



TÉCNICAS DE CAPTURA MASIVA DE DATOS PARA EL LEVANTAMIENTO Y MODELADO DE MONUMENTOS MEDIEVALES

MASIVE DATA CAPTURE TECHNIQUES TO MODEL MEDIEVAL MONUMENTS

Felipe Buill Pozuelo, M^a Amparo Núñez Andrés, Joaquín Regot Marimón

doi: 10.4995/ega.2013.1525

Antes de comenzar un proyecto de rehabilitación de un monumento tiene que estar disponible su información. Actualmente, existen diferentes técnicas que permiten obtener datos 3D con un nivel de precisión alto y con tiempos de ejecución realmente optimizados. Este artículo muestra el trabajo llevado a cabo para generar la información gráfica más completa posible (alzados, planta, secciones y modelos 3D) para el proyecto de rehabilitación de la tumba de la reina Elisenda en el Monasterio de Pedralbes, Barcelona (España). Para ello se han utilizado diferentes técnicas de captura de datos espaciales (láser de barrido, fotogrametría y topografía). Estos datos permitirán el análisis y posible planteamiento del proceso de reconstrucción del monumento. Así mismo se plantea la comparación entre los resultados obtenidos para los modelos de los elementos empleando fotogrametría digital e instrumentos láser escáner.

Palabras clave: Patrimonio cultural, Fotogrametría digital, Láser escáner, Modelado

Before starting a rehabilitation project for a monument the graphic information about it has to be available. Nowadays, different techniques allow us to obtain three-dimensional models with a different accuracy level and runtimes.

This paper shows the work carried out to generate the graphic information as complete as possible (vertical and horizontal maps, sections and 3D models) for the rehabilitation of the tomb of Queen Elisenda in the Pedralbes Monastery, Barcelona (Spain). Laser scanning, photogrammetry and topography have been used for the data capture. That data will allow the analysis of the monument construction process.

The models from photogrammetry and laser scanning will be compared.

Keywords: Cultural Heritage, Digital Photogrammetry, Laser Scanning, Modelling



Introducción

Actualmente existen muchas técnicas para obtener documentación métrica precisa de elementos del patrimonio cultural. Esta información es esencial para realizar proyectos de rehabilitación.

Entre las técnicas más utilizadas encontramos la fotogrametría digital y el láser escáner terrestre (TLS, Terrestrial Laser Scanner), en ambos casos con el apoyo de la topografía. Varios autores (Demir et al., 2004; Yastikli, 2007) muestran que la integración de ambas proporciona las mejores soluciones para obtener información tridimensional del patrimonio.

Ambos métodos comparten los mismos problemas por lo que se refiere a la oclusión, precisión geométrica, tamaño de los modelos obtenidos (que dificultan su gestión), extracción de líneas características, etc (Demir et al., 2004). La estereofotogrametría de objeto cercano se ha utilizado ampliamente para la obtención de modelos 3D de elementos a partir de fotografías (Remondino y El-Hakim, 2006; Yilmaz et al., 2007), ya que permite recoger tanto los datos geométricos como información de textura y color. En aquellos casos en los que la superficie del objeto puede considerarse plana es suficiente una rectificación de la imagen para obtener la documentación métrica. Pero cuando trabajamos con un objeto volumétrico, es necesario realizar una restitución que permita la vectorización 3D y la obtención del modelo digital de superficie (MDS) a través de un proceso semiautomático o automático (Yastikli, 2007) por correlación de imágenes (Schenk, 1999). Uno de los subproductos de este proceso es la ortofotografía, obtenida después de la eliminación de

los efectos de las distorsiones de lente, la inclinación y el desplazamiento debido al relieve, para lo que es necesario disponer del MDS además de los parámetros de la cámara.

El láser escáner terrestre es una buena alternativa o complemento a la fotogrametría. En este caso, el objeto es barrido con un rayo láser siguiendo las posiciones de una rejilla de resolución definida por el usuario obteniéndose las coordenadas 3D (XYZ en el sistema de coordenadas del sensor) de todos los nodos de esa rejilla (Bradshaw, 1999; Pavlidis et al., 2007). Se pueden encontrar tres sistemas distintos de medida:

- Tiempo de vuelo (*ToF*), consiste en medir la distancia a través del tiempo que tarda un fotodiodo en emitir y detectar el rayo láser retornado después de reflejar en el objeto. La precisión en la posición de cada punto ronda 5mm para distancias de 50m.
- Diferencia de fase, la distancia se calcula a partir de la diferencia de fase entre la onda transmitida y recibida. Permite una precisión de pocos milímetros hasta un alcance de 100m.
- Triangulación óptica, se basa en el cálculo de las coordenadas de la intersección directa. En este caso la distancia de trabajo a los objetos se reduce considerablemente, pero mejora la precisión a unos pocos micrómetros. Este sistema se basa en los mismos principios que la fotogrametría.

A cada uno de los puntos se le puede dar color mediante la proyección de las coordenadas geométricas sobre una imagen en color capturada por lo general por una cámara conectada al escáner, siguiendo el modelo de

Introduction

Today there are many techniques to obtain precise documentation of cultural heritage elements. This kind of information is essential to carry out the studies and projects of renovation and restoration.

Among these techniques the most widely used are digital photogrammetry and laser scanning, both of them supported by topography. Several authors (Demir et al., 2004; Yastikli, 2007) show the integration of both like a powerful solution, at the present time, to collect three-dimensional information of cultural heritage.

These methods share the drawbacks such as problems regards the occlusions, geometric accuracy, size of the models obtained (that make difficult their management), characteristic lines extraction, etc. (Demir et al., 2004).

Close Range Stereophotogrammetry has been extensively used for obtaining 3D models of elements from photographs (Remondino and El-Hakim, 2006; Yilmaz et al., 2007), since it allows to collect geometrical data as well as texture and colour information.

