puntos son sin duda el producto más genuino del láser escáner. En su definición más simple no son otra cosa que conjuntos de puntos en un sistema de coordenadas tridimensional. Otros enunciados entran más en deta-

lle especificando que las nubes de puntos están compuestas por «miles de mediciones individuales en un sistema de coordenadas (x, y, z) , que en sí mismas componen un modelo tridimensional de los objetos registrados, aunque como tal conjunto de puntos sin procesado posterior, son un modelo muy simplificado que opera sólo visualmente, pues se compone únicamente de entidades singulares de tipo punto» (Mañana-Borrazás, 2008: 16) (ver fig. 3).

Como más adelante apuntaremos, un modelo de nube de puntos no es sino una copia virtual del edificio, compuesto por puntos cuya captura ha sido realizada de forma altamente automatizada. Como es natural, la exactitud y la calidad de esa copia está limitada por los errores inherentes al instrumental de medida y a los métodos de observación, pero también por la buena o mala distribución de las tomas. En orden a lograr un registro lo más fiable posible será necesario atender a dos cuestiones clave: la resolución y la reflectividad.

5.2.1. La resolución

En síntesis hablar de resolución es hablar del nivel de detalle. Sin embargo, escanear a la máxima resolución no siempre es la mejor opción: hay que tener en cuenta que los tiempos de escaneo se multiplican, así como el tamaño de los ficheros y el volumen de datos a manejar. Para elegir la resolución óptima hay que pensar en la finalidad del trabajo, es decir, en cuál es el detalle más pequeño que deseamos representar, teniendo bien presente la precisión máxima que puede ofrecer el instrumental (si la precisión nominal del escáner, es decir, la variación mínima de magnitud que puede detectar, es de 3 mm en el mejor de los casos, no tiene sentido medir un punto cada 2 mm).

Con todo, es necesario hacer especial hincapié en que la resolución del escaneo (o el volumen de datos a



Fig. 3. Detalle del modelo de San Miguel en el cual puede observarse la trama de la nube de puntos

capturar) es un parámetro que el usuario puede configurar en el instrumento, pero la resolución de la nube de puntos resultante es algo que depende de la situación del instrumento respecto al elemento escaneado. Obsérvese que la separación entre puntos no será uniforme en toda la superficie escaneada, puesto que el modo de dispersión de las mediciones es esférico. Dependiendo del alejamiento y de la orientación de la superficie respecto al escáner, la densidad y la distribución de los puntos en el modelo variarán. La geometría de la toma es un factor determinante en este punto (ver fig. 4).

5.2.2. La reflectividad

Cuando el láser impacta en la superficie de un objeto, una parte de la energía del haz de luz es absorbida por el material que lo compone, y otra parte es reflejada al medio

original; esta última es la que tiene que detectar el escáner para calcular la distancia. Cuanto mayor sea la intensidad de la señal de retorno, más precisa será la distancia medida; hablar de reflectividad equivale por lo tanto hablar de calidad en la medición.

Como es lógico, en esta cuestión influyen mucho las características del material —el grado de reflexión que depende de la rugosidad y color—, pero también, una vez más, las condiciones geométricas de la observación, ya que en distancias largas y ángulos escorados aumenta el ruido de la señal. La geometría perfecta se consigue cuando colocamos la dirección del haz del láser perfectamente perpendicular a la superficie, de lo contrario, según se incrementa el ángulo de incidencia respecto a la perpendicular, la intensidad de la señal reflejada se reduce (ver fig. 4).

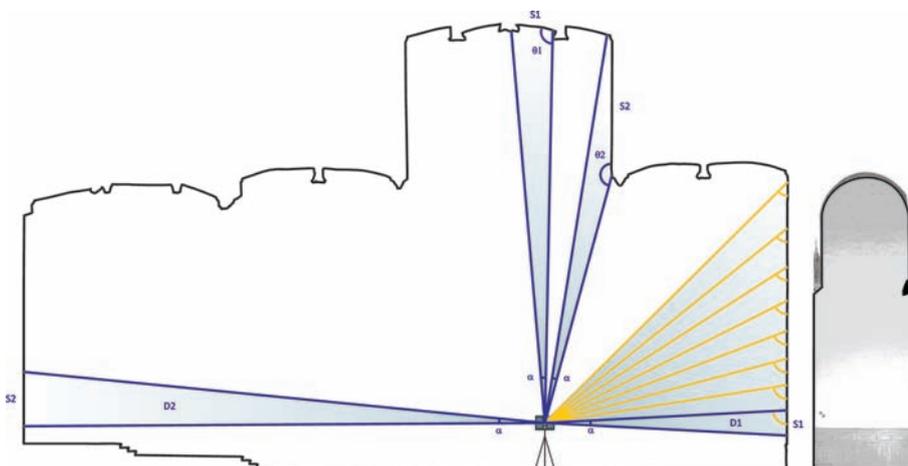


Fig. 4. Los haces en color azul muestran la variación de la resolución en función de la distancia y el ángulo de incidencia. Los haces en color amarillo muestran la variación de la reflectividad en función del ángulo de incidencia. El alzado de la derecha es la nube de puntos en escala de grises, que indica el nivel de reflectividad en cada punto

5.3. De las nubes de puntos al modelo 3D

La fiabilidad geométrica de las plantas, secciones o vectorizaciones por obtener a partir de las nubes de puntos no sólo está ligada a la calidad del dato de base, sino también a su procesado, por ello, todas las nubes capturadas deben ser depuradas antes de elaborar otros productos derivados. Una buena georreferenciación de los escaneos es asimismo clave para componer el modelo final.

5.3.1. Errores instrumentales y depurado de las nubes de puntos

La precisión de los instrumentos es finita y tan difícil de determinar que ni siquiera las empresas suministradoras de los equipos láser son capaces de aportar datos seguros: «*las especificaciones de precisión, proporcionadas por los fabricantes de escáneres en sus publicaciones, no son comparables con la realidad. La experiencia nos muestra que a veces no están contrastadas y que la precisión de estos instrumentos, que son contruidos en pequeñas series, varía de un equipo a otro y depende de la calibración individual y del cuidado que se haya tenido en su manejo desde entonces*» (Boehler y Marbs, 2003: 2).

La *precisión* de un instrumento está asociada a la *apreciación* (la unidad de magnitud mínima que puede detectar) y la *exactitud* a la *calidad de la calibración*. Un instrumento puede ser muy preciso (medir en milímetros), pero a la vez inexacto si desvía todas las medidas un centímetro, debido por ejemplo, a la falta de verticalidad de su eje principal.

En todo instrumento de medición siempre existe un cierto grado de imprecisión que es inherente al mecanismo que lo conforma. En el caso de los instrumentos de detección remota, además, las mediciones están fuertemente determinadas por las condiciones ambientales y las características del objeto que se mide. Las fuentes de error pueden clasificarse en dos grupos:

a) **Errores debidos al diámetro del láser.** El láser no es infinitamente delgado y al incidir en una arista es posible que parte se refleje en un plano y parte en otro, devolviendo dos distancias diferentes, o en ciertas ocasiones varias distancias dispersas a medio camino entre los bordes y el fondo. En los dispositivos de tiempo de vuelo el retorno de la señal es único, sin embargo en los sistemas de comparación de fase puede suceder que haya varios retornos para un mismo punto. En ambientes de mucha humedad o polvo, el láser puede reflejarse en las partículas en suspensión.

b) **Errores debidos a la reflexión de la señal.** La medida de distancia depende de la calidad de la señal reflejada, que a su vez depende de varios factores:

- Las condiciones atmosféricas. En condiciones extremas de temperatura y presión pueden variar la velocidad del pulso láser, afectando al resultado de la distancia.
- Los ángulos de incidencia. El ángulo de incidencia que mejor refleja el pulso láser es el perpendicular a la superficie escaneada; los ángulos muy escorados reflejan la señal con menor intensidad.
- El nivel de reflectividad de los materiales. Ya hemos hecho alusión a ello; cabe añadir que —frente a los oscuros— los materiales claros son los que mejor reflejan la señal.

Todos estos errores, que por sí mismos son *errores sistemáticos*, pueden considerarse *errores accidentales*, en cuanto que, combinados entre ellos, no se repiten en una magnitud conocida. Pero en cualquier caso —aunque no podamos estimar el error de forma individualizada en cada punto—, tenemos la obligación de intentar minimizar sus efectos corrigiendo o eliminando los puntos con errores más evidentes. Para ello existen programas *ad hoc* que se sirven de algoritmos para examinar cada punto del escaneo y comprobar si cumplen con las condiciones de calidad establecidas³.

5.3.2. Georreferenciación y propagación de errores

Si pudiésemos documentar por completo un edificio desde una única posición, no habría mucho de qué hablar en el este punto; la precisión del modelo obtenido sería equivalente al error que comete el escáner. Sin embargo esto no sucede prácticamente nunca, casi siempre son necesarias distintas posiciones de escáner para poder registrar todas las partes de un inmueble. Suponiendo que las especificaciones de nuestro escáner contemplaran un error de 6 mm, al estacionar dos veces, habríamos cometido el error otras tantas. Evidentemente esto no quiere decir que tengamos un error acumulado de 12 mm; eso implicaría que los errores en cada medición fueron los máximos y se produjeron en la misma dirección, cuando lo habitual es que se cometan en mayor o menor medida y con la misma probabilidad tanto por exceso como por defecto, razón por la cual tienden a compensarse.

