

# LEVANTAMIENTO ARQUITECTÓNICO Y ANÁLISIS ARQUEOLÓGICO DEL CASTILLO DE PÍÑAR COMO PUNTO DE PARTIDA PARA SU CONSERVACIÓN

## ARCHITECTURAL SURVEY AND ARCHAEOLOGICAL ANALYSIS OF THE PÍÑAR CASTLE AS A STARTING POINT FOR ITS CONSERVATION

José Antonio Benavides López<sup>a</sup> , José M<sup>a</sup> Martín Civantos<sup>b</sup> , Jorge Rouco Collazo<sup>b,\*</sup> 

<sup>a</sup> Departamento de Expresión Gráfica Arquitectónica y en la Ingeniería, Universidad de Granada, E.T.S. de Ingeniería de Edificación, C/ Doctor Severo Ochoa s/n, 18071 Granada, España. [jbenavid@ugr.es](mailto:jbenavid@ugr.es)

<sup>b</sup> MEMOLab Laboratorio de Arqueología Biocultural, Universidad de Granada, Facultad de Filosofía y Letras s/n, 18071 Granada, España. [civantos@ugr.es](mailto:civantos@ugr.es); [jroucocollozo@gmail.com](mailto:jroucocollozo@gmail.com)

### Highlights:

- Análisis arqueológico y constructivo del castillo, documentando gráficamente su evolución sobre documentos 2D y 3D con tecnología HBIM.
- Se muestra el flujo de trabajo para la obtención de la documentación 3D mediante fotogrametría de imágenes múltiples capturadas con UAV.
- Se describen las ventajas de los modelos PDF-3D como recurso digital para compartir la información 3D georreferenciada de forma fácil y compatible.

### Abstract:

This paper presents an applied methodology for the graphic documentation, analysis and criteria determination for the protection and conservation of built heritage. One of the main risks when restoring medieval rammed earth architecture is the lacking of an optimal graphic base of its structures. This paper's main objective is the holistic knowledge of the Píñar fortress (Granada), analysis the building sequence from an archaeological perspective, and performing a rigorous 3D survey of its structures as a fundamental procedure. This survey was carried out applying the new technologies in graphic documentation: Unmanned Aerial Vehicle (UAV)-based multi-image photogrammetry and Structure-from-Motion (SfM) processing. The new systems of aerial three-dimensional (3D) capture and representation are changing the paradigm in the architectural heritage documentation, being much more efficient and precise. This high-quality documentation is fundamental for the archaeological research of the fortress' building sequence, remarkably easing research as well as results dissemination. The constructive techniques and building sequence study made with archaeological methodology has revealed the complex historical evolution of Píñar fortress, since it was built in the Almo had period, with important transformations in Nasrid and Castilian periods. These alterations in such a narrow span of time shed light on the importance of this fortification in the border organization in the Late Middle Ages. The experimentation with Building Information Modelling (BIM) tools applied to heritage (HBIM) is showing its great potential in processing data linked to conceptual models, integrating graphic documentation with archaeological and historical interpretation. Nevertheless, the complexity of historical buildings and the hard work of manual modelling are making its wider use in archaeology difficult. The BIM model of Píñar fortress has been enriched with data such as type of material, building technique, chronology, pathologies and modifications, differentiating the historical phases with specific colours to make its identification easier. Its aim is to acquire a better knowledge of the fortress historical evolution, thus allowing the creation of conservation and protection strategies. The holistic knowledge of a building is a complex task that requires the work of different professionals. The ones in charge of the graphic documentation must know the survey objectives and the needs of the rest of the team. The current and future management of heritage requires professionals working on conservation with updated skills in digital technologies. The results of public heritage research with these technologies should be in open access platforms to be used by all researchers and professionals that could need them.