When the cultural heritage object surface can be considered as a plane, a digital image rectification is enough to obtain metric documentation of it. But when complex objects are present in the captured scene, it is necessary apply stereophotogrammetry that allows 3D vectorization and to get a digital surface model (DSM). The generation of this kind of data can be developed with a semi-automatic or automatic process (Yastikli, 2007) based on image correlation (Schenk, 1999).

One of the products derived of this process is the orthophotography, obtained after removing the effects of lens distortions, tilt and relief displacement with the help of the digital surface model and the camera parameters.

The laser scanner is a good alternative or complement to photogrammetry. In this case, the object is scanned by a laser beam with a resolution defined by the user getting the 3D coordinates of a grid (Bradshaw, 1999; Pavlidis et al., 2007). Three different measure systems can be found:

- Time of flight (*ToF*). It allows obtaining the location of points into space with an accuracy closed to 5 mm for distances of 50 m.
- Difference of phase. It allows an accuracy of few millimetres for range up to 100m.



- Optical triangulation. In this case the working distance reduces considerably but it improves the accuracy, until few micrometers can be achieved.

Each point can be colouring by projecting its coordinates onto a colour imaging. This image is captured usually by a camera attached to the scanner, following the perspective projection model. The final result is a geometric model, with colour and texture information, highly useful in the cataloguing, diffusion, preservation, restoration of cultural heritage (Yastikli, 2007).

Queen Elisenda's tomb

The tomb of Elisenda de Montcada, in the Monastery of Pedralbes, is one of the most important funerary monuments of Medieval Catalonia. Despite its significance, historiography has proven unable to determine its author, or to attribute it to any of the well-known masters of the period. Therefore, it is a very well designed and executed work of art that remains undocumented. The only verified data is the date of its construction work, 1364, because, shortly before her death, Queen Elisenda expressed her will to be buried in the main altar (Mestre and Adell 2001).

One of the most particular characteristics of Queen Elisenda's tomb is the fact that consists of two perfectly symmetrical constructions that lean on the same wall. The former is located within the church, and the latter makes up a little space in one of the sides of the cloister. The monument inside the church represents Elisenda as a queen, crowned and wearing the royal shroud, while in cloister monument, she's wearing the Franciscan habit.

Throughout time the monument has undergone several pictorial interventions. In the beginning of the 20th century, the part of the monument located in the church suffered an unfortunate renovation following the neo-medieval style. The intervention destroyed the background gothic mural until then preserved. Despite this, it shows a good state of conservation.

On the other hand, in the cloister, the monument keeps its original features, probably because, until recent days, its access was restricted only to the nuns that lived in the convent. The stony structure of this part has been weathered, not only the sculptures but also the gothic tracery, since it is located outdoors.

proyección en perspectiva. El resultado final es un modelo geométrico, con información de color y textura, muy útil en la catalogación, difusión, conservación y restauración del patrimonio cultural (Yastikli, 2007). En este artículo se muestra el trabajo de obtención de información gráfica del monumento de la tumba de la reina Elisenda situado en el Monasterio de Pedralbes, Barcelona (España). El proceso seguido para la obtención del modelo 3D se puede dividir en tres fases: captura de puntos por fotogrametría y láser escáner, gestión de datos y, modelado con sistemas CAD.

La tumba de la reina Elisenda

La tumba de Elisenda de Montcada es uno de los monumentos funerarios más importantes de la Cataluña medieval. A pesar de ello, la historiografía ha demostrado ser incapaz de determinar su autor. Por lo tanto, es uno de los trabajos de gran valor por su diseño y ejecución que sigue indocumentado. Los datos sólo verifican la fecha de su construcción, que fue en 1364, debido a que, poco antes de su muerte, la reina Elisenda, expresó su voluntad de ser enterrada en el altar mayor (Mestre y Adell, 2001).

Una de sus características más particulares es su composición como dos construcciones simétricas respecto a una misma pared. La primera localizada dentro de la iglesia, y la segunda en uno de los lados del claustro. En la iglesia se representa a Elisenda como reina coronada, mientras que en el claustro, lleva puesto el hábito franciscano.

Desde su construcción el monumento ha sufrido varias intervenciones de rehabilitación. A comienzos del siglo XX, la parte del monumento ubicada en la iglesia sufrió una res-

tauración siguiendo el estilo neomedieval. Esta intervención destruyó el mural de fondo gótico conservado hasta entonces. Pese a todo, muestra un buen estado de conservación.

En el claustro, el monumento conserva sus características originales, probablemente porque hasta hace relativamente poco, su acceso estaba restringido a las monjas del convento. Pero la estructura de piedra, tanto esculturas como tracería gótica, se ha visto erosionada debido a estar situada en el exterior.

En esta situación, el Institut Municipal del Paisatge Urbà i la Qualitat de Vida encargó los estudios previos a la restauración del monumento consistentes en un análisis de la policromía y un estudio sobre las técnicas de ejecución y estado de conservación de los diferentes elementos.

Para ello, entre otros trabajos, se propuso la elaboración de un modelo que recreara los aspectos formales y cromáticos del estado original del monumento, y a partir de éste obtener toda la documentación 2D o 3D necesaria para plantear el proyecto. Se ha de considerar que conocer la relación entre los elementos de los dos lados del monumento permite establecer una hipótesis sobre los procesos de construcción del monumento que no se encuentran documentados.

Este modelo debe tener un papel dual, por un lado, apoyar el trabajo de rehabilitación y por otro, la difusión de este elemento al público, mediante una pantalla interactiva, mientras se realicen las obras.