³ Es preciso aclarar que no todos los programas de procesado de nubes incorporan algoritmos de filtrado. De hecho, algunos programas para los escáneres de tiempo de vuelo no lo hacen; este tipo de escáneres son los que —a priori— menos ruido generan en sus mediciones, debido a que no tienen que trabajar con múltiples retornos. Ahora bien, esto no quiere decir que no introduzcan ruido alguno en sus mediciones; aunque en menor medida que los escáneres de comparación de fase, también lo hacen.

Originalmente cada escaneo tiene un *sistema de coordenadas relativo*; cada vez que se estaciona el escáner estamos definiendo uno distinto⁴. Todos los puntos que se registran durante la exploración estarán referidos a este sistema relativo. Cuando volvamos a estacionar de nuevo el escáner, éste tendrá otra posición y orientación diferentes, y así sucesivamente. Como es lógico, para relacionar todos los datos y obtener la geometría del inmueble es imprescindible que las capturas cuenten con referencias comunes que permitan encajar unas nubes de puntos con otras (ver fig. 5). Asimismo, es necesario conocer las coordenadas de estas referencias en el *sistema de coordenadas absoluto*, que debería coincidir además, con el sistema de coordenadas de la cartografía oficial para situar el levantamiento en su exacta posición geográfica.

La cuestión de la propagación de errores como resultado de la georreferenciación no es fácil de tratar; hay que analizar todas causas de incertidumbre que intervienen. Primero, cuántas mediciones han sido necesarias para alcanzar la magnitud final. Segundo, con qué desviaciones se ha realizado cada una (según el método o los instrumentos empleados). Tercero, cuál es el sentido de transmisión de los errores (longitudinal o perpendicular). De hecho, desde esta perspectiva —y sin necesidad de entrar en la *teoría de errores*⁵—, creemos que no es arriesgado afirmar que las precisiones milimétricas, de las que —si se nos permite la expresión— tan alegremente se habla en el campo del láser escáner, son inalcanzables en la gran mayoría de los trabajos.

5.4. El modelo resultante de la georreferenciación

En cuestión de modelos virtuales existe a nuestro juicio una tendencia bastante generalizada a confundir la parte con el todo, es decir, la visualización del modelo con el modelo en sí. En este sentido, creemos importante recordar que la información que recoge el láser escáner se compone de simples valores numéricos que son los que definen las características de cada punto medido (los valores de posición x , y , z ; los valores de intensidad; y —en su caso— los valores RGB). El software es luego el que «lee y traduce» esos valores y genera a partir de

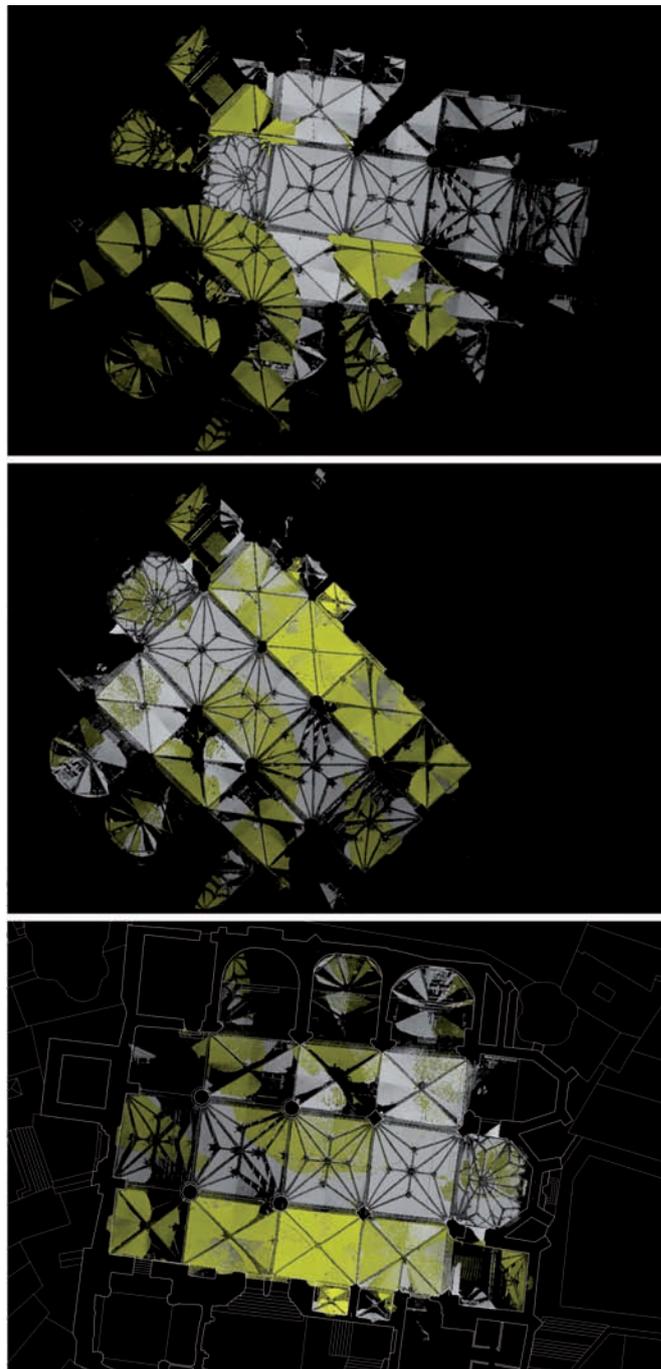


Fig. 5. Unión de tres nubes de puntos. En la imagen superior los escaneos en el sistema de coordenadas relativo al escáner, en la central referenciados en relación al sistema de coordenadas de uno de ellos y la inferior los escaneos georreferenciados en el sistema de coordenadas global

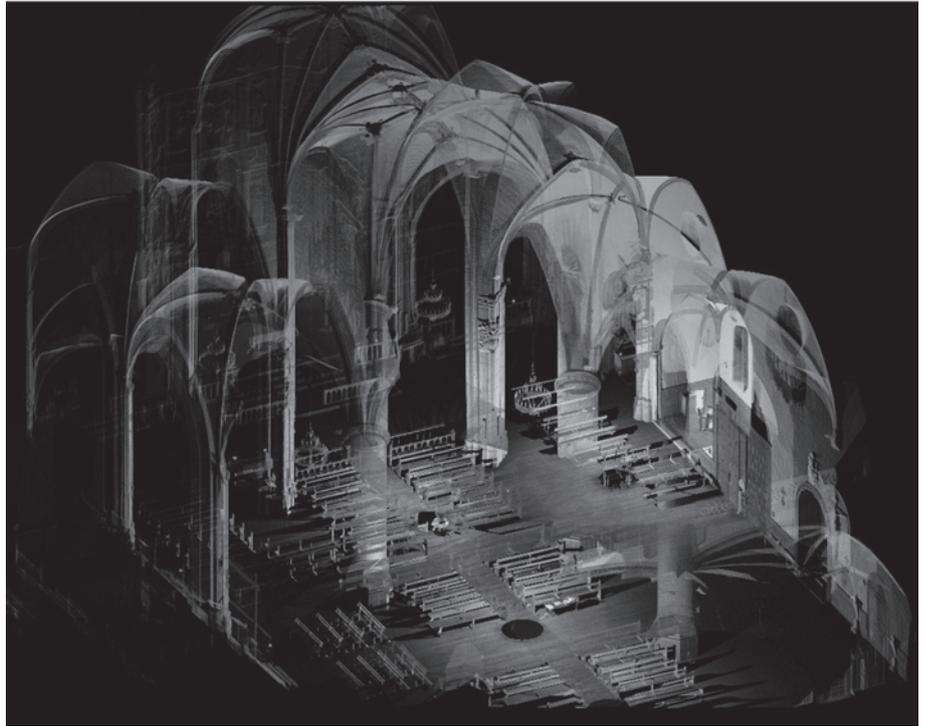
ellos la representación gráfica que podemos observar en pantalla.

Como ya hemos dicho, antes de la georreferenciación, los valores numéricos de posición son los relativos de cada escaneo; pero después de ella, esos mismos tienen un carácter absoluto con respecto al modelo en su conjun-

⁴ Un sistema cartesiano cuyos ejes tienen el origen en el centro del espejo del escáner. Donde el eje Z será la vertical —normal o línea de gravedad— si el aparato está correctamente nivelado y el eje Y toma la dirección del origen de la rotación horizontal (orientación aleatoria en función de cómo posicionemos el origen de ángulos del escáner).

⁵ Una buena síntesis sobre la teoría de errores la encontramos en: Sevilla, 1993: 133-166.

Fig. 6. El modelo existe desde que georreferenciamos las nubes de puntos, independientemente de que tengamos la intención de visualizarlo gráficamente



to. Es por lo tanto la georreferenciación la que «crea» el modelo, independientemente de que tengamos o no la intención de visualizarlo gráficamente (ver fig. 6).

Existe —al menos entre los no especialistas en documentación del patrimonio— la idea equivocada de que para trabajar con un modelo hay que tenerlo activo en nuestra CPU, todo él al mismo tiempo y, si es posible, visible en todo su detalle. Probablemente esto se debe a que se iguala la noción de modelo virtual a la de maqueta, o a la de otro tipo de representaciones que reproducen —a escala— la forma del edificio documentado. Sin embargo, hoy día la herramienta informática nos permite separar en capas, unir archivos temporalmente, o establecer hipervínculos, de modo que podemos estar trabajando sobre el conjunto del modelo sin tenerlo activo al mismo tiempo⁶.