**Keywords:** architectural survey; HBIM; graphic documentation; photogrammetry with UAV; building archaeology; defensive architecture

### Resumen:

Este artículo presenta una metodología aplicada para la documentación gráfica, análisis y determinación de los criterios de intervención en la protección y conservación del patrimonio edificado. Uno de los principales riesgos que presentan las intervenciones sobre el patrimonio fortificado en tierra es la falta de una base gráfica óptima. De ahí que el objetivo

\*Corresponding author: Jorge Rouco Collazo, [jroucocollozo@gmail.com](mailto:jroucocollozo@gmail.com)

del presente trabajo sea el conocimiento integral de la fortaleza de Piñar (Granada), realizando el análisis de la secuencia constructiva a partir del levantamiento fotogramétrico SfM (*Structure-from-Motion*) utilizando cámaras montadas sobre UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*), en conjunto con una lectura estratigráfica de paramentos. Este tipo de captura aérea con UAV está transformando los paradigmas en la documentación del patrimonio construido, haciéndola mucho más eficiente y precisa. Esta documentación de gran calidad es la base fundamental para la investigación arqueológica de la evolución de la fortaleza, facilitando enormemente la difusión de los resultados. La investigación arqueológica de la secuencia constructiva ha puesto de manifiesto la compleja evolución histórica de la fortaleza, desde su construcción en época almohade, con importantes transformaciones en época nazarí y castellana, evidencia de su importancia en la defensa de la frontera. La experimentación llevada a cabo con las nuevas herramientas de Modelado de Información para la Construcción (BIM) aplicadas al patrimonio (HBIM) nos ha demostrado su potencialidad en cuanto al tratamiento de los datos asociados a modelos conceptuales, integrando la documentación gráfica con la interpretación arqueológica. El modelado mediante BIM de la fortaleza ha sido enriquecido con datos como materiales, técnicas constructiva, temporalidad, patologías o intervenciones observadas. Su finalidad es la mejor comprensión de la evolución histórica del castillo que permita programar estrategias de intervención para su conservación y mantenimiento.

**Palabras clave:** levantamiento arquitectónico; Modelado Histórico de Información para la Construcción (HBIM); documentación gráfica; fotogrametría con UAV; arqueología de la arquitectura; arquitectura defensiva

## 1. Introducción

La arquitectura defensiva es depositaria de importantes valores patrimoniales que han sido reconocidos desde el punto de vista normativo con el máximo nivel de protección (Ley 16/1985, de 25 de junio, del Patrimonio Histórico Español). Sin embargo, podemos afirmar que han existido dificultades históricas para su amplio conocimiento y conservación. Su localización, por lo general, en sitios alejados o de complicado acceso y su falta de utilidad propician su abandono y, en muchos casos, su ruina. Estas circunstancias quedan reflejadas en el Plan Nacional de Arquitectura Defensiva (Ministerio de Educación, Cultura y Deporte, 2015) donde se plantean propuestas metodológicas que repercutan en el adecuado conocimiento de estos bienes, previas a las actuaciones de conservación, garantizando de este modo que el reconocimiento de sus valores culturales estén apoyados en un óptimo material documental, tanto textual e historiográfico como gráfico.

El objeto del presente artículo es presentar la metodología seguida para realizar una adecuada documentación histórico-constructiva del castillo de Piñar (Granada), desde los procesos de toma de datos mediante técnicas fotogramétricas SfM (*Structure-from-Motion*) con UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*)—drones— y su posterior procesamiento informático, hasta la representación del análisis arqueológico a partir del estudio detallado de los materiales, las técnicas constructivas y sus interrelaciones. Sin lugar a dudas, la documentación gráfica generada nos ha permitido un mejor conocimiento, interpretación y difusión de este bien.