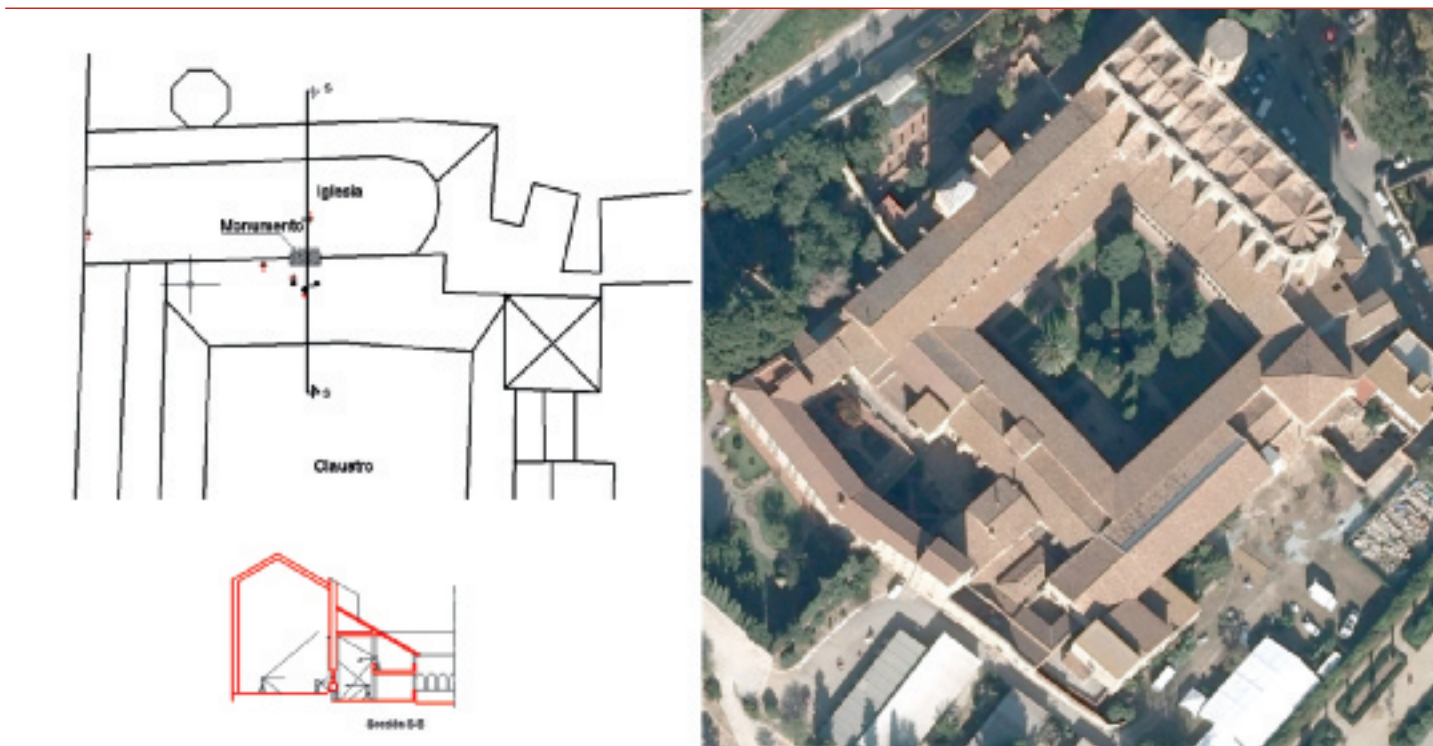
Metodología

A fin de tener un estudio lo más completo posible se propone la integración de diferentes técnicas de captu-



1. Emplazamiento y levantamiento topográfico del monumento.

1. Site plan and topographic modelling of the monument.



1

ra de información espacial. Lo cual también permite comparar los resultados y, por tanto, establecer protocolos para el uso de cada técnica en función de los modelos de representación y la precisión necesaria en cada tipo de trabajo.

Trabajos topográficos

La simetría del monumento sobre una misma pared obligó a diseñar una red para establecer un único sistema de referencia a ambos lados de la tumba. Para ello se estableció un itinerario cerrado de 5 estaciones que fueron la base para los trabajos posteriores. En la observación se empleó un equipo de poligonación para evitar el error de señal y estacionamiento y se llevó a cabo siguiendo el método de Moinot.

Una vez definidas las bases se tomaron un total de 368 puntos, figura 1, de los elementos más notables: cornisas, vértices de los arcos, peanas de posicionamiento de esculturas, etc con una estación total de medida sin prisma con una apreciación angular de 5^{cc}, 30 aumentos, sensibilidad del nivel tórico 20^{''} y un error en distancia de (5mm + 5ppm). El error de cierre fue de 3mm en coordenadas y 35^{cc} en acimut. Se realizó la compensación por mínimos cuadrados obteniendo un residuo máximo para las observaciones de distancia de 2mm y de 30^{cc} en las observaciones angulares. La desviación típica máxima asociada a las coordenadas del itinerario fue de 2mm tanto en x como en y, realizando la transmisión de errores a los puntos del levantamiento se estima que el error asociado a éstos es inferior a 1cm.

In this situation, *the Institut Municipal del Paisatge Urbà i la Qualitat de Vida* carried out the studies to afford the restoration project, i.e. a polychrome analysis and a study about the execution techniques and state of conservation of the different elements.

So, among other works, the elaboration of a virtual model was proposed to recreate the formal and chromatic aspects of the original state of the monument. From this model 2D and 3D documentation for the project can be obtained. It should be thought that to know the relationship among the elements on the two sides of the monument allows setting a hypothesis about the monument's construction processes.

This model should have a dual role, on one hand it would be a support for rehabilitation work. On the other hand, the dissemination of this heritage item is made to the visiting public while works were developed, showing in an interactive screen.

Methodology

In order to have a survey as complete as possible the integration of different capture techniques is



proposed. What will also allows us to compare results and, thus, establish protocols to use each technique in function of the models to represent and the necessary accuracy for each kind of work.

Topographic works

The tomb presents, as stated before, two faces of the same wall. This fact forced to design a network to set a reference system for both sides. Once the coordinates of the network stations were available, the survey of the most representative elements (cornices, arch vertex, sculpture stands, etc.) was obtained. In this task a non prism total station model Leica 705 was used, so the accuracy achieved in the points is of 1cm.

