

Técnicas digitales para el estudio del Patrimonio Defensivo: “Puerta de Almenara” y lienzos sur del Palacio del Gobernador y Plaza de Armas del Castillo de Sagunto (Valencia)

Digital technicals for the study of the Defensive Heritage: “Puerta de Almenara” and south walls of “Palacio del Gobernador” and “Plaza de Armas” of the Castle of Sagunto (Valencia)

Álvaro Sánchez Corrochano^a, Enrique Martínez Sierra^b, Alessandro Greco^c, Daniela Besana^d

^a Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, Spain, alvarosanchezco@gmail.com

^b Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, Spain, enriquemartinezsierra@gmail.com

^c Università di Pavia, Pavia, Italy, agrec@unipv.it

^d Università di Pavia, Pavia, Italy, daniela.besana@unipv.it

Abstract

The use of digital documentation and registration techniques in Cultural Heritage is becoming more common every day, thanks to its ability to capture a large amount of data in a fast and efficient process. Its high geometric precision, thoroughness, performance retrieved and especially the generation of high fidelity and precision of architectural good assets make these tools optimal for the planimetric surveys. The work of intervention or conservation of cultural heritage requires a previous graphic registration using different techniques available.

This article presents a combined method of implementation of various digital techniques that allow to achieve the most accurate graphic documentation possible. The different results obtained from the use of photogrammetry by drone or by manual camera are discussed. It is intended to seek the standardization and optimization of the process of documentation and value of the Cultural Heritage by combining these techniques. These techniques have been used in a real case: the three-dimensional modeling of various parts of the defensive set of the Castle of Sagunto (Valencia), called the “Puerta de Almenara”, which gives access to the square of the same name, on the eastern side and some walls of the fortification. The Castle of Sagunto is a mosaic of the different cultures who occupied it (Iberians, Romans, Goths, Arabs...). The fortification is located on top of a hill of the Sierra Calderona, controlling even the Mediterranean coastal road and the communication route with Aragon. During the last years, the castle has been immersed, for almost 20 years, in various works of consolidation and restoration to initiatives of the Institute of Cultural Heritage of Spain.

Keywords: Digital documentation, photogrammetry, laser scanner, cultural heritage.

1. Introducción

La metodología en la toma de datos ha avanzado y evolucionado enormemente en los últimos años y, especialmente, en el campo del Patrimonio Construido.

Una de las principales ventajas dentro de las técnicas e instrumentos de digitalización es que se

encuentran a disposición del usuario fácilmente, lo que mejora el proceso de las tomas de datos. Pero estas técnicas deben ser escogidas con un criterio técnico que responde al tipo de Monumento a estudiar y el objetivo final que se quiere obtener, es decir, estudiar las características

morfológicas del Bien y la calidad métrica del resultado final nos darán las pautas para la elección de dichas técnicas digitales.

Otra de las numerosas ventajas en la utilización de drones en la inspección patrimonial es la economización de costes durante la evaluación de los tipos de lesiones de un Monumento, ya que no necesitamos depender de medios auxiliares como andamios, plataformas elevadoras, etc. para dicha evaluación.

Debido a las complejas estructuras y construcciones que alberga el Patrimonio Cultural, actualmente, sin la ayuda de instrumentos y técnicas avanzadas en la toma de datos digitales, la representación del mismo cae en una simplificación idealizada de la realidad, obviando numerosas veces la geometría, los espacios ocultos y los detalles tan específicos que puedan tener.

En este artículo se pretende mostrar los resultados obtenidos durante el estudio y digitalización de uno de los Monumentos más importantes de la costa mediterránea, ya sea por su larga historia o por la dimensión del mismo, el Castillo de Sagunto (Valencia).

La técnica digital utilizada ha sido la fotogrametría obtenida mediante dos procesos de trabajo diferentes: la toma de datos con cámara fotográfica de mano y el uso de un dron. El dron también es conocido, a nivel profesional, como Sistema de Pilotaje de Aeronaves por Control Remoto (RPAS por sus siglas en inglés, Remotly Pilot Aircraft System).