5.5. Gestión de los archivos de nube de puntos

Hablando de nubes de puntos, no podemos soslayar uno de los hándicaps que se le atribuyen al sistema de registro basado en láser escáner; nos estamos refiriendo a la manejabilidad de los datos. De todos es conocido que los archivos de nube de puntos consumen gran cantidad de memoria, y que los formatos en que trabajan las distintas

empresas suministradoras de los equipos no son ni mucho menos universales, de modo que las tareas de exportar e importar datos pueden resultar en ocasiones tediosas.

Normalmente, las primeras fases del procesado —es decir, importación de la nube, filtrado de puntos y unión de escaneos— se realizarán con el software que proporciona el fabricante del escáner. Si se desea hacer estas operaciones con otro programa distinto al del fabricante, en principio existe la posibilidad de exportar esta información a cualquiera de los formatos de intercambio disponibles en el mercado (*ASCII* o binario). En esta transferencia no deberían darse pérdidas de datos, ya que ambos son formatos ampliamente utilizados, sin embargo la realidad es que cada fabricante ha desarrollado programas de procesado propio, cuyo uso de algún modo intenta imponer; es por ello que introducen ciertas restricciones que en la mayoría de ocasiones obligan al operario a emplear el software propietario de la casa suministradora del escáner.

En cuanto al volumen de datos que se genera, antes de acometer ningún proyecto de estas características, es importante tener muy claro cuál es el objetivo del registro geométrico que se va a efectuar. En función del tipo de análisis que se pretenda, será preciso que los escaneos tengan una mayor o menor resolución, lo que redundará en el tamaño del fichero. Con todo, no podemos sino mostrarnos muy optimistas ya que este problema del peso de los archivos es cada vez más relativo. La capacidad de los

⁶ En el caso de San Miguel, que expondremos al final, nunca llegamos a visualizar unitariamente los 3042 millones de puntos que lo componen; no era necesario, el modelo sólo es un medio y su visualización integral no entraba entre nuestros objetivos.

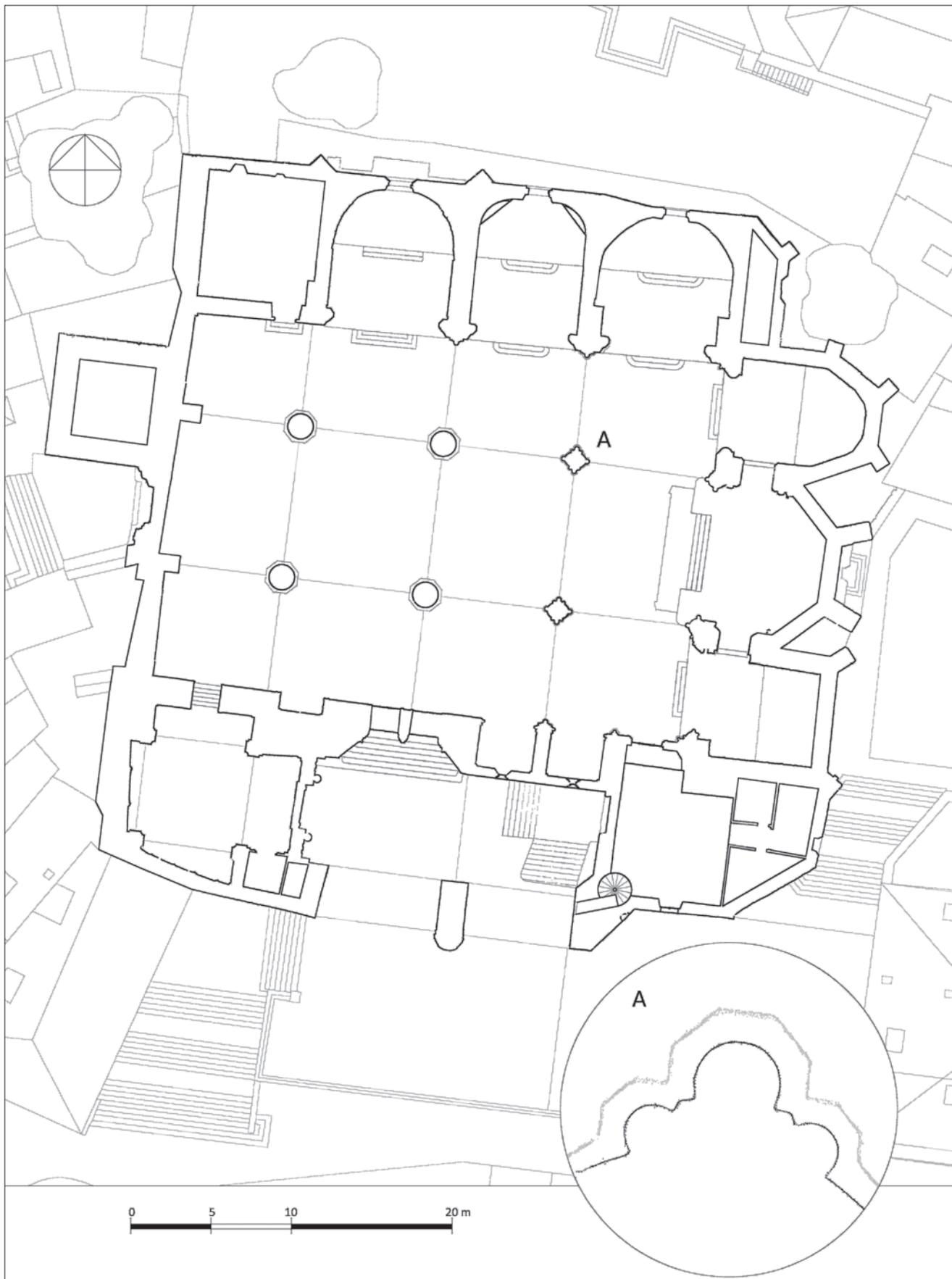


Fig. 7. Planta de San Miguel a partir de la nube de puntos sin delinear (obsérvese el detalle ampliado). Es la proyección ortogonal de todos los puntos contenidos entre dos planos horizontales separados un centímetro entre sí. A estos puntos se han añadido, posteriormente las secciones horizontales de otros elementos que quedan por debajo del plano de corte

ordenadores sigue creciendo año tras año, mientras que el tamaño de los archivos de nube de puntos se mantiene; a esta tendencia hay que sumar la creciente potencia del software de dibujo⁷.

5.6. Productos. Delinear o no delinear

Las plantas, las secciones, las vistas, y en general todos los productos que es posible extraer de un modelo de nube de puntos, hacen que la información geométrica referente a un edificio sea más comprensible y manejable, aunque a la vez menos exacta, dado que los procesos para obtenerlos implican sucesivas transformaciones de los datos que conllevan a su vez una generalización.

Pensemos por ejemplo en un modelo alámbrico obtenido mediante una estación total. Los datos originales son sólo aquellos referentes a la x, y, z, de los puntos que se han medido con el equipo, mientras que las polilíneas que los emplean como referencia para conformar el modelo vectorial, no son otra cosa que interpolaciones, generalizaciones que no tienen por qué responder a la realidad salvo en sus puntos extremos.

Sin embargo, cuando el levantamiento se ha realizado con alta definición, es decir, mediante un láser escáner, es posible obtener productos sin delinear, que respetan el dato original; basta con diseccionar el modelo de nube de puntos. Esto se debe a que la densidad de las mediciones es tal, que resulta suficiente seleccionar los puntos contenidos en un plano de cierto grosor —algunos milímetros dependiendo de la densidad del levantamiento— para obtener una planta o una sección clara de un edificio sin necesidad de trazar líneas entre los puntos. De este modo, el plano realizado a partir de un modelo de nube de puntos sin delinear puede aproximarse más a la realidad objetiva que otro elaborado por métodos tradicionales.

Que una serie de puntos alineados parezcan una línea continua es sencillamente una cuestión de escala. Los planos donde las líneas no son producto de una delimitación o interpolación, sino sólo fruto del límite de percepción visual y de la escala parecen más borrosos, los bordes de algunos objetos imprecisos y los detalles más pequeños y alejados, menos nítidos. Creemos que estos defectos son sólo aparentes, producto de una visión y una estética formal que tiene una larga tradición. Quizá debamos empezar a superarla, quizá debamos tender hacia una «estética de la objetividad»; rígida, áspera, pero metódicamente veraz (ver fig. 7).

⁷ Actualmente, la versión 2011 de Auto CAD® lleva incorporada la posibilidad de trabajar con de nubes de puntos procedentes de escáneres terrestres o aéreos permitiendo en un único dibujo gestionar hasta dos mil millones de puntos.

6. SAN MIGUEL DE VITORIA, UNA EXPERIENCIA PRÁCTICA

San Miguel es una de las parroquias más antiguas de Vitoria-Gasteiz⁸, con todo, la razón última que nos impulsó a escogerla para la experiencia que a continuación exponemos⁹ responde al hecho de que todos sus paramentos interiores se encuentran por completo enlucidos, precisamente el contexto de aplicación en el que deseábamos poner a prueba el análisis configuracional y cronotipológico asistido mediante láser escáner y termografía¹⁰.