Photogrammetry

For the image acquisition a non-metric reflex digital camera Nikon D300S with a 20mm 2.8 AF lens was employed. The images were taken from different positions considering the camera and photographic criteria, spatial limits when positioning the camera and accuracy to achieve. In the case of stereo photogrammetric process the most adequate is to use convergence photographs; this fact was considered when the images were taken.

In order to cover the tomb, the photographs were divided in two strips, in each side of the monument, with 60-70% longitudinal and 50% transverse overlapping. What has finally resulted 14 stereoscopic pairs for the interior and 10 for exterior of the church.

The result of the restitution process was extremely high resolution photography (1mm/pixel) for these planes.

In the stereo photogrammetric case, the software TOPCON Image Master has been used to generate the models. The characteristic lines were drawn, basically the ones considered as rupture lines, such as the edges of the different architectural elements and the base of the statues. Then, these lines, together with the model correlated with a very dense mesh (step 1cm), were used to define the final photogrammetric model that was edited and used to colour and to obtain ortho-photographs. The DSM, figure 3, was employed to establish the comparative analyses between the two survey methodologies: digital photogrammetry and laser scanning. It has a precision of 3mm in depth.

Fotogrametría

Para la toma fotográfica se empleó una cámara réflex digital no-métrica modelo Nikon D300S con un objetivo de 20mm 2.8AF. La planificación de ésta se realizó considerando la cámara que se iba a utilizar y criterios topográficos como: límites espaciales en el posicionamiento de la toma, precisión a alcanzar,... Para el caso de restitución, además se seleccionó el tipo de toma más adecuado para elementos escultóricos, y la posición aproximada de los puntos de toma.

2. Ortofotografía corregida mediante rectificaciones (zonas oscurecidas).

2. Orthophotography completed by rectification.

Las fotografías se distribuyeron en dos pasadas, en cada lado del monumento, con una escala media de 1/200, con un solape longitudinal entre el 60% y el 70% y transversal del 50% como mínimo. Lo que dio como resultado 14 pares estereoscópicos para el interior de la iglesia y 10 para el claustro.

En el caso de la estereofotogrametría se utilizó el programa ImageMaster de Topcon para generar los modelos. La relación mínima base-distancia (B/D) para todos los modelos es de 0.25,





3. Nube de puntos de la parte del monumento situada en el claustro.

3. Cloister point cloud.

con una distancia media entre cámara y modelo de 4m. El error de colimación está entre 0.27 y 0.91 píxel, que equivale a 0.003mm y 0.010mm. Se emplearon 7 puntos de control que después del ajuste del bloque mostraron unas desviaciones típicas entre 0 y 0.1mm en planimetría y 0.2mm en profundidad.

Durante este proceso se dibujaron las líneas características, consideradas como líneas de ruptura, tales como los bordes de los elementos arquitectónicos y la base de las estatuas. Éstas fueron empleadas junto con el modelo de correlación, calculado con una malla muy densa (paso 1cm), para definir el modelo fotogramétrico final que se editó y utilizó para obtener las ortofotografías del monumento.

El MDS obtenido por correlación, con una precisión estimada de 3mm, además de generar ortofotografías, se ha utilizado en el análisis y comparación de metodologías: fotogrametría digital y láser escáner.

En el proceso de rectificación se consideraron dos planos de referencia para obtener la mejor solución, resultando una fotografía de alta resolución (1mm/píxel) y calidad.

Láser Escáner Terrestre

El levantamiento empleando técnicas de láser escáner se realizó empleando dos tipos de sensores diferentes. El primero de ellos, un Riegl LMS-Z410i, utilizado en la obtención de un modelo general. Mientras que los detalles de la sepultura y las esculturas se capturaron con un sensor MINOLTA Vivid-910 que al basarse en triangulación óptica permite alcanzar una mayor precisión (Fowles et al, 2003).

En la parte del claustro los principales problemas que se encontraron



3

fueron la excesiva oblicuidad con que se tuvieron que hacer las capturas debido a que la estrechez del área de trabajo, 3.50x3.15m en planta, no permitió el alejamiento para alcanzar la altura total de más de 9m. Fue necesario realizar la captura a dos niveles. En la zona baja el barrido con el sensor Riegl se realizó desde dos posiciones laterales y una posición frontal, efectuando barridos en sentido horizontal y vertical. En la toma del primer piso se realizaron dos tomas laterales, con ligero contrapicado, muy próximas al paramento exterior del monumento para abarcar la mayor superficie posible y no tener las obstrucciones pro-

Terrestrial Laser Scan (TLS)

The laser scanning model was obtained using two different sensors, a Riegl LMS Z410, for the general model, and a MINOLTA V9 for the sculptures and details, since it gets a best accuracy (Fontana et al., 2002; Fowles et al., 2003).

In the cloister part, due to the closeness between the gate and the monument it was necessary to capture the data in two levels, which coincided with the ground and the first floor of the cloister. In the floor level the sensor was installed, in the lower part scanning the wall from two lateral positions and a front position, which provided clouds horizontally and vertically. From the first floor, the two laterals scanning were far enough to cover the most part of the surface. No targets were used to geo-reference, just the well-defined details provided by the model itself.

In the interior of the church this problem is avoided since the space is wide enough to capture all the data from the floor level.

For more detail scanning data of the tomb and sculptures were capture with a MINOLTA V9. Between the consecutive scanning there was an overlap of 50% of the surface, the working distance ranged 1 to 2m to get the highest resolution possible. The model was covered by 60 partial scans in the church side, and 46 in the cloister. Despite this there were occlusions in the upper part of the tomb and behind the sculptures. Moreover, the point clouds were affected by holes in the zones coincided with the deep-red colour on the wall, figure 4. Several studies show as the colour of the target object influences on the laser beam return and in some cases the not return of the wave (Núñez et al., 2005)

Colour (RGB value) was assigned automatically to the scanned points since there is a digital camera mounted on the Riegl laser scan, and an internal camera in the Minolta V9i, of less resolution than the external one. So, the images taken for the photogrammetric process have been mapped using the DLT (Direct Lineal Transformation).