Los avances tecnológicos han propiciado la aparición de herramientas que transforman nuestros modos de registrar la realidad, y por tanto de conocerla. Los nuevos sistemas de control métrico —*Global Navigation Satellite System* (GNSS) de alta precisión, fotogrametría multi-imagen o los escáner láser 3D— han supuesto mejoras significativas en la documentación y registro de los elementos patrimoniales transformando la metodología de trabajo, tanto en el proceso de captura como de representación (Menna, Nocerino, Remondino, Dellepiane, & Callieri, 2016; Nex & Remondino, 2014; Pereira Uzal, 2013; Remondino, Nocerino, Toschi, & Menna, 2017; Rodríguez-Navarro, 2012). Pero este conocimiento debe ir más allá que la mera acumulación de datos para el

análisis material. El objetivo principal es conocer el significado cultural que estos bienes han representado en cada momento de su historia, para poder dirigir adecuadamente las tareas de conservación y difusión.

La fortaleza de Piñar se ubica en la comarca de los Montes Orientales de la provincia de Granada (Fig. 1), en un punto clave para el control de la comunicación entre Jaén y la Hoya de Guadix. Piñar, cuya fase más antigua se remonta al siglo XII a partir de los restos materiales, pues no aparece citado en las fuentes escritas, ganará gran peso dentro de la reorganización nazarí de este sector fronterizo ante el avance feudal. Se convertirá por tanto en un punto de importancia militar y también concentrará a la población del entorno bajo sus murallas, convirtiéndose en una villa de frontera (Malpica & Martín, 2006). Acabará siendo, según las fuentes inmediatas a la conquista, la cabeza de un territorio que incluía a Iznalloz, Montejícar y Arenas (Peinado, 1989). Este papel se ve reflejado en las diferentes reformas que han dejado rastro en su materialidad. El castillo está bien conservado con respecto a su forma original, aunque sus estructuras muestran algunos deterioros, fundamentalmente por su prolongado abandono, lo que ha provocado la caída y desperfectos de sus muros y torres. Ocupa una extensión de unos 3000 m<sup>2</sup>, estando su planta adaptada a la topografía del terreno. Así, su flanco septentrional viene definido por un tajo que imposibilita su acceso, siendo la zona meridional la única accesible por tener una topografía más suave y la que acumula un mayor número de defensas y reformas.

En el castillo de Piñar aparece una variada tipología constructiva consecuencia de sus múltiples intervenciones. Fundamentalmente encontramos dos técnicas constructivas: el tapial y la mampostería en sus diferentes modalidades, pero también encontramos otros materiales y técnicas como sillares y ladrillos aplicados con una finalidad más específica.

## 2. Metodología de registro y documentación

Toda investigación sobre el patrimonio arquitectónico debe considerarse como un método de análisis cuya finalidad es un mejor conocimiento del bien, necesitando para ello una adecuada planificación de acciones y una verificación de resultados (Almagro, 2004).