6.1. Problemática que plantea el edificio a su captura mediante láser escáner

Formalmente, San Miguel es un templo de planta rectangular (trapezoidal en realidad según ha revelado la planta confeccionada a partir de los escaneos) con tres naves de cuatro tramos cada una, cabecera ochavada y dos capillas absidales laterales. En su costado norte, se abren otros tres oratorios y una antigua sacristía de dos plantas; al sur, se localizan las dependencias de la actual sacristía y las oficinas de la parroquia, el pórtico y la capilla de la Purísima. La fábrica en conjunto ocupa una superficie aproximada de 2100 m². El hueco interior, incluyendo naves y capillas laterales, tiene 43 m de longitud y 45 m de ancho. La nave mayor, tiene 19,6 m de alto (ver fig. 8).

La particular configuración del templo planteaba algunos condicionantes que fue necesario tomar en cuenta para diseñar la toma de datos. A grandes rasgos, la problemática podría sintetizarse en tres niveles:

a) Debíamos tener muy en cuenta la profusa fragmentación de espacios (incluso al exterior, porque gran parte del edificio se encuentra entre patios traseros a los que hay que acceder por separado); debíamos por lo tanto ser escrupulosos con el sistema de georreferenciación si deseábamos garantizar el encaje de los múltiples escaneos y evitar una excesiva propagación de errores.

b) Era necesario considerar las grandes distancias a las que nos veríamos obligados a trabajar. La altura de las

⁸ El templo de San Miguel se encuentra ubicado a media ladera, al sur del cerro de Gasteiz, la colina donde tuvo su origen la actual Vitoria. A su espalda, se yerguen las torres del primitivo recinto amurallado —del cual el propio San Miguel llegó a formar parte a principios del siglo XIII—.

⁹ Este trabajo ha sido realizado por nuestra empresa Enklabe KST en el marco de un proyecto más amplio que comenzó en el año 2005. Nos referimos al Estudio Histórico-Arqueológico del Casco Antiguo de Vitoria-Gasteiz, realizado por el Grupo de Investigación en Patrimonio Construido de la UPV-EHU (GPAC), con la financiación del Departamento de Cultura del Gobierno Vasco y la Agencia de Renovación de la Ciudad Histórica de Vitoria-Gasteiz (ARICH).

¹⁰ Los resultados obtenidos en San Miguel al aplicar la cámara termográfica son altamente prometedores, pero aún estamos trabajando en su georreferenciación dentro del modelo de nube de puntos.



Fig. 8. Aspectos interior y exterior de San Miguel de Vitoria-Gasteiz

naves centrales del templo implicarían ángulos de medición bastante picados y —en principio— una menor densidad de la nube de puntos en esas zonas. Asimismo, alcanzar en el exterior la zona alta del campanario o las propias cubiertas, se antojaba tarea imposible sin recurrir a escáneres de largo alcance o algún dispositivo auxiliar como andamios o grúas.

c) Debíamos tomar en consideración el detalle al que queríamos llegar y éste nos venía determinado por las necesidades del análisis cronotipológico. Era importante registrar rasgos formales de reducidas dimensiones; desde las secciones de las nervaduras hasta los perfiles de las basas y los capiteles de los pilares.

6.2. Elección del equipo

Una vez tomados en consideración todos estos aspectos, tuvimos que asumir que no existía un instrumento que se adaptase perfectamente a todas las necesidades, ya que el nivel de detalle que se precisaba en cada caso variaba de manera considerable. Los escáneres de triangulación, que alcanzan la precisión de micras, o los escáneres de larga distancia, no parecían los adecuados para documentar el grueso del edificio que requería un rango intermedio de alcance y precisiones inferiores al centímetro.

Los recursos económicos de la investigación eran limitados y sólo podíamos permitirnos el alquiler de un equipo, de modo que finalmente el escáner escogido fue el

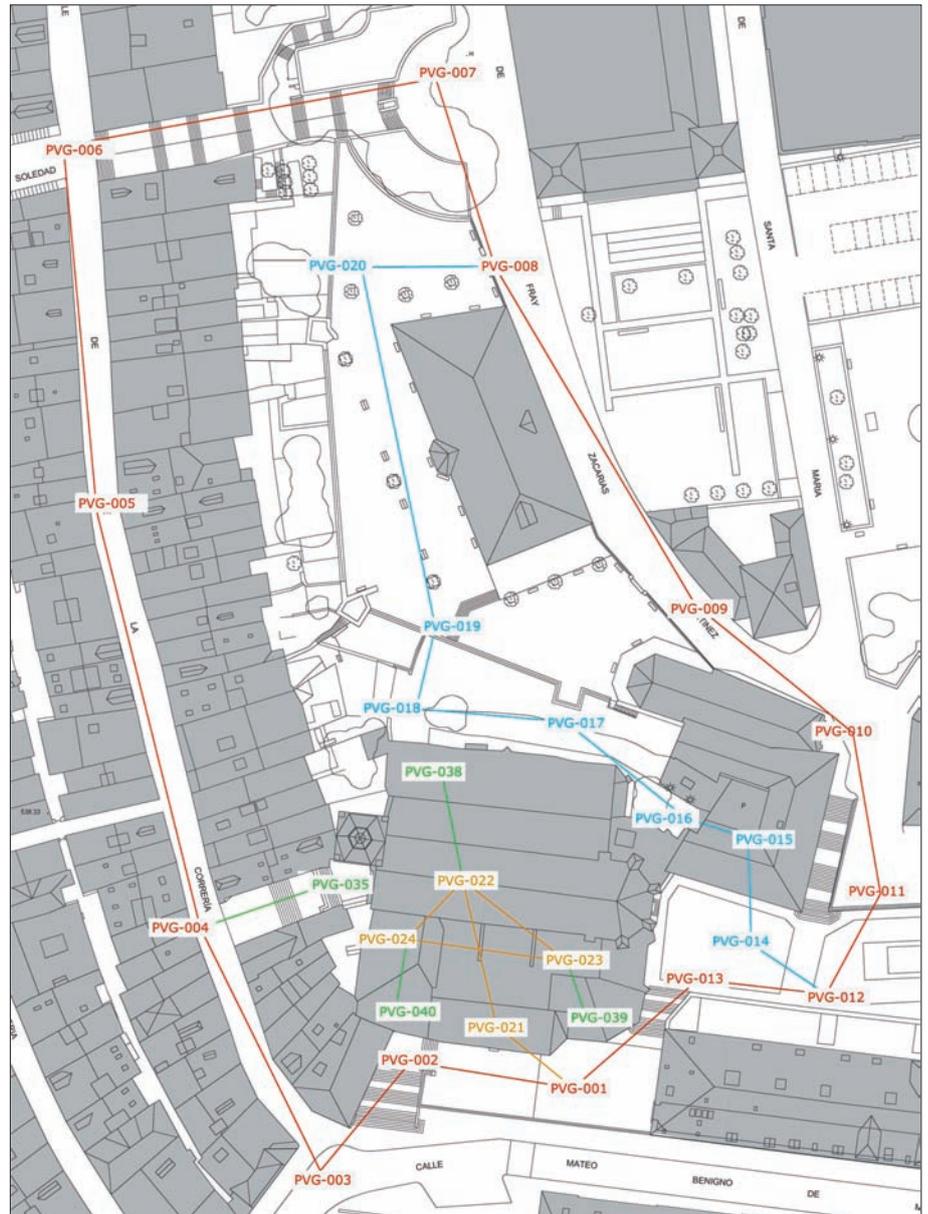


Fig. 9. Distribución de la red de bases topográficas

FARO LS880, un instrumento de medio alcance (hasta 76 metros), medida de distancias por comparación de fase, campo de visión de 360° horizontal y 320° vertical, una velocidad de escaneo de 120.000 puntos por segundo, y una precisión en distancias de 4,2 mm¹¹ y 100^{cc} de apreciación angular. Para el apoyo de las referencias y la observación de la red de bases, la estación total empleada fue una TOP-

¹¹ El dato de la precisión depende de la distancia de medición y el nivel de reflectividad del objeto medido y se debe expresar acompañado de éstos parámetros: 4,2 mm a 25 m para una reflectividad del 90%. Hay que tener en cuenta que estos valores se miden sobre objetos (dianas, esferas o planos) diseñados para tal efecto, en laboratorios donde no interfieren las condiciones ambientales. Los fabricantes no ofrecen informaciones exactas acerca de las condiciones de observación en las que han obtenido las precisiones que señalan.

CON GPT-3005N, de 15^{cc} de apreciación y una precisión en distancia de 3 mm ± 2 ppm. Asimismo, hay que decir que el software que emplearíamos para el procesado de nubes nos lo proporcionó el propio fabricante del escáner, nos referimos al programa FARO SCENE v.4.6.58.2.

6.3. Sistema topográfico de referencia

Como ya indicamos, la habitual complejidad y compartimentación de los edificios analizados suele requerir un número variable de estacionamientos del escáner; esto era evidentemente el caso de San Miguel. Por ello, tuvimos que confeccionar una red de puntos comunes que permitiesen relacionar —con toda precisión— los distintos posicionamientos; estos puntos comunes debían medirse

en un único sistema de referencia que englobase todo el ámbito de acción del proyecto.