Methodology comparison

Before comparing the models achieved by these techniques it is necessary to check their quality. With this intention the points measured by topography were compared with their equivalent in the point clouds. The differences



4. Levantamiento con el Minolta V9i, en el que se ven los huecos producidos por la no reflexión de la señal.

4. Point cloud captured with Minolta V9i, the holes produced by non return of the beam can be noticed.

of coordinates were of millimetres, so it can be said that the accuracy is enough to compare the models between them.

The DSM from photogrammetry and laser scanning had a different resolution, 1cm y 2mm respectively, so the first process, before comparing both, was homogenized the two meshes to 1cm resolution.

Thereafter, longitudinal and transverse sections each 20cm have been used. Hereby 20 sections were obtained. When the sections of both models were compared it could be notice that the photogrammetric ones are smoother than the ones from the laser scanning DSM.

Another clear effect can be seen in the construction of triangles. In photogrammetry break lines were drawn explicitly by the operator, and causes a better suited of the triangles to the model. This effect would not be remarkable if the original resolution of the laser scanning cloud had been kept.

In any case, the differences among the sections of these models are less than 1cm. The maximum ones are produced only in areas of difficult capture, such as folds of sculpture clothes and tangents areas. These variations would not cause visible change in the ortho-photographs obtained by the two techniques.

Modeling process

From laser scanning and digital photogrammetry point clouds two 3D models have been generated. Once the data are captured a first task is to create a regular mesh. Due to the high volume of data and the computer limitations it was decided to generate it with 1cm of resolution.

For the management and process the laser scanning data INUS Tech Rapidform software was used. The mesh was create by triangulation for the Riegl data, while Minolta data were imported as triangulated mesh directly. In both cases the irregularities, which exist in the models, are the problem. They created false edges and vertex to show surfaces with rounding and smoothing contours.

Line drawing: The spatial data allowed establishing the position of each of the elements that make up the monument. To control the positions of each of these elements



4

ducidas por la baranda de protección. En total se realizaron 5 estaciones con 8 barridos. La distancia entre el sensor y el elemento a levantar es de máximo 5m por lo que la malla tiene un paso de 1.5cm.

Para la unión y georreferenciación se utilizaron exclusivamente detalles bien definidos del propio modelo (puntos de control). Este registro de nubes de puntos se realizó con el programa Rapidform Primero se sumaron todas las nubes entre si, y el modelo completo se georreferenciación con los puntos de control dados por topografía. La precisión alcanzada en este proceso es de $\sigma_x = \sigma_z = 2\text{mm}$ y $\sigma_y = 4\text{mm}$, encontrándose la discrepancia mayor entorno a 2cm, lo cual está por debajo del ruido en la medida de los puntos.

En el interior de la iglesia al disponer de mucho más espacio delante del monumento se evitó este problema realizándose todas las tomas desde el suelo.

Los detalles de la tumba y esculturas de ambos lados se escanearon con el Minolta. Entre los barridos consecutivos el solape fue del 50% de la superficie, con una distancia de trabajo de uno a dos metros para obtener la máxima resolución posible. El modelo fue cubierto con 60 barridos parciales en el lado de la iglesia, y 46 en el claustro. Lo cual no impidió que se mantuviera la zona de sombra en la parte superior de la tumba y detrás de las esculturas. Además se apreció que no se produjo retorno de la señal en aquellas zonas de la pared decoradas con un color rojo oscuro. Lo cual se traduce en “agujeros” sin datos en las nubes de puntos, figura 4. Varios estudios muestran que el color del objeto influye en la reflexión del rayo láser, pudiendo producirse un retardo o incluso un no retorno de la onda (Núñez et al, 2005).

El color se asignó automáticamente al disponerse de una cámara digital

montada sobre el sensor Riegl, y una cámara interna en el Minolta, esta última de menor resolución que la externa. Por lo tanto, y para mejorar el resultado se emplearon las imágenes tomadas para el proceso fotogramétrico asignando el color a las nubes de puntos a través de una Transformación Lineal Directa (TLD).

Comparación de metodología

Antes de comparar los modelos obtenidos por ambas técnicas se ha de comprobar su calidad. Para ello se compararon las nubes de puntos con los puntos de control obtenidos por topografía. La diferencia en ambos casos fue de milímetros, por lo tanto se concluye que tienen la precisión suficiente para ser comparados entre sí.

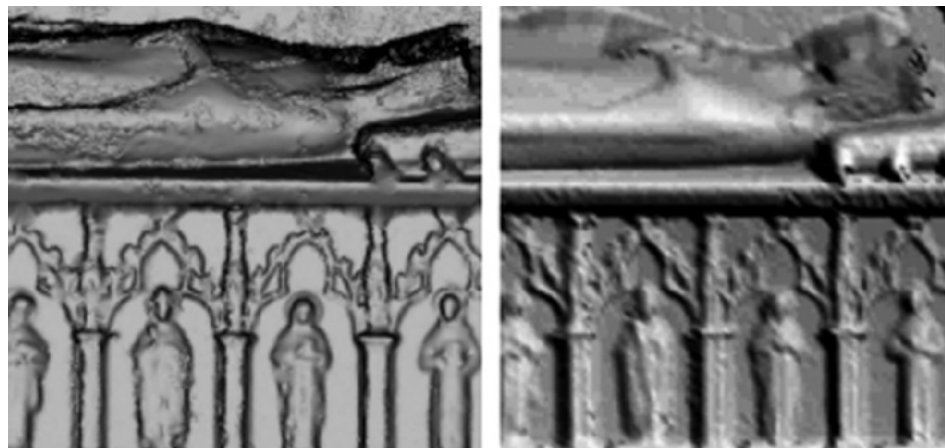
Como los MDS generados por fotogrametría o por láser escáner eran de diferente resolución, 1cm y 2mm respectivamente, el primer paso fue homogeneizarlos a 1cm de resolución.