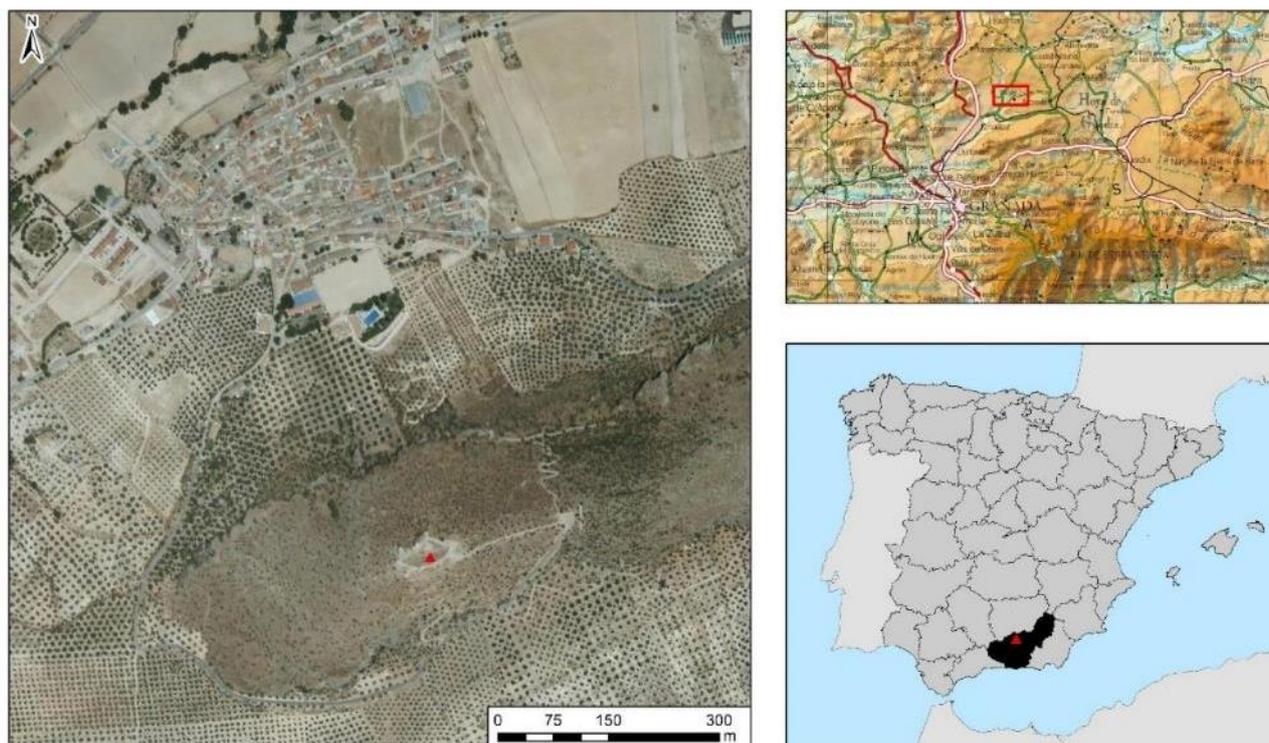


Figura 1: Localización del Castillo de Piñar (Granada, España). UTM30 ETRS89: 461299, 4143566. Mapas base IGN.

Las actuales técnicas de registro y documentación nos permiten obtener un modelo 3D de alta calidad de una forma mucho más precisa y eficiente. La obtención de ortofotografías (Fig. 2) a partir de estos modelos facilita significativamente el trabajo de documentación permitiendo, de una manera justificada, dedicar más tiempo a la verdadera finalidad de nuestro trabajo, el análisis y preservación de los valores culturales materiales de los edificios históricos. Pero este avance tecnológico también provoca inconvenientes. La amplia variedad de instrumentos y técnicas hace que, en muchos casos, no se sepa qué metodología de registro es la más idónea y cuáles deben ser las cualidades exigibles a las nuevas representaciones.

Tras muchas experimentaciones, la fotogrametría, y más en concreto la fotogrametría de imágenes múltiples (SfM), ha demostrado ser el método más adecuado para el fin que nos proponemos. La utilización de esta metodología mediante equipos UAV ha solucionado muchos de los problemas de accesibilidad que, por lo general, presenta la fotogrametría terrestre, planteándose nuevos requisitos para su planificación: tipo de equipo UAV a utilizar, permisos administrativos, altura de vuelo, solape y recubrimiento entre imágenes, horarios para captura, climatología, posición y número de puntos de referencia, tamaño de las dianas, etc.

El registro automático programado de las fotografías en intervalo aproximado de dos segundos hace que dispongamos de una información superabundante para la generación de un modelo 3D completo, con mayor densidad de puntos y con una geometría comparable con la obtenida mediante el escáner láser terrestre de tiempo de vuelo Riegl-Z420i.

Las experimentaciones realizadas mediante diferentes vuelos con distintos equipos<sup>1</sup> han permitido hacer una comparación entre los datos capturados y la calidad de los resultados, estableciendo la siguiente metodología de trabajo (Benavides, 2017).