Asimismo, ciertas exigencias del estudio establecían que el registro geométrico del templo debía estar bien referenciado con respecto al resto del casco histórico de Vitoria, razón por la cual se adoptó el sistema de coordenadas de la cartografía oficial del municipio —ED50 en coordenadas UTM¹²—. Tomando en cuenta estos condicionantes, se diseñó una compleja red de bases articulada en una poligonal principal que rodeaba la manzana de la iglesia y que se apoyaba en vértices de la RURT (Red Urbana de Referencias Topográficas del Ayuntamiento de Vitoria-Gasteiz); de esa poligonal principal colgarían además otras dos poligonales encuadradas. Desde estos vértices se radiaron varias bases destacadas —necesarias para acceder a algunas de las capillas de la iglesia—, así como la posición de las dianas que sirvieron finalmente de apoyo para la unión de los escaneos (ver fig. 9).

6.4. Toma de datos en campo

Así pues, ya conocíamos el edificio y disponíamos del material preciso; estábamos preparados para iniciar con las labores de documentación propiamente dichas. No obstante, aún quedaban por adoptar algunas decisiones importantes.

6.4.1. Resolución de la captura

Decidimos trabajar con una cuarta parte de la resolución máxima, que era por así decir el tercer nivel de detalle que ofrecía el instrumento (por encima sólo quedaban 1/2 y 1/1 de resolución). Esta era la mejor opción poniendo en la balanza, por un lado, el tiempo requerido para cada escaneo y, por otro lado, el mínimo detalle que deseábamos alcanzar. Con todo, trabajar a 1/4 no suponía una merma sustancial en el detalle del registro, ya que la separación entre puntos medidos a 25 m de distancia (máximo alejamiento al que se ha empleado el escáner) no sería superior a 12 mm.

6.4.2. Planificación de los estacionamientos

Para nuestro experimento en San Miguel, la planificación de los estacionamientos se hizo teniendo en cuenta tres factores: la visibilidad (evitar zonas en sombra), la geometría

de la toma y el alejamiento máximo de 25 m que nos marcaba el límite de precisión del escáner¹³ (ver fig. 10).

En lo que respecta a la geometría de las tomas fue difícil mantener una distancia regular entre puntos, los ángulos oblicuos eran inevitables al escanear las partes altas desde el nivel del suelo (al exterior este problema fue aún más notable). Tampoco fue posible registrar, en un rango de distancias inferior a los 25 m, la totalidad de las fachadas exteriores.

6.4.3. Captura de las nubes de puntos

Realizamos un total de 90 escaneos, lo que equivale aproximadamente al registro del 80% del edificio. Como ya se ha dicho, la unificación de todos ellos requirió el establecimiento de un sistema común de referencias. Sólo de este modo lograríamos un modelo integral del conjunto (ver fig. 11).

Teóricamente era suficiente con que cada captura compartiera tres referencias, pero si deseábamos situarlas en su posición real, tres de ellas debían tener coordenadas conocidas en el sistema global. En la experiencia de San Miguel empleamos dos tipos de señales; un conjunto de esferas de 14,5 cm de diámetro, fabricadas en un material blanco muy reflectivo, y una serie de dianas de cartón pluma con cuadros alternos b/n. El software que íbamos a emplear en el postproceso detecta ambos tipos automáticamente (las esferas de forma más precisa, con la contrapartida de que —al contrario que las dianas— no podemos medir sus coordenadas mediante estación total). Contamos con un total de 10 esferas y otras tantas dianas que distribuimos por toda la zona de trabajo, en modo de garantizar una media de 6 esferas comunes entre escaneos y un mínimo de 4 dianas para referenciarlas con el sistema global¹⁴.

6.5. Depurado automático

En cuanto al filtrado de las nubes, una vez analizado el funcionamiento de cada algoritmo, decidimos aplicar tres de los cuatro disponibles¹⁵. En primer término, el filtro para *puntos dispersos* resultó realmente efectivo para eliminar los puntos reflejados en el aire y los puntos erróneos originados en los bordes de los objetos. En segundo término, el *filtro de suavizado* lo aplicamos después de hacer varias pruebas para asegurarnos de que no se eliminasen rasgos o irregularidades importantes. Finalmente, mediante el

¹² Pese al actual cambio de *datum* (de ED50 a ETRS89), optamos por continuar trabajando con el antiguo por la necesidad de compatibilizar la nueva información gráfica con la generada en la fase anterior.

¹³ El escáner utilizado alcanza su máximo rendimiento a los 25 m, aunque mide distancias hasta su máximo alcance (unos 100 m). En el depurado posterior eliminaríamos los puntos medidos fuera de ese rango considerando que pueden tener errores mayores de los indicados en las especificaciones del instrumento.

¹⁴ Todas las referencias nos sirven como punto de control relativos, para unir escaneos entre sí, pero solamente las dianas nos servirán para transformar los escaneos al sistema de coordenadas topográfico.

¹⁵ Desactivamos la opción de filtrado que el software trae configurada por defecto, por desconocer los parámetros exactos en función de los cuáles se iban a modificar o eliminar puntos —el manual del programa no lo especifica.

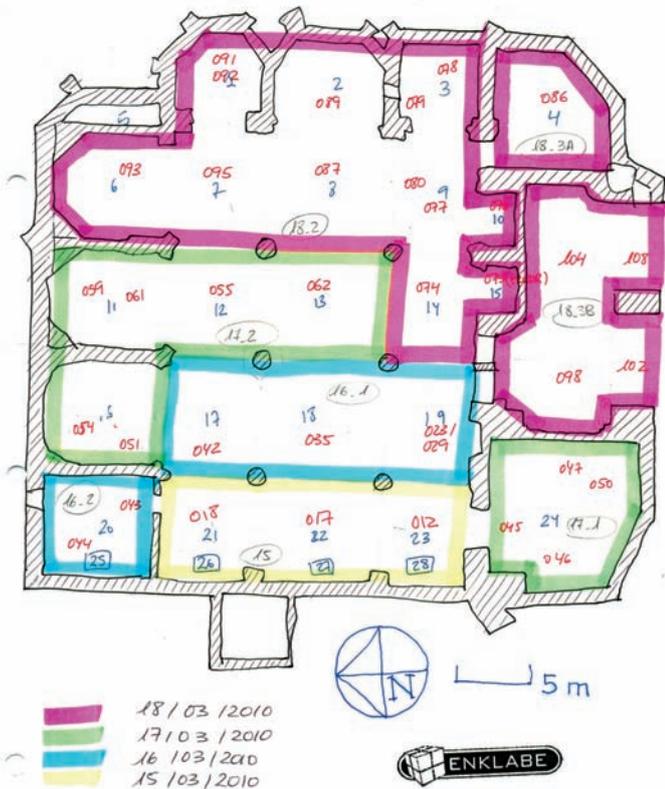


Fig. 10. Croquis de campo con la distribución de los escaneos del interior

filtro de distancia, eliminamos todos los puntos que quedaban a una distancia mayor de los 21 m.

6.6. Georreferenciación

Inicialmente cada uno de los escaneos estaba referido a un sistema de coordenadas diferente, el sistema de coordenadas escáner (de origen en el instrumento y orientación aleatoria). En esta fase del cálculo los puntos estaban afectados únicamente por el error del equipo, que hemos estimado en un valor ± 6 mm. A continuación, procedimos según los siguientes pasos (ver fig. 12):

1. *Detección automática de puntos de referencia (esferas) y puntos de control (dianas)*. En esta fase, el algoritmo de detección de esferas buscaba automáticamente grupos de puntos que se ajustaran a la superficie de una esfera de radio determinado. Las dianas de tablero cuadrado por su parte se detectaron gracias al contraste entre los cuadros negros y el fondo blanco (la calidad del ajuste de las referencias —que en San Miguel no ha superado los 2,5 mm—, afecta directamente a los resultados de la unión de escaneos).

2. *Unión de los escaneos con referencias comunes*. El programa buscaba ahora las correspondencias entre las distintas constelaciones de referencias para, una vez detec-

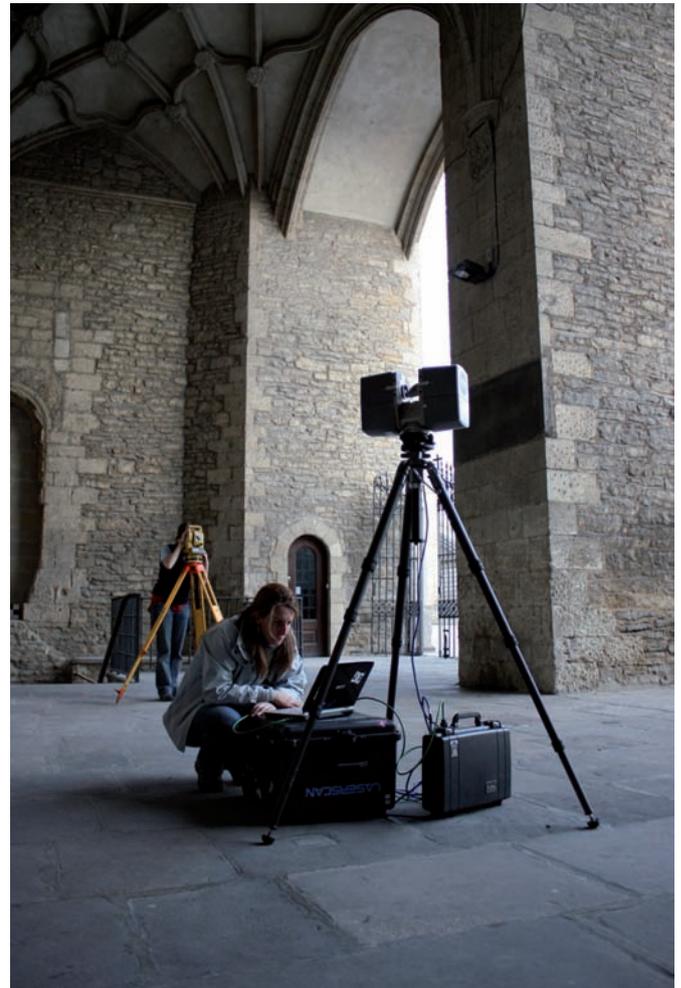


Fig. 11. Escaneado y observación de las referencias con estación total en el pórtico de San Miguel

tadas, calcular los parámetros de transformación de cada escaneo (3 traslaciones y 3 rotaciones). En este paso, el error promedio de cada transformación se encontraba por debajo de los 4 mm. Desde este momento todos los barridos estarían en el mismo sistema relativo, formarían un modelo único. No obstante, en esta fase del cálculo, a los errores de medida del escáner se habían sumado los errores en los cálculos de la transformación.