Posteriormente se generaron secciones longitudinales y transversales cada 20cm, resultando un total de 20 cada una de ellas está formada por aproximadamente 150 puntos, por lo que el análisis se llevó a cabo con 3000 puntos. Al comparar las secciones se aprecia cómo aquellas obtenidas desde el MDS fotogramétrico son más suaves y redondeadas, que las procedentes del MDS de escáner láser.

También se detectó una diferencia en la creación de la triangulación. En fotogrametría, las líneas de rotura fueron dibujadas explícitamente por el operador, y como resultado los triángulos del modelo se ajustan mejor a la superficie. Si la malla de alta resolución obtenida con el sensor de triangulación óptica no se hubiese re-

5. MDS obtenido por láser escáner y fotogrametría respectivamente.

5. DSM from laser scanning and photogrammetry respectively.



5

muestreado a 1cm de paso, esta diferencia no sería reseñable.

En cualquier caso, las diferencias entre las secciones producidas por estos modelos son menores a 1cm. Las mayores diferencias sólo se producen en zonas de captura muy difícil, como en áreas muy irregulares, como los pliegues de las túnicas de las estatuas, o con muchos bordes tangenciales. Estas variaciones no producen cambios significativos en las ortofotografías obtenidas mediante las dos técnicas.

Modelado

A partir de las nubes de puntos obtenidas con escáner láser y con fotogrametría digital se generaron dos modelos tridimensionales. Un primer paso es la creación de una malla regular, la cual y debido al gran volumen de datos y a la limitación de los ordenadores, se decidió generar con 1cm de resolución.

Para el control y la manipulación de los datos del láser escáner se utilizó el programa INUSTech Rapidform. La

an image has been developed with data scanning in a frontal view. This image, figure 6, allowed us to define the real measures of the different elements.

The points from the topographic survey were added to determine the working scale and to confirm the correct position of each of the elements with respect to the whole. In order to reconstruct graphically the monument it was essential to determine those elements that, due to their small size with respect to the rest of the monument, were not sufficiently detailed by the general scan. In these cases the detail Minolta model was used.

3D theoretical model

A theoretical model is a very useful tool in the restoration processes. This model shows the geometric shapes that the different elements of the monument should have in their initial state, without the faults due to the erosion, or mistakes in the restoration process.

It has been elaborated taking like base the DSM. For example the triangulated models have allowed creating vertical and horizontal sections to establish the vertical reference depth planes of the monument. On the other hand, applying the different techniques, a 2D vertical plane with information of the gothic tracery has been drawn. In this way the heights and the basic geometry of the different parts of the monument has been obtained on an



6

6. Dibujo vectorial situado sobre la nube de puntos.
7. Modelo teórico 3D.

6. Linear drawing and point cloud.
7. Theoretical 3D model.

La malla se creó por triangulación de los datos de Riegl, mientras que los obtenidos con el escáner láser Minolta fueron importados como malla triangular directamente.

En ambos casos, el gran problema fueron las irregularidades existentes en los modelos. Ambos crearon aristas y vértices inexistentes en la realidad para representar superficies con contornos suaves y continuos.

Dibujo de líneas: Los datos tridimensionales permitieron establecer la posición de los elementos que configuran el monumento. Para controlar la posición exacta de cada uno de ellos se creó una imagen frontal con los propios datos del escáner láser. Esta representación bidimensional, figura 6, nos permitió definir las posiciones y dimensiones correctas de los elementos del conjunto.

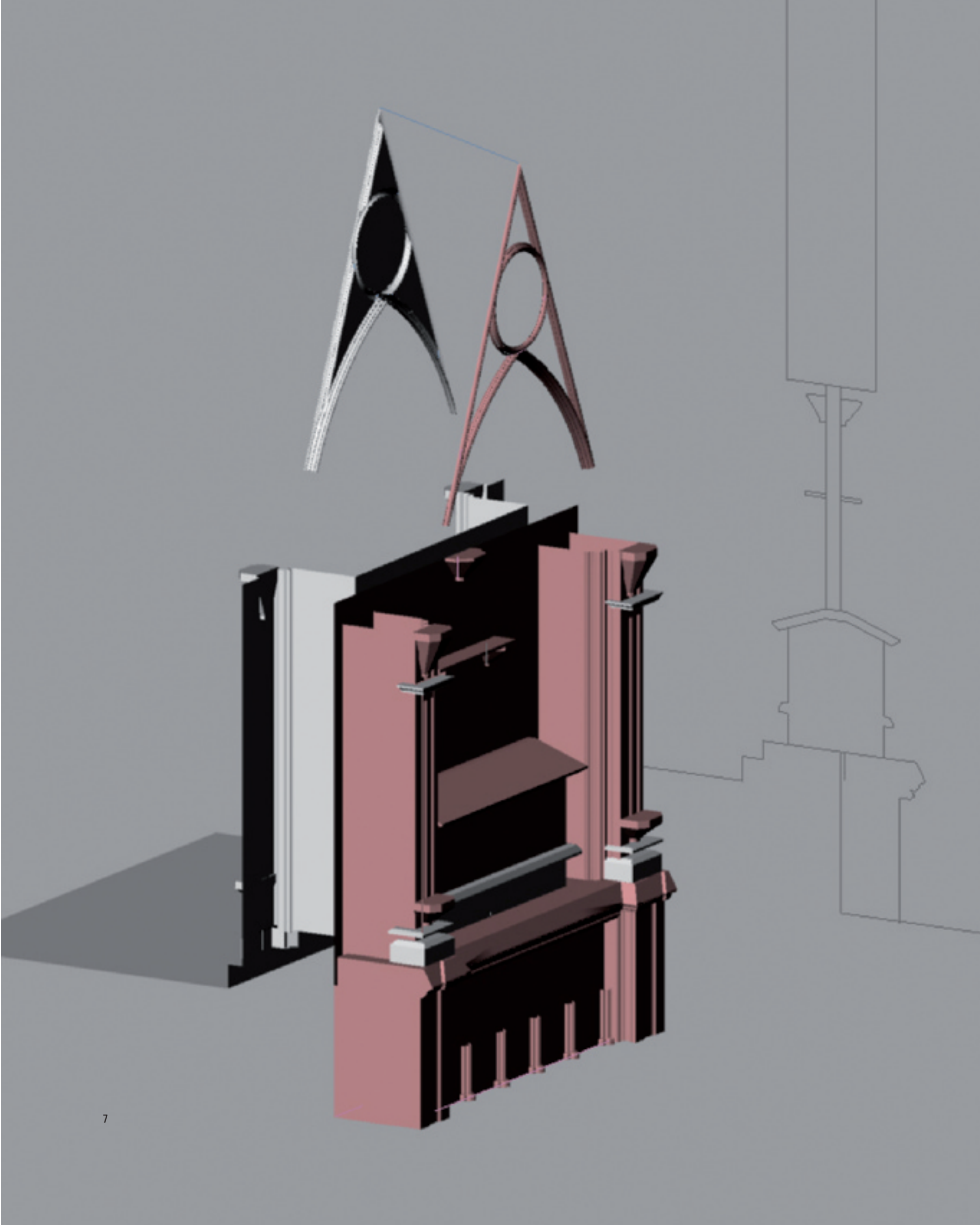
Los puntos del levantamiento topográfico permitieron determinar la escala de trabajo y confirmar la exactitud posicional de cada pieza tridimensional respecto al conjunto y en correspondencia con la imagen bidimensional.