2. El Castillo de Sagunto. Conocimiento y digitalización

El Castillo de Sagunto es un bien cuya titularidad corresponde al Estado y que se encuentra actualmente adscrito a la Dirección General de Bellas Artes del Ministerio de Cultura y Deporte. El inmueble goza de la condición de Bien de Interés Cultural con la categoría de Monumento en virtud del Decreto de 03 de junio de 1931 y tal y como señala la Disposición Adicional Segunda de la Ley 15/1985 del Patrimonio Histórico Español.



Fig. 1. Vista actual del recinto del Castillo (Autores, 2019).

La acrópolis de Sagunto se encuentra enclavada en un promontorio rocoso denominado del Castell, cuya altura máxima no alcanza los 180 m, y perteneciente al macizo montañoso de la Sierra Calderona. Su situación privilegiada en la margen derecha del río Palancia, hacen de este enclave aislado un inmejorable lugar de control sobre la costa, así como sobre el acceso natural al interior de Aragón, convirtiéndolo en un lugar privilegiado para el asentamiento humano. En este sentido, ya en el siglo V a.C. existía un asentamiento ibérico en torno al promontorio.



Fig. 2. Grabado de la ciudad de Sagunto y el castillo (Alexandre de Laborde, 1806).

Así que, en principio, y si las escasas excavaciones arqueológicas realizadas no demuestran lo contrario, el primer nivel de ocupación existente en el cerro del Castillo podemos determinarlo en época ibérica, llegando a ser la ciudad más importante de todo el territorio de Edeta, la Edetania. De esta primigenia ciudad ibero-edetana, denominada Arse, surgió posteriormente la ciudad romana de Saguntum.

Arse estaba cercada por una fuerte muralla ciclópea reforzada con torres o bastiones, aunque

desde cuando existía población y sus fundadores sigue siendo una incógnita. La única información con certeza sobre su origen es la fecha de la fosa de fundación de la muralla, el siglo IV a.C.

En el siglo III a.C. Aníbal, conquistador cartaginés, consiguió hacerse con la ciudad. Este fue uno de los motivos de inicio de la segunda Guerra Púnica entre Cartago y la República de Roma. Siete años después del asedio de Aníbal, la ciudad fue recuperada por los romanos.

De los pocos restos conservados de esta época, el más destacado es el templo republicano al norte de foro. Está dividido en tres cellae paralelas y cerradas por un muro transversal que serviría de fachada a un pronaos situado delante del edificio. En la época imperial, se convertiría en un monumento dedicado a la familia imperial. De la misma fecha se han encontrado otras construcciones como restos de viviendas y que quedan debajo del muro de contrafuerte, en las proximidades del teatro.

Los árabes tomaron la ciudad en el año 713, cambiando el topónimo “Saguntum” por “Morbyter”. No fue hasta el año 1239 cuando, por parte de Jaime I el Conquistador, fue conquistada por los cristianos.

El recinto del actual castillo cierra una extensa meseta en lo alto del promontorio de unos 800 m. de longitud.

La configuración interior de dicho recinto se ha ido configurando con los años, debido a los diferentes asentamientos tanto en su interior como en el exterior. Se pueden diferenciar siete zonas o plazas denominadas, de este a oeste, como Plaza de Almenara, Plaza de Conillera, Plaza de Armas, Plaza de San Fernando, Plaza de Estudiantes, Plaza de la Ciudadela y Plaza del Dos de Mayo.

2.1. Restauración y consolidación del Castillo de Sagunto

A efectos de continuar con la consolidación y restauración del Castillo, que lleva produciéndose desde hace ya varios años atrás, el Instituto del Patrimonio Cultural de España propone la redacción de un proyecto y posterior ejecución de las obras en tres nuevos sectores: el lienzo sur del Palacio del Gobernador, la zona sur de la Plaza de Armas y los elementos de madera de la Puerta de Almenara. De manera complementaria, también se propone la recogida y catalogación de material arqueológico disperso por el recinto del Castillo, para su limpieza, almacenamiento y exposición.

En las zonas de paramentos a restaurar existe en la actualidad peligro de desprendimientos con riesgo para las personas, así como para la propia integridad del Bien.