3. *Asignación de coordenadas a las señales de referencia*. La última fase para que este modelo coincidiera con el sistema de coordenadas de trabajo, consistió en asignar las coordenadas UTM-ED50 a los puntos de control (las dianas) que habríamos obtenido mediante topografía. Se volvieron a calcular las transformaciones, fijando esta vez las coordenadas topográficas girando y desplazando respecto a ellas todos los escaneos. Es necesario observar cómo los errores más elevados se dan sistemáticamente en las parejas que relacionan las posiciones de las dianas en cada escaneo

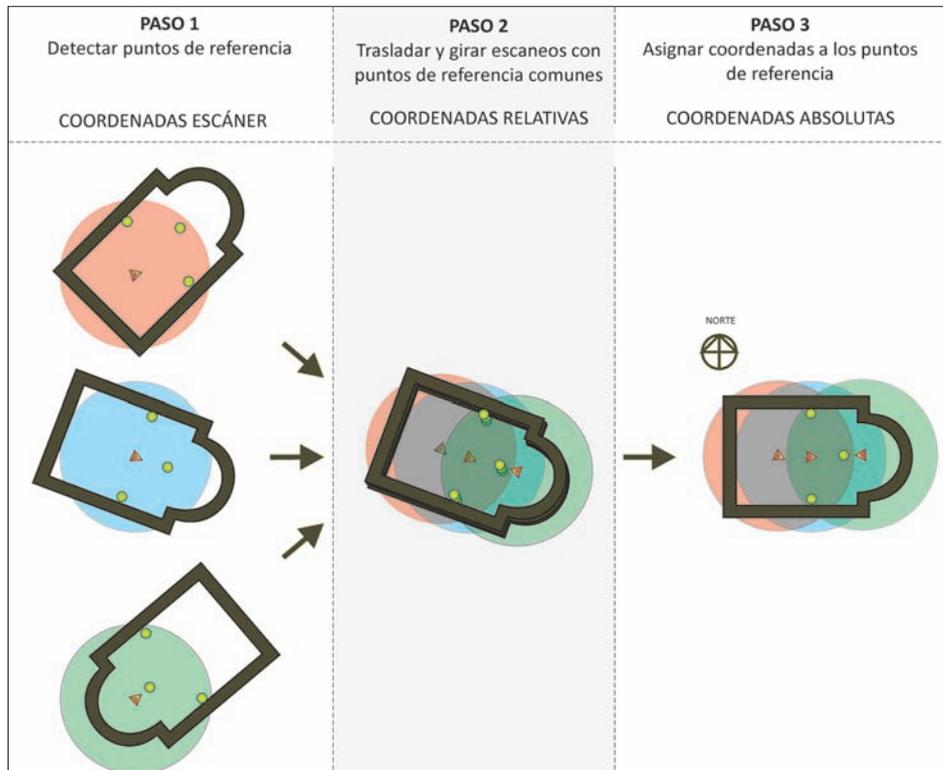


Fig. 12. Diagrama sintético del proceso de georreferenciación y unión de escaneos, aplicado a un edificio hipotético

y sus coordenadas absolutas (estos errores se sitúan entre los 10 y 17 mm aunque alguna vez han llegado a alcanzar los 20 mm). Esto es una consecuencia lógica, ya que en la medida que introducimos una observación más en el proceso, añadimos también el error inherente a la misma (ver fig. 13).

6.7. De la disección del modelo al análisis cronotipológico

La siguiente fase de trabajo consistió en la disección sistemática del modelo producto de la georreferenciación, como paso previo al análisis configuracional. Debíamos empezar seccionando aquellas partes del modelo de nube de puntos «cuya forma general, claramente visible a pesar de encontrarse revestida, es determinante para su cronología» (Mannoni, 1998: 83), elaboramos en consecuencia un listado exhaustivo con aquellos sujetos arquitectónicos que entendíamos susceptibles de análisis a partir de la nube de puntos (ver paso 1, fig. 14) y diseccionamos exhaustivamente bóvedas, arcos, nervaduras, claves, pilares o pilastras (horizontalmente a distintas alturas, y en diversos planos verticales o inclinados). Diseccionamos asimismo el edificio en planta —también a distintas alturas— con el fin de observar cambios de plano u orientación de los muros.

6.7.1. Definiendo una base de conocimientos

Aunque sólo fuera un tímido ensayo, intentar poner las bases de un hipotético SE significaba de algún modo enseñar *a ver* a la herramienta informática, y si bien el escáner podía hacer las veces del ojo humano, en la medida en que *ver* no consiste sólo en percibir, debíamos tratar de establecer ciertas reglas de razonamiento lógico del tipo SI (condición/condiciones) ENTONCES (consecuencia), que nos sirvieran en un futuro como pauta de programación del *motor de inferencias*.

El objetivo de nuestro experimento en San Miguel no consistiría por lo tanto en el desarrollo de un SE en toda su complejidad, sino sólo en esbozar un borrador de árbol de reglas, lo que en el campo de la inteligencia artificial se conoce como *base de conocimientos*, que es sobre la que opera el susodicho *motor de inferencias* (Maicas, 1989: 75). Tal *base de conocimientos* debía surgir de los propios principios del análisis configuracional y cronotipológico aplicados al edificio.

6.7.2. Individualización de variables y variables diagnósticas

Aunque en el contexto del hipotético SE esto no sería necesario, procedimos a plasmar el repertorio planimétrico en soporte papel, con el fin de simular las condiciones

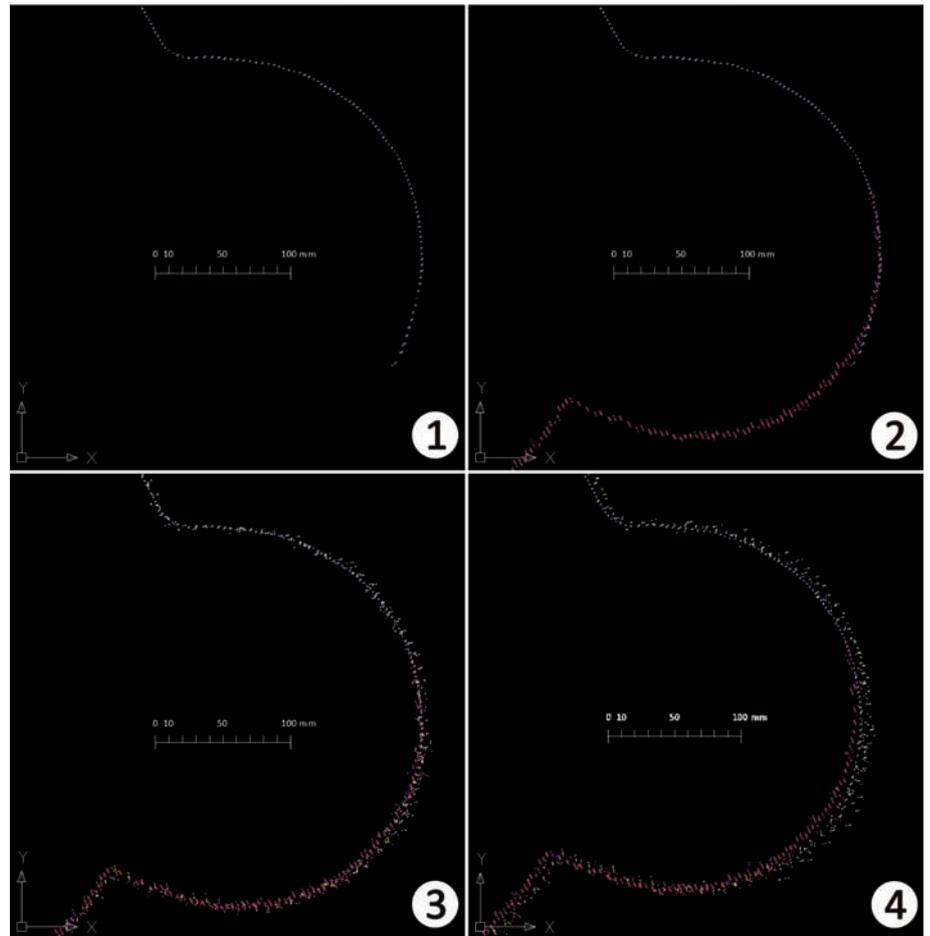


Fig. 13. Acumulación de errores en el proceso de la georreferenciación. La imagen muestra el detalle de la sección del modelo en las distintas fases del procesado. 1) un solo escaneo, 2) dos escaneos unidos mediante referencias relativas (esferas), 3) doce escaneos unidos mediante referencias relativas (sólo esferas), 4) doce escaneos unidos mediante referencias globales (asignando coordenadas topográficas a las dianas)

en que trabajaría la herramienta informática y proporcionar el juego de planos a un arqueólogo que no conocía el edificio y que debía trabajar sólo sobre la información gráfica que le era facilitada; ese conjunto de planos incorporaba visualizaciones seriadas y en ocasiones superpuestas de las distintas secciones con la intención de simplificar la labor de análisis (ver fig. 15).