Para reconstruir gráficamente el monumento fue esencial determinar aquellos elementos que, debido a su pequeño tamaño respecto al conjunto, no quedaron suficientemente definidos por los barridos generales. En estos casos se utilizaron los barridos de detalle realizados con el Minolta.

Gracias a todos estos datos, el monumento se reprodujo con una precisión entre 5mm y 1cm.

Modelo teórico 3D

Un modelo teórico es una herramienta muy útil en los procesos de restauración. Ya que muestra las formas de los





orthogonal front view. Combining the geometric information of the 2D vertical plane with the different depth planes the final 3D theoretical model has been achieved.

Analysis of results

One of the first results that can surprise is the thick of the wall, since it is only 11cm. The tomb with a total width of about 80cm is unique and the centre wall rests on top. These facts confirm that the monument was built on both sides of the wall at once.

The width of this wall and the positions of the trays that support the central sculpture and the images of the Pantocrator, allow us to think that necessarily had to be built in parallel as anchors to secure the brackets to the wall and have a correct functional stability have to be locked between them.

The basis of the Gothic tracery starts at different heights for both sides. In the church the base level is approximately 30cm higher than the cloister. But the geometry of gothic arches still maintaining and preserved the same measures as the main triangular nerve in both width and height. In this sense the construction grows symmetrically, adapted to the height of the space which is located. The differences between the heights founded in the positions of some elements are not significant because they are below 1cm, similar to the used measurement tools RMS.

Conclusions

The work showed in this paper is part of the investigation on the methods to capture information of cultural heritage elements, and the processes to build complete and accurate 3D virtual models.

In this case digital photogrammetry, laser scanning, topography and CAD modelling have been used to obtain all the necessary information to know, better, the building process of one of the most important monuments in the Pedralbes monastery (Barcelona, Spain).

The model has been achieved by the integration of the data from the photogrammetry and laser scanning, with the support of the topography to geo-reference all the information. From these data the orthophotography of the lower part of the

diferentes elementos que lo configuran en su estado inicial, sin los típicos defectos de desgaste por tiempo o errores de restauración o incluso de ejecución.

Este modelo se elaboró en base a los MDS. Así pues las mallas triangulares permitieron crear secciones verticales y horizontales para establecer las referencias de los planos de profundidad. Por otro lado, aplicando las diferentes técnicas, se consiguió dibujar en 2D la volumetría del monumento y su tracería gótica. De esta manera se obtuvieron las alturas y la geometría básica de las diferentes partes del monumento en una vista ortogonal de tipo frontal. Combinando la información geométrica del plano vertical en 2D con los diferentes planos de profundidad, se consiguió generar el modelo teórico 3D definitivo.

Análisis de resultados

Uno de los primeros resultados que puede sorprender es el grueso del muro que separa ambas partes del monumento, puesto que solamente es de 11cm. La tumba, con una profundidad de 80cm es única y el muro descansa sobre ella. Este hecho confirma que el monumento fue construido por ambos lados del muro al mismo tiempo.

El espesor del muro que separa ambas partes del monumento, y la posición de las peanas que soportan la escultura central y las imágenes del Pantocrátor, hacen pensar que necesariamente se construyeron en paralelo. La razón fundamental, es asegurar los anclajes de los soportes de estos elementos, sobre el muro, de forma simultánea y que sirvan a las piezas de ambos lados.

La base de la tracería gótica comienzan a diferentes alturas en ambos lados del monumento. En la iglesia el nivel

base es 30cm más alto que el claustro. Sin embargo, la geometría de los arcos góticos se mantiene y conserva las mismas medidas para el nervio triangular principal en altura y espesor.

En este sentido la construcción fue creciendo de forma simétrica en todas las partes importantes, pero al mismo tiempo se fue adaptando a los pormenores del espacio en el que está situado, la iglesia o el claustro.

Las diferencias entre las alturas en la posición de algunos elementos a ambos lados del monumento no son significativas, puesto que son inferiores a 1cm, RMS de los instrumentos utilizados.

Conclusiones

El trabajo expuesto en este artículo es parte de la investigación de los métodos de captura de información de elementos del patrimonio cultural, y del proceso de construcción de modelos virtuales 3D de precisión.