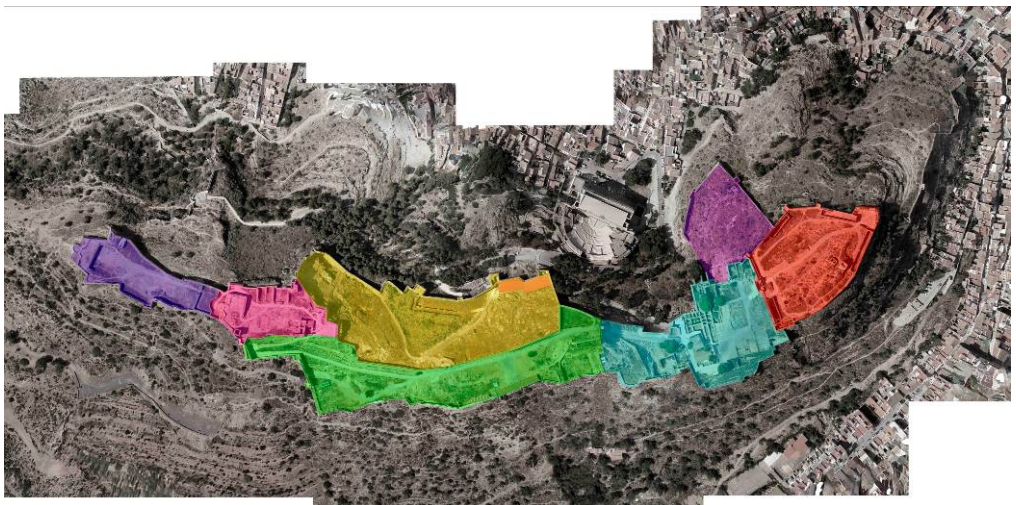


Fig. 3. Ortofoto de la planta del Castillo con las 7 zonas o plazas marcadas (Autores, 2019).



Fig. 4. Lienzo sur del Palacio del Gobernador (Elaboración propia, 2019).



Fig. 5. Lienzo sur Plaza de Armas (Autores, 2019).

2.2. Fotogrametría mediante dron y cámara de mano

Debido a la inexistencia de planimetría exhaustiva de las zonas a restaurar y consolidar, se decidió realizar un levantamiento fotogramétrico con la ayuda de un dron y una cámara de mano a todas las zonas para, posteriormente, analizar el resultado en el gabinete y conocer con exactitud las relaciones constructivas, los diferentes materiales utilizados, las épocas de construcción y los añadidos posteriores.

El primer método que se utilizó fue la fotogrametría de corto alcance, donde la cámara se encuentra cerca del objeto y generalmente se sujeta a mano o mediante un trípode. Por lo general, este tipo de fotogrametría no es topográfica. La toma de fotografías mediante cámara de mano fue utilizada para los elementos de madera de la Puerta de Almenara. Debido a su difícil acceso, y al estar bajo la puerta del mismo nombre, era imposible la utilización del dron para conseguir resultados de alta calidad.

Con la ayuda de una cámara es posible modelar y medir edificios, estructuras de ingeniería, artefactos arqueológicos, etc. Este tipo de fotogrametría también se llama “*modelado basado en imágenes*”.

Con esta técnica podemos obtener un mayor nivel de detalle en texturas y relieves que forman parte de la envoltura del objeto estudiado.

La cámara de mano utilizada era de la marca Nikon, modelo D5600 con un objetivo AF-S DX NIKKOR 10-24 mm. f/3.5-4.5G ED. La distancia focal se mantuvo fija en cada una de las tomas, al igual que la distancia de enfoque.

Previo a la realización de la fotogrametría en campo son necesarias varias acciones iniciales, y a tener en cuenta in situ, para elevar la eficiencia del trabajo. Se enumeran varias pautas de trabajo:

- a) Previo a la visita al Bien se tuvo que planificar la toma de datos. Una buena programación, un orden lógico de la toma de datos proporcionará un resultado final de alta calidad y una reducción en el proceso de trabajo en campo.
- b) Las tomas de fotografías fueron realizadas perpendicularmente a cada uno de los lienzos.

Además de la toma general de los lienzos, se realizaron imágenes de detalle en zonas de difícil visión o en sombra.

Cada toma fotográfica debe solaparse con la anterior, como mínimo, un 60% para que el proceso de restitución se realice correctamente.