## 2.1. Apoyo topográfico y georreferenciación

La realización de un modelo preciso y georreferenciado del castillo necesita de un apoyo topográfico que garantice la fiabilidad de sus medidas. La red de puntos de apoyo se realiza colocando dianas sobre el suelo (clavos) y sobre paramentos verticales (adhesivas) en el entorno de los elementos a documentar y que quedarán recogidas en las secuencias de imágenes capturadas por el equipo UAV (Figs. 3 y 4).

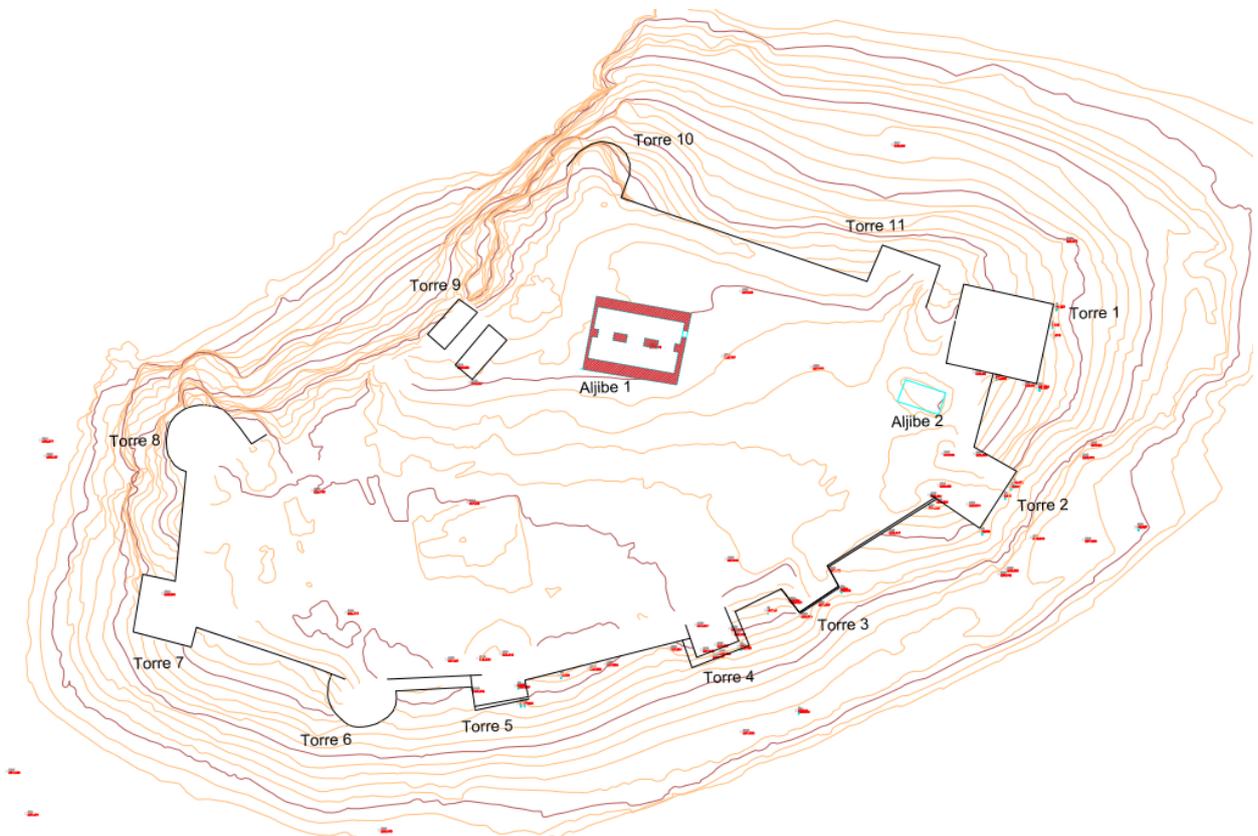
La gran precisión que se logra mediante tecnología GNSS-RTK permite medir puntos en coordenadas absolutas geolocalizadas en el sistema de referencia oficial (UTM-ETRS89), consiguiendo una precisión absoluta mayor (1.6 cm) que la obtenida mediante una poligonal cerrada de múltiples ejes. En todos los casos el equipo utilizado ha sido un GNSS marca Leica modelo Smart Rover 1200 que recibe señales de las constelaciones NAVSTAR-GPS y GLONASS permitiendo mayor cobertura y precisión.