En este caso, fotogrametría digital, escáner láser, topografía y modelado CAD se han utilizado para obtener toda la información necesaria, para conocer mejor el proceso de construcción de uno de los monumentos más importantes del monasterio de Pedralbes.

El modelo fue elaborado por la integración de los datos obtenidos por la fotogrametría y el escáner láser, con el soporte de la topografía para referenciar toda la información en un sólo sistema. A partir de estos datos, se creó la ortofotografía de la parte inferior del monumento, correspondiente con la zona de la tumba.

Los resultados de la comparación entre los modelos obtenidos por ambas técnicas muestran que las dos, fotogrametría digital y escáner láser, pueden utilizarse como herramientas



apropiadas para documentar la rehabilitación, la restauración, o preservación del proyecto. Sin embargo, ambas técnicas tienen las mismas desventajas, como las obstrucciones y la gran cantidad de datos que producen y dificultan su manipulación.

Un elemento a considerar para utilizar uno u otro método es el costo de los instrumentos. Mientras que la captura de datos se puede realizar con una cámara digital no profesional, la técnica con escáner láser necesita instrumentos con sensores de alto costo. Una desventaja de la fotogrametría, es que los puntos de control necesariamente se tienen que obtener mediante parámetros de orientación y construir los modelos mediante correlación. ■

Referencias

- BRADSHAW, G., 1999. *Non-Contact Surface Geometry Measurement Techniques*. Dublin: Trinity College.
- DEMIR N., BAYRAM B., ALKIS Z., HELVACI C., ÇETIN I., VÖGTLE T., RINGLE K., STEINLE E., 2004. Laser scanning

for terrestrial photogrammetry, alternative system or combined with traditional system? En: *Comisión V, WG V/2 ISPRS*, Istanbul, Turkey.

- FOWLES, P.S., LARSON, J.H., DEAN, C., SOLAJIC, M., 2003. The laser recording and virtual restoration of a wooden sculpture of Buddha. *Journal of Cultural Heritage*, nº 4, pp.367-371.
- MESTRE, J., ADELL, J., 2001. *Monestirs de Catalunya*. Barcelona: Editorial 62.
- NÚÑEZ A., BUILL F., MUÑOZ F., 2005. Comportamiento de un sensor láser escáner. En: *6ª Semana Geomática*, Barcelona, Spain, 8-10 February 2005.
- PAVLIDIS, G., KOUTSOUDIS, A., ARNOUTOGLU, F., TSIUKA, S.V., CHAMZAS, C., 2007. Methods for 3D digitization of Cultural Heritage. *Journal of Cultural Heritage*, nº 8, pp. 93-98.
- REMONDINO, F., EL-HAKIM, S.F., 2006. Image-based 3D modelling: a review. *Photogrammetric Rec. J.*, 21 (115), pp. 269-291.
- SCHENK, T., 1999. *Digital Photogrammetry Volume I*: Terra Science.
- YASTIKLI, N., 2007. Documentation of cultural heritage using digital photogrammetry and laser scanning. *Journal of Cultural Heritage*, nº 8, pp. 423-427.
- YILMAZ H.M., YAKAR M., GULEC S.A., DULGERLER O.N., 2007. Importance of digital close-range photogrammetry in documentation of cultural heritage. *Journal of Cultural Heritage*, nº 8, pp.428-433.

AGRADECIMIENTO

Deseamos agradecer la colaboración en el trabajo realizado del profesor del departamento Expresión Gráfica I de la UPC, Andrés de Mesa Gisbert.

monument, corresponding with the tomb, has been created.

The results of the comparison between models obtained by both techniques show that both, digital photogrammetry and laser scanning, can be used successfully to document a rehabilitation, restoration or preservation project. But both of them have the same drawbacks such as occlusions and the big quantity of data that make difficult the data management.

An element to considerer to use one or other method is the cost of the instruments, while in the capture by photogrammetry an amateur digital camera can be used laser scanning needs a special sensor of a high price. A drawback of the photogrammetry is that control points are necessary to obtain the orientation parameters and build the model by correlation. ■

References

- BRADSHAW, G., 1999. *Non-Contact Surface Geometry Measurement Techniques*. Dublin: Trinity College.
- DEMIR N., BAYRAM B., ALKIS Z., HELVACI C., ÇETIN I., VÖGTLE T., RINGLE K., STEINLE E., 2004. Laser scanning for terrestrial photogrammetry, alternative system or combined with traditional system? In: *Commission V, WG V/2 ISPRS*, Istanbul, Turkey.
- FOWLES, P.S., LARSON, J.H., DEAN, C., SOLAJIC, M., 2003. The laser recording and virtual restoration of a wooden sculpture of Buddha. *Journal of Cultural Heritage*, nº 4, pp. 367-371.
- MESTRE, J., ADELL, J., 2001. *Monestirs de Catalunya*. Barcelona: Editorial 62.
- NÚÑEZ A., BUILL F., MUÑOZ F., 2005. Comportamiento de un sensor láser escáner. In: *6ª Semana Geomática*, Barcelona, Spain, 8-10 February 2005.
- PAVLIDIS, G., KOUTSOUDIS, A., ARNOUTOGLU, F., TSIUKA, S.V., CHAMZAS, C., 2007. Methods for 3D digitization of Cultural Heritage. *Journal of Cultural Heritage*, nº 8, pp. 93-98.
- REMONDINO, F., EL-HAKIM, S.F., 2006. Image-based 3D modelling: a review. *Photogrammetric Rec. J.*, 21 (115), pp. 269-291.
- SCHENK, T., 1999. *Digital Photogrammetry Volume I*. Terra Science.
- YASTIKLI, N., 2007. Documentation of cultural heritage using digital photogrammetry and laser scanning. *Journal of Cultural Heritage*, nº 8, pp. 423-427.
- YILMAZ H.M., YAKAR M., GULEC S.A., DULGERLER O.N., 2007. Importance of digital close-range photogrammetry in documentation of cultural heritage. *Journal of Cultural Heritage*, nº 8, pp.428-433.