Se intentó que el operador humano procediera del modo más sistemático posible en base a la comparación de patrones formales; así, la localización de una anomalía en cualquier serie conllevaba la individualización de una nueva variable, la cual era identificada con el número correspondiente; de este modo fueron generadas poco más de cuarenta variables descriptivas de otros tantos patrones de geometría.

Debemos reconocer sin embargo que la utilidad de la mayoría de esas variables fue moderada con respecto a la inversión de trabajo que requiso el procesado de las nubes de puntos y la elaboración del repertorio planimétrico. Sin embargo, tal circunstancia se vio ampliamente compensada por el alto valor diagnóstico que demostraron doce de

ellas, las cuales sirvieron para conformar ocho *clusters cronotipológicos*¹⁶ significativos; estas variables derivaban en su mayoría del seccionamiento de basas y capiteles, del análisis de la geometría de bóvedas y de la orientación de paramentos (ver paso 2, fig. 14).

6.7.3. Definición de clusters formales

Como es lógico, al operador humano se le proporcionó la localización topográfica de cada una de las secciones y sujetos arquitectónicos analizados, implementado en un sencillo Sistema de Información Geográfica articulado en base a la planta del templo. De este modo el arqueólogo podría automatizar la georreferenciación de las distintas variables individualizadas (ver paso 3, fig. 14).

El análisis de la distribución espacial de variables permitió a dicho operador la definición de ocho sencillos

¹⁶ Los *clusters* cronotipológicos son agrupaciones o combinaciones de variables —en nuestro caso sólo formales— que denotan la presencia de un patrón constructivo que a su vez «permite descubrir fases del edificio constructivamente homogéneas» (Azkarate, 2002:69).

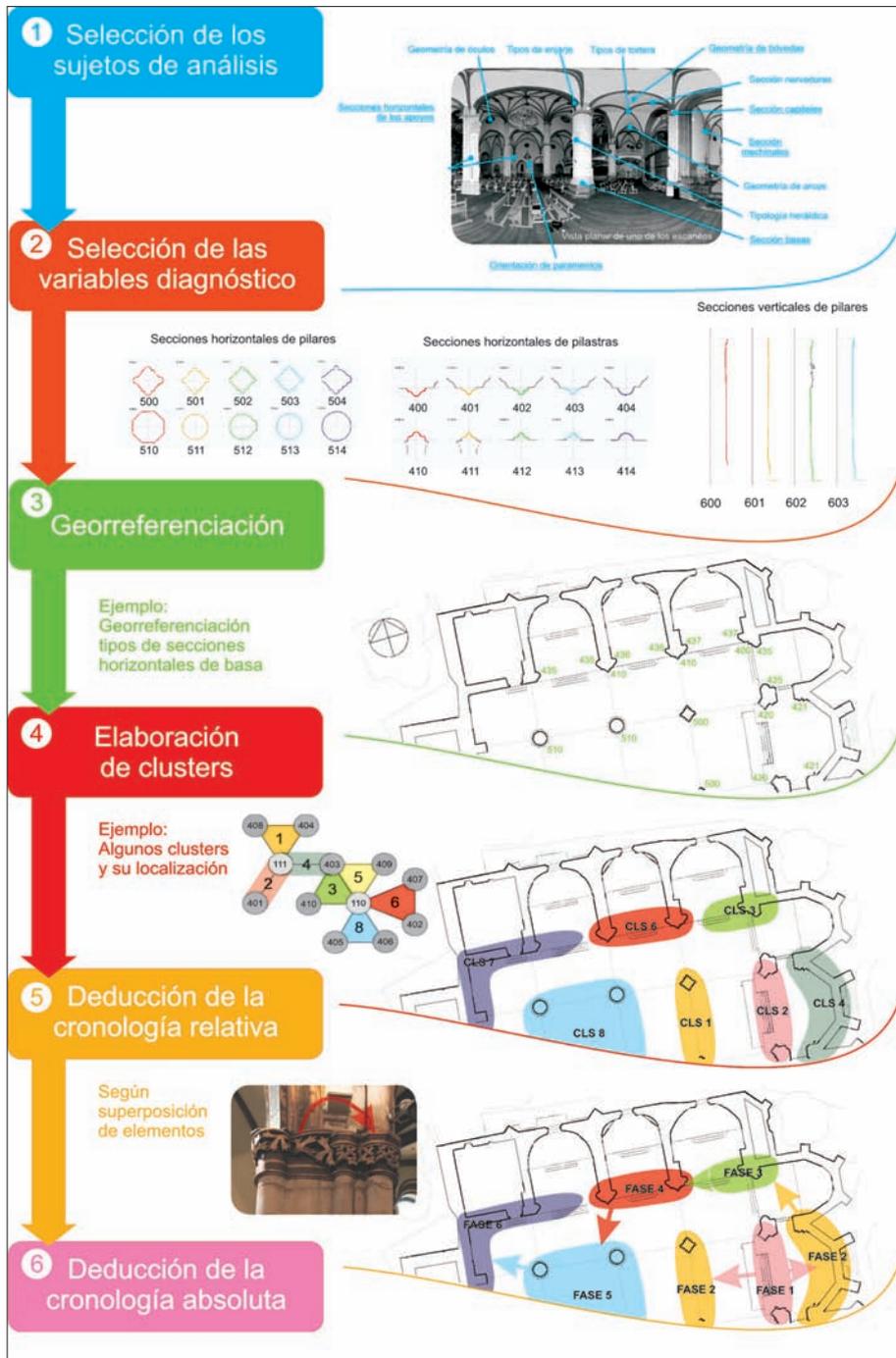


Fig. 14. Diagrama sintético del proceso de análisis cronotipológico

pero significativos *clusters* de dos y tres variables. Dichos *clusters* podían relacionarse en función de ciertas variables comunes que actuaban como bisagra entre agrupaciones, todo lo cual prefiguraba una cadena lógica de hechos constructivos bastante coherente (ver paso 4, fig. 14).

6.7.4. Definición de la secuencia cronológica

Aunque como decimos en lo que se refiere a la lógica del proceso constructivo, la cadena anteriormente citada pre-

sentara una gran coherencia, tenía sin embargo el problema del sentido de lectura. Leer la cadena como —por ejemplo— A-B-C-D, o en sentido contrario, como D-C-B-A, implicaba decir que la construcción del templo evolucionó de la cabecera hacia los pies, o justo al contrario. Para dar con una solución al problema, fue inevitable volver al edificio y controlar visualmente puntos donde los *clusters* definidos podían entrar en contacto; era preciso localizar posibles relaciones topológicas que denotaran una relación cro-

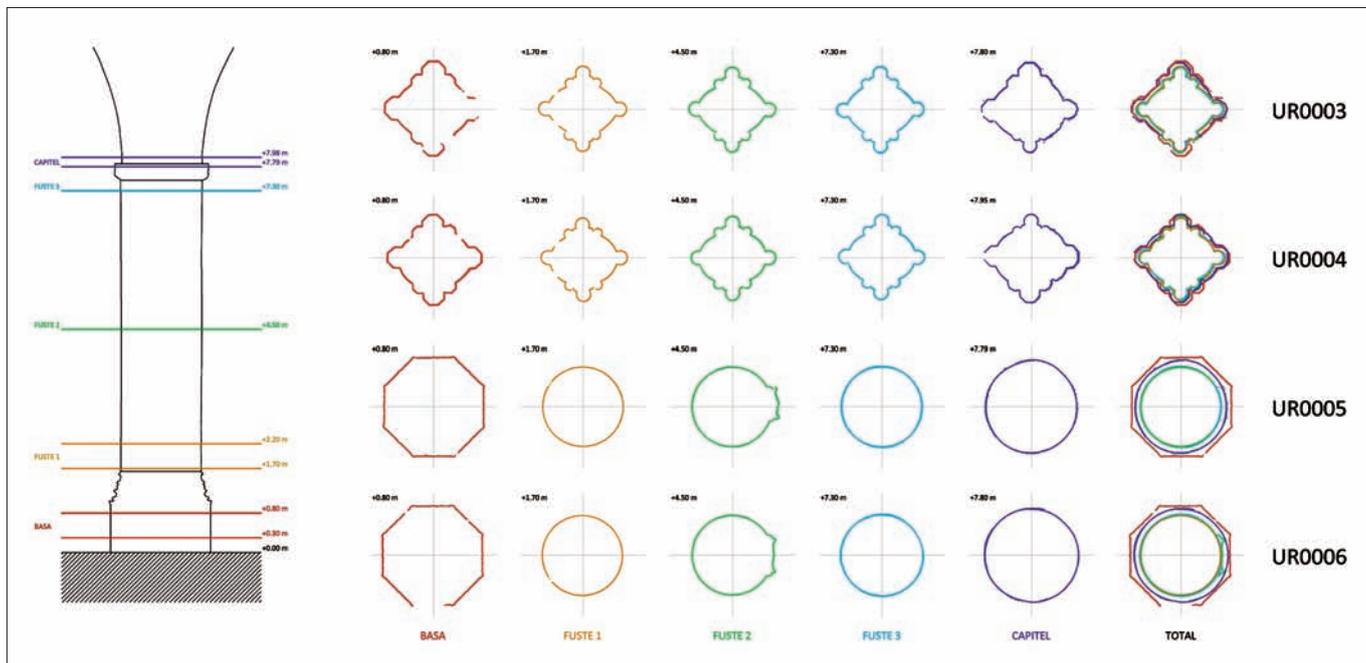


Fig. 15. Series de secciones a distintas alturas de los pilares de la nave central