- c) Para la toma de fotografías en exterior se debe evitar la toma con grandes contrastes de luces y sombras, ya que la restitución posterior presentará problemas, recomendándose las horas centrales del día y sin incidencia directa del sol. Los parámetros de display de la cámara se ajustarán de manera manual para homogenizar las condiciones lumínicas.

Para la fotogrametría mediante dron se utilizó el Phantom 4 de la marca DJI con cámara integrada con sensor de imagen de 1/2.3"CMOS y objetivo FOV 94° 20 mm, lo que equivale a 35 mm de una cámara manual. El dron fue utilizado para la toma de fotografías en varias secuencias de vue-

lo. La primera de ellas fue para la captura de la totalidad del monumento, realizando el vuelo tanto perpendicular al monumento para generar la ortofoto en planta como en oblicuo, para la realización del volumen con alturas de la totalidad del conjunto defensivo.

El segundo de los vuelos estuvo orientado a la toma de fotografías específicas de los lienzos sur del Palacio del Gobernador y de la Plaza de Armas. La diferencia de esta toma con respecto al primer vuelo fue la altura del dron con respecto al monumento y la velocidad del mismo.

La altura y velocidad en el primer vuelo fue de 60 m y 3 m/s respectivamente. En el segundo vuelo, el de detalle de la zona de actuación, fue de 20 metros y 1-2 m/s respectivamente.

Es importante citar que para realizar los vuelos con el dron en espacios abiertos la velocidad del viento debe estar controlada en todo momento. Aunque el dron utilizado cuenta con estabilización automática en sus 3 ejes (cabeceo, alabeo y guiñada), no es aconsejable, por razones de seguridad, volar con velocidades superiores a 24 km/h. Cualquier ráfaga de viento a esa velocidad puede hacer perder el control del aparato con facilidad. En el presente ejemplo, durante la realización del segundo de los vuelos dicha velocidad del viento se superó, lo que obligó a parar los trabajos hasta llegar a una velocidad de seguridad.

2.3. Resultados obtenidos. Postproducción

Una vez tomadas todas las fotografías necesarias es el momento de unir las en un modelo único con el que poder trabajar. No siempre es aconsejable trabajar con solo un modelo, ya que este podría ser de un tamaño difícil de manejar.

Para el tratamiento de los datos de fotogrametría en cada uno de los métodos se utilizó el software *Agisoft Metashape*.

El número de fotografías utilizadas en la postproducción varía en función de la dimensión del paramento que se quiere estudiar y del detalle que se quiera desear. El uso de un número elevado de fotografías, inclinaciones y exposiciones solares diferentes puede generar alineaciones y resultados finales erróneos, así como fotografías

con movimiento debido a la inestabilidad de la cámara de mano o del dron.

Una vez generado los modelos tridimensionales o nube de puntos, se generan los alzados con un modelo de malla y textura.

Como resultado final se obtiene una nube de puntos 3D compuesta por cientos de miles de puntos individuales en un sistema de coordenadas (x, y, z), que en sí mismas componen un modelo tridimensional de los objetos registrados.



Fig. 6. Nube de puntos densa del conjunto de lienzos.

Para este trabajo se desarrollaron dos nubes de puntos densa diferentes, una para cada uno de los lienzos y otra para el conjunto de estos. En cada una de las nubes se utilizaron tanto las fotografías tomadas con la cámara de mano como las resultantes de los vuelos del dron. Es importante indicar que el dron, por la geometría de los propios lienzos, no puede tomar con detalle algunas partes de estos, por lo que el trabajo con el software debe complementarse con la cámara de mano.

La nube de puntos densa generada para los tramos de los lienzos por separado superaba los 334 670 puntos, donde se utilizaron 660 fotografías. En cambio, para la nube de puntos densa del conjunto de lienzos, las fotografías utilizadas superaban las 1100 y los puntos resultantes fueron superiores a los 542.540. El tamaño de cada una de las fotografías utilizadas se encontraba alrededor de 4,330 Mb para las que fueron tomadas con la cámara de mano y los 12,550 Mb para las realizadas con el dron. Este tamaño de archivos, con un gran número de píxeles, aseguró una correcta resolución y definición en el trabajo resultante.