El cálculo de las alturas ortométricas de los puntos de apoyo registrados por GNSS se ha realizado aplicando las correcciones del modelo geoidal EGM08\_RED NAP basado en la red de nivelación de alta precisión para España.

<sup>1</sup> En diciembre de 2014 se realizaron diferentes vuelos del Castillo de Piñar utilizando un equipo UAV DJI Phantom 2 vision plus, posteriormente, en marzo de 2017 se realizarán varios vuelos programados utilizando un equipo DJI Phantom 3 Profesional con diferentes aplicaciones.



**Figura 2:** Vista en planta del castillo de Píñar. Ortophotografía a partir del modelo 3D realizado por fotogrametría SFM mediante UAV.



**Figura 3:** Localización de los puntos de apoyo topográfico realizado por GPS-GPRS y Estación Total.



(a)



(b)

**Figura 4:** Imagen de las dianas correspondientes a: a) los puntos de control en terreno, clavos con diana; b) sobre paramentos, dianas adhesivas.

La georreferenciación precisa de los puntos de apoyo situados sobre los paramentos se realiza mediante la medición con estaciones totales con distanciometría láser estacionadas sobre las bases previamente capturadas mediante GNSS. Para la medición de estos puntos se ha utilizado la estación Leica TCR 805 ultra con distanciometría láser (precisión 3 mm + 3 ppm).

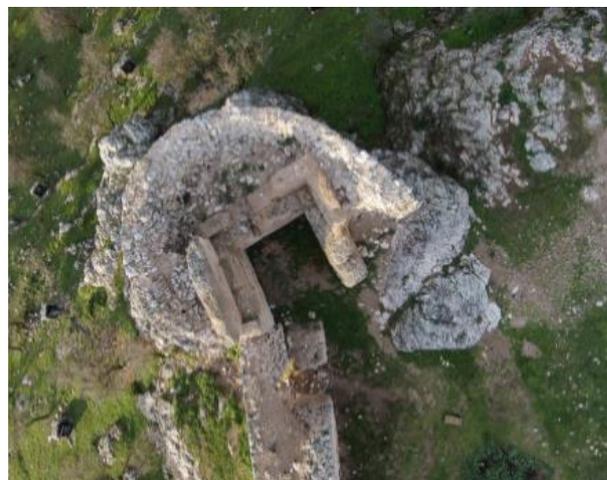
La precisión obtenida en la medición de los puntos de apoyo (GCPs) mediante GNSS-RTK ha sido inferior a 2 cm (Tabla 1), siendo de 5 mm para los GCPs de los paramentos utilizando con estación total.

**Tabla 1:** Errores de los puntos de apoyo GNSS tras el ajuste fotogramétrico realizado con Agisoft Photoscan Pro.

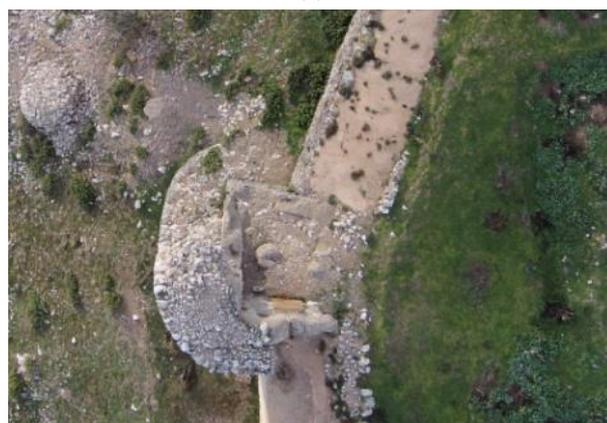
GCP	Error X (cm)	Error Y (cm)	Error Z (cm)	Total (cm)
2	1.85	0.41	0.96	2.13
12	0.80	0.56	0.35	1.04
13	1.15	1.19	0.23	1.68
5	0.83	0.98	0.31	1.33
9	2.34	0.30	0.63	2.45
14	1.22	0.23	0.55	1.36
7	0.54	0.29	0.02	0.61
Total	1.39	0.67	0.53	1.63