nológica de antero-posterioridad. El examen arrojó datos que sirvieron efectivamente para dar sentido a la cadena lógica, poniendo de relieve que —además de la capacidad de discriminar patrones formales a partir de las secciones de nubes de puntos— el *motor de inferencias* del hipotético SE debía prever la entrada de datos topológicos que permitirían determinar la dirección de la flecha del tiempo en la concatenación de hechos constructivos deducida directamente de las propias variables (ver paso 5, fig. 14).

Finalmente, en lo que se refiere a la deducción de la secuencia cronológica absoluta, la ausencia de documentación escrita que aportase datos fiables sobre el proceso de construcción de San Miguel, nos obligó —al menos provisionalmente— a tomar como referencia las dataciones basadas en la heráldica de las claves de bóveda (Ugalde, 2007: 449-454).

7. CONCLUSIONES

El láser escáner empieza a consolidarse como una alternativa muy a tener en cuenta conjuntamente con otras técnicas de documentación del patrimonio como la fotogrametría. Ahora bien, en cuanto a su potencialidad como herramienta de análisis arqueológico —y no sólo como soporte gráfico—, creemos que el láser escáner tiene probablemente un mayor margen de crecimiento, sobre todo en la perspectiva de sistemas expertos (un poco como está sucediendo con la fotogrametría aérea y el LiDAR).



Fig. 16. Demostración del nuevo FARO FOCUS3D realizada en la Catedral de Santa María de Vitoria-Gasteiz. Obsérvense las reducidas dimensiones del equipo

El láser escáner es un instrumento que estamos empezando a conocer, una técnica que apenas se encuentra en sus primeros balbuceos —como hace tres décadas sucedía con la fotogrametría (Almagro, 2008: 58)—. Aún son muchos los aspectos que mejorar, muchos los detalles que pulir, pero los avances empiezan a ser significativos y los arqueólogos no podemos esperar a que la técnica alcance su cénit; debemos acompañar su evolución para poder aprovecharla al máximo cuando esa madurez llegue. La tecnología debe estar a la altura de nuestra metodología, pero también —a la inversa— nuestra metodología arqueológica debe estar a la altura de la tecnología.

Los altos costes y la falta de autonomía ya no son una excusa. La posibilidad de alquilar el instrumental ofrece flexibilidad para poder utilizar en cada caso el escáner que —por prestaciones— se considere más adecuado para un proyecto (con una buena planificación de los escaneos esta opción puede ser ciertamente económica). En la actualidad, existen además equipos con las mejores prestaciones disponibles por precios que empiezan a ser realmente asequibles, como por ejemplo el FARO FOCUS 3D (ver fig. 16). Éste último modelo es el que de algún modo marca la tendencia de lo que vendrá, equipos compactos de reducidas dimensiones —de menos de 5 Kg de peso— que funcionan con baterías fácilmente transportables.

En fin, a lo largo de casi una década, aquellos que suscribimos el presente artículo tuvimos la oportunidad de trabajar con técnicas fotogramétricas en el proyecto de la Catedral de Santa María de Vitoria-Gasteiz, y no dudamos en ningún momento de las virtudes de tal método de registro. Sin embargo, a nuestro juicio a la hora del análisis arqueológico sus limitaciones son bastantes con respecto a las posibilidades que nos brinda el láser escáner, y aunque estas aún están en gran medida por desarrollar, pensamos que merece la pena empezar a experimentar. Nuestro ensayo en San Miguel parte del ejemplo de Santa María; empleamos un instrumental diverso, pero los objetivos y la base metodológica siguen siendo los mismos. Creemos que los importantes resultados alcanzados en la catedral con la aplicación del método cronotopológico pueden repetirse en San Miguel, pero esto requerirá un tiempo; requerirá volver a realizar nuevos escaneos sistemáticos y requerirá dar nuevos pasos en la creación de un sencillo prototipo de sistema experto.

Bibliografía

- Almagro, A., 2008, La puerta califal del Castillo de Gormaz, *Arqueología de la Arquitectura*, 5, pp. 55-77.
- Almagro, A., 2010, Veintidós años de experiencia de fotogrametría arquitectónica en la Escuela de Estudios Árabes, CSIC. *Jornadas sobre Documentación Gráfica del Patrimonio Histórico. Presente y Futuro*, pp. 26-45.
- Azkarate, A., 2002, Intereses cognoscitivos y praxis social en la arqueología de la arquitectura. *Arqueología de la Arquitectura*, nº1, pp. 55-71.
- Binford, L.R., 1998, En busca del pasado, Barcelona.
- Borhler, W. y Marbs, A., 2003, Investigating laser scanner accuracy. *XIXth Symposium, Antalya*.
- Brogio, G.P., 1988, Archeologia dell'edilizia storica. Como.
- Bryan, P.; Bedford, J., 2009, Metric survey specifications for Cultural Heritage, *English Heritage*.
- Carandini, A., 1996, Storie dalla terra. Manuale di scavo archeologico, Turin.
- Cattani, M.; Fiorini, A., 2004, Topologia: Identificazione, significato e valenza nella ricerca archeologica. *Archeologia e Calcolatori*, nº15, pp.317-340
- Chuvieco, E., 2002, Teledetección ambiental. La observación de la Tierra desde el espacio, Barcelona.
- Dietz, C.; Catanzariti, G.; De la Presa, P. y Jimeno, A., 2010, Técnicas no invasivas para el registro del patrimonio arqueológico, *Jornadas sobre Documentación Gráfica del Patrimonio Histórico. Presente y Futuro*, pp. 118-129.
- Doneus, M.; Neubauer, W., 2005, 3D laser scanner on archaeological excavations. *CIPA XX International Symposium*, Turin.
- Farjas, M.; García, F. J.; Zancajo, J.; Mostaza, T., 2010, Cartografía en patrimonio: la métrica en la documentación. ¿Una realidad pendiente? *Jornadas sobre Documentación Gráfica del Patrimonio Histórico. Presente y Futuro*, pp.80-89.
- Franco García, A., 2011, Curso Interactivo de Física en Internet. www.sc.edu.es/sbweb/fisica/ [fecha de consulta: septiembre 2011]
- Gabbriellini, F., 1998, La Chiesa dell'abbazia di San Galgano. I. Stereonomia degli archi e fasi costruttive, *Archeologia dell' Architettura*, 5, pp. 15-44.
- Gombrich, E. H., 2004, El sentido del orden, Londres.
- Harris, E. C., 1991, Principios de estratigrafía arqueológica, Barcelona.
- Lerma, J. L.; Biosca, J. M., 2008, Teoría y práctica del escaneado láser terrestre.
- Maicas, R., 1989, Ejemplos de aplicación de Inteligencia Artificial en Arqueología, *CuPAUAM* 16, pp. 73-80.
- Mannoni, T., 1998, Analisi archeologiche degli edifici con strutture portanti non visibili, *Archeologia dell' Architettura*, pp.81-85
- Mañana, P.; Rodríguez, A.; Blanco, R., 2008, Una experiencia en la aplicación del láser escáner a los procesos de documentación y análisis del Patrimonio Construido: su aplicación a Santa Eulalia de Bóveda (Lugo) y San Fiz de Solovio (Santiago de Compostela), *Arqueología de la Arquitectura*, 5, pp. 15-32.
- Martínez, A., 2010, La evolución de la documentación geométrica del patrimonio en un estudio privado. La importancia del dibujo. *Jornadas sobre Documentación Gráfica del Patrimonio Histórico. Presente y Futuro*, pp. 64-79.
- Núñez, A.; Andrés, M. A.; Buill, F.; Muñoz, F., 2005, Comportamiento de un sensor láser escáner. *VI Semana Geomática, Barcelona*.
- Sevilla, M. J., 1993, Teoría de errores de observación. *Física de la Tierra*, nº5, pp. 133-166.
- Szocs, K.; Kibedy, Z. M.; Barsi, A., 2011, Documentation of roman excavations by laser scanning.
- Tylor, R., 2006, Los constructores romanos. Un estudio sobre el proceso arquitectónico, Madrid.
- Ugalde, A. I., 2007, Una mirada al cielo. Iconografía de las claves de bóveda de la Diócesis de Vitoria, Vitoria-Gasteiz.

Recibido: 28 de septiembre de 2011

Aceptado: 6 de noviembre de 2011