Durante el trabajo de elaboración de la nube de puntos densa, se introdujo en el programa varias dimensiones conocidas de partes de los lienzos para así, posteriormente, poder exportar la ortofoto con dimensiones reales en el momento de ser importada en el programa de dibujo 2D. En total fueron 4 las dimensiones de referencia que se tomaron in situ en el momento de la visita al monumento. El número de referencias conocidas a introducir en el programa dependerá de la dimensión total del modelo, pero nunca menos de tres.

Con el modelo tridimensional montado y habiendo obtenido la malla con la textura proporcionada por las múltiples fotografías tomadas, es

el momento de obtener la ortofoto de cada uno de los lienzos.

Las ortofotos obtenidas de la fotogrametría fueron importadas, por separado, al programa de dibujo *AutoCAD*, para realizar el dibujo geométrico, los despieces de los materiales y entorno de los lienzos del Castillo de Sagunto, obteniendo así un levantamiento planimétrico fidedigno en 2D de gran calidad.

En este trabajo concreto se utilizó la fotogrametría para la obtención de los alzados de las diversas partes de la muralla y las puertas a restaurar, los elementos concretos de detalle, y las texturas de los diferentes materiales.



Fig. 7. Ortofoto en planta del lienzo sur del Castillo de Sagunto (Autores, 2019).



Fig. 8. Ortofoto en alzado del lienzo sur del Castillo de Sagunto (Autores, 2019).

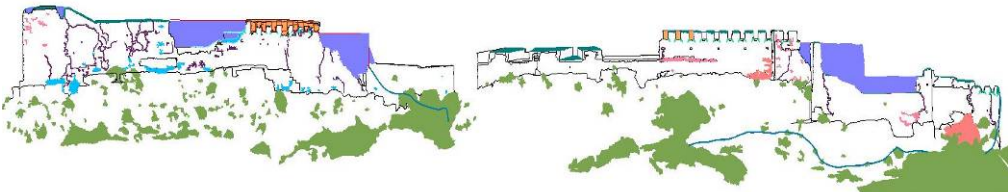


Fig. 9. Dibujo 2D representando las lesiones exportadas de la ortofoto de los lienzos (Autores, 2019).

El resultado de la fotogrametría mediante cámara de mano se puede observar en las ortofotos siguientes de la Puerta de Almenara.



Fig. 10. Ortofoto Puerta de Almenara y dibujo 2D de la misma (Autores, 2019).

Al igual que se hizo con las ortofotos generadas de los lienzos de la muralla, la fotogrametría de la Puerta de Almenara fue utilizada para levantar un modelo 2D que ayudó a identificar las diferentes piezas que la componen previo a los trabajos de consolidación sobre la misma. En este caso, el escalado de la puerta se realizó gracias a una pequeña regla que se colocó sobre la puerta. Dicha regla fue suficiente para dar una dimensión real que ayudara al escalado de la Puerta.

3. Conclusiones

Un estudio previo en profundidad, de forma íntegra y rigurosa, es fundamental a la hora de abordar cualquier trabajo de intervención en Patrimonio Cultural.

El trabajo resultante, al utilizar este tipo de técnicas digitales, es de una gran calidad y una gran eficiencia, ya que la ejecución del trabajo en campo es bastante rápida si lo comparamos con las técnicas tradicionales de levantamiento.

El uso de varias técnicas digitales por separado supone un gran avance en la forma de documentar el Patrimonio. Cuando se combinan varias de estas técnicas en un mismo proyecto de investigación e intervención, sobre todo en Bienes de gran entidad, aumenta el valor de calidad del trabajo final.

Es muy importante tener en cuenta que todo el trabajo de documentación digital y combinación de procesos no servirá si no se realiza desde un estudio y conocimiento de la técnica.

La fotogrametría no es una ciencia exacta donde no todas las fotografías que introducimos en el software van a ser válidas. Debido a la alta velocidad del viento, como ya se ha explicado anteriormente, algunas de las tomas fueron desestimadas ya que las ráfagas de viento elevadas hicieron desestabilizarse al dron en algunos momentos por lo que dichas fotografías aparecían movidas.