## 2.2. Captura de imágenes

La fotogrametría mediante UAV a baja altura aprovecha la gran resolución de las imágenes de objeto cercano con el nuevo punto de vista desde el aire (Fig. 5) evitando las oclusiones propias de la fotogrametría terrestre.



(a)



(b)



(c)

**Figura 5:** Imágenes nadirales capturadas mediante UAV-DJI Phantom 3 profesional correspondientes a las torres del castillo de Piñar: a) 5; b) 7; c) 1.

El vuelo proyectado del castillo de Piñar mediante UAV requiere la programación previa de los parámetros que determinan la buena calidad radiométrica de las imágenes y un adecuado solapamiento tanto longitudinal como transversal. Para la mejor gestión del proceso se han realizado varios vuelos utilizando las aplicaciones para móvil: Map Pilot para sistemas iOS y Litchi para sistema Android (Fig. 6). Dadas las buenas condiciones atmosféricas y de iluminación se programó una velocidad de vuelo del UAV de 1.5 m/s con una altura sobre la explanada de 26 m. En cuanto a los parámetros de captura de imagen, se fijó la apertura de diafragma en f/2.8 con ISO 100, dejando en automático el tiempo de exposición que en nuestro caso variaba entre 1/700s y 1/1100s. Velocidades más que suficientes para que no se produzcan desplazamientos en la imagen.



(a)



(b)

**Figura 6:** Vuelo programado mediante las apps: a) Map Pilot; b) Litchi.

La aplicación Map Pilot ayuda a generar la ruta óptima de vuelo para grandes espacios utilizando el servicio de procesamiento de mapas Made Easy Map<sup>2</sup>. Esta aplicación calcula el número de pasadas a realizar y la velocidad adecuada de la aeronave en función a una serie de parámetros como el área de captura, la altura del vuelo, el tamaño del GSD (*Ground Sampling Distance*, o tamaño del píxel en unidades terreno), el tipo de imagen a capturar (JPG o RAW), el solapamiento de imágenes, etc. De acuerdo a la altura

de las estructuras del castillo y la resolución geométrica de la cámara FC300X que incorpora el UAV DJI Phantom 3 profesional, se ha fijado una altura de vuelo de 26 m para obtener un GSD de 1.1 cm/píxel en la explanada superior del castillo (zona de despegue) siendo el GSD de 0.7 cm/píxel para las zonas más altas de las estructuras y de 1.8 cm/píxel para las zonas más bajas del terreno de alrededor.

Para el cálculo del GSD expresado en cm/píxel se ha utilizado la fórmula (Ec. 1)

$$GSD = \frac{AS * H * 100}{dF * nPixel} \quad (1)$$

donde

AS = Anchura sensor (mm)

H = altura de vuelo o distancia al objeto (m)

dF = Distancia Focal (mm)

nPixel = número de píxel en la anchura del sensor

La sola captura de las imágenes nadirales provoca falta de definición de los elementos verticales (paramentos), siendo necesario realizar otros vuelos perimetrales con captura de imágenes horizontales y oblicuas de los paramentos exteriores e interiores. En este caso la distancia de la cámara a las estructuras oscila entre 14 y 18 m, obteniendo un GSD que varía entre 0.6 y 0.8 cm/píxel. En todos los casos es necesario advertir que para el vuelo programado se necesita tener plena seguridad de la trayectoria del equipo y su altura, siendo obligado el control visual continuo de la aeronave para evitar posibles impactos contra estructuras u objetos.