La combinación de técnicas ha ayudado a reducir el trabajo en campo con el dron, ya que el estudio minucioso de las partes externas de la muralla, donde encontramos lienzos de gran altura y un terreno bastante escarpado y peligroso para andar por sus inmediaciones, hubiera supuesto la instalación de medios auxiliares para facilitar la aproximación de los técnicos. Gracias a esta técnica, la toma de datos en campo se pudo reducir a una jornada de trabajo con dos técnicos.

Finalmente, tras analizar el proceso de trabajo, en campo y en el gabinete, tanto de este trabajo como de los siguientes, se extrapolarán los datos para poder generar un protocolo de desarrollo de los trabajos aplicados al Patrimonio Cultural, y así dar una respuesta a los diferentes técnicos que intervienen en ellos.

Este tipo de tecnología virtual ayudará a difundir los conocimientos y resultados a los procesos educativos, acercando el Patrimonio mediante programas de formación a los técnicos y campañas de información al resto de ciudadanos.

Bibliography

- Altuntas, C. (2015). *Integration of point clouds originated from laser scanner and photogrammetric images for visualization of complex details of historical buildings*, International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, vol. XL-5/W4, pp. 431-435.
- Bercigli, M. (2017). "Documentation strategy for coastal towers of the Mediterranean: the case of the tower in the archaeological site of Saturo (TA-ITA)", in *FORTMED 2017. Modern Age Fortifications of the Mediterranean Coast*, Alicante.
- Boehler, W.; Marbs, A. (2004). *3D Scanning and photogrammetry for heritage recording: a comparison*, Geoinformatics.
- Charquero Ballester, A. M. (2016). "Práctica y usos de la fotogrametría digital en arqueología", *DAMA. Documentos de Arqueología y Patrimonio Histórico*, 1, pp. 139-157, in <https://web.ua.es/es/dama/documentos/dama1/charquero.pdf> (04-10-2019).
- Cipriani, L.; Fantini, F. (2018). "Integration of Pipelines and Open Issues in Heritage Digitization", in *Latest Developments in Reality-Based 3D Surveying and Modelling*, pp. 171-191.
- Mañana-Borrazás, P.; Rodríguez Paz, A.; Blanco-Rotea, R. (2008). "Una experiencia en la aplicación del Láser Escáner 3D 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, in <http://arqarqt.revistas.csic.es/index.php/arqarqt/article/viewFile/87/84> (01-10-2019).
- Martínez Rubio, J.M.; Fernández Martín, J.J.; San José Alonso, J.I. (2018). "Implementación de escáner 3d y fotogrametría digital para la documentación de la iglesia de la Merced de Panamá", *Expresión gráfica arquitectónica* 23, 32, pp. 208-219.
- Murphy, M.; McGovern, E.; Pavia, S. (2013). "Historic building information modelling—Adding intelligence to laser and image based surveys of European classical architecture", *ISPRS Journal of photogrammetry and remote sensing*, 76, pp. 89-102.
- Reinoso Gordo, J.F.; Rodríguez Moren, C.; Gómez Blanco, A.J.; León Robles, C. (2018). "Cultural Heritage Conservation and Sustainability Based on Surveying and Modeling: The Case of the 14th Century Building Corral del Carbón (Granada, Spain)", *Sustainability*, 10, 5.
- Sharif, H.; Hazumi, H.; Hafizuddin Meli, R. (2018). "3D documentatation of the petalaindera: digital heritage preservation methods using 3D laser scanner and photogrammetry", *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 290.
- Tunzi, P. (2016). "La fotomodellazione per documentare il Patrimonio Storico", in *REUSO 2016. IV Convegno Internazionale sulla documentazione, conservazione e recupero del patrimonio architettonico e sulla tutela paesaggistica*, Firenze.
- V.V.A.A. (2010a). "Arte y restauración virtual, técnicas de digitalización 3D y métodos de reproducción aplicadas al Patrimonio Cultural", in *VI Congreso Internacional. Restaurar la Memoria*, Junta de Castilla y León, Valladolid, vol. 2.
- V.V.A.A. (2010b). "Fotogrametría y nube de puntos aplicado en la documentación del Patrimonio Construido. El caso de la Torre de la Calahorra en Elche", in *X Congreso Internacional Expresión Gráfica aplicada a la Edificación*, APEGA, pp. 379-388.