Factores como la iluminación ambiente condicionan la velocidad de disparo de la cámara, debiendo regularse simultáneamente la velocidad del equipo UAV para evitar el desenfoque de las imágenes por el desplazamiento continuo de la aeronave. La situación ideal consiste en una velocidad de disparo de la cámara lo más alta posible y una velocidad de la aeronave lo más baja posible.

Cámaras con gran ángulo de visión como la FC200 (FOV 110°) que monta el UAV DJI Phantom 2 Vision+ provocan importantes deformaciones en las imágenes (Fig. 7) que pueden ser corregidas por los programas fotogramétricos pero dificultan la correcta construcción del modelo y la aplicación de la textura. Por este motivo, se suelen montar cámaras con menor campo de visión. En nuestro caso, la cámara FC300X que monta el UAV DJI Phantom 3 Pro (Tabla 2, Fig. 8) dispone de un FOV 94° para una focal equivalente de 20 mm con un tamaño de sensor 6.16 x 4.62 mm, y 4000 x 3000 píxeles de resolución. El vuelo de marzo de 2017 realizado por el equipo DJI Phantom 3 Pro ha permitido un mejor registro de las estructuras, mejorando su geometría y disminuyendo el número total de imágenes (602 imágenes), lo que se traduce en una mejora significativa de los tiempos de procesamiento.

### 2.3. Procesamiento fotogramétrico SfM

La precisión y resolución del modelo 3D va a depender de varios factores relacionados con las imágenes fotográficas. Las variables geométricas y radiométricas de las imágenes deben ser controladas y corregidas para garantizar la calidad del trabajo (Kersten & Lindstaedt, 2012; Westoby, Brasington, Glasser,

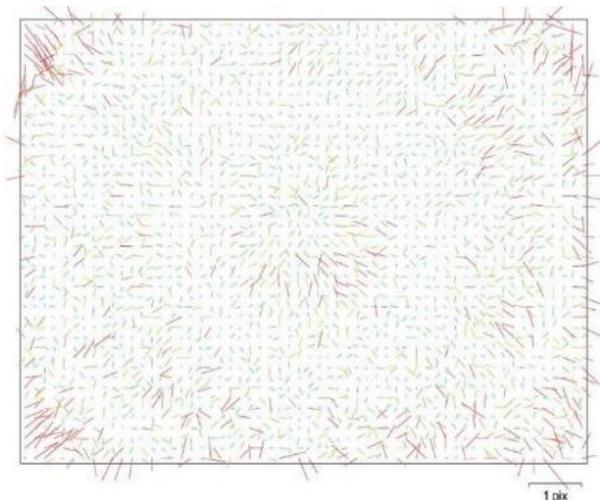
<sup>2</sup> Map Pilot es una app para programación de vuelo UAV en dispositivo móvil: <https://itunes.apple.com/es/app/map-pilot-for-dji/id1014765000?mt=8>



**Figura 7:** Imagen con importantes deformaciones radiales provocadas por la lente de la cámara FC200-Phantom2 visión-plus. FOV 110°.

**Tabla 2:** Características técnicas y parámetros de calibración de la cámara FC300X.

Sensor	Tipo	Cuadro
	Tamaño (mm)	6,16 x 4,62
	Resolución (px)	4000 x 3000
	Píxel (micras)	1.56 x 1.56
Longitud focal	F (px)	2321,35
	F (mm)	3.61
	Distancia focal equivalente (mm)	20
Coordenadas del punto principal	Cx (mm)	3,37376
	Cy (mm)	-12,7354
Coeficientes de distorsión radial	K1	-0,0110793
	K2	0,00988907
	K3	0,00419427
Coeficientes de distorsión tangencial	P1	7.72159e-06
	P2	-0,000276736
Coeficientes de transformación de afinidad y sesgo	B1	-4,12811
	B2	0,740563



**Figura 8:** Gráfico de residuales de los parámetros de distorsión de la cámara FC300X (píxel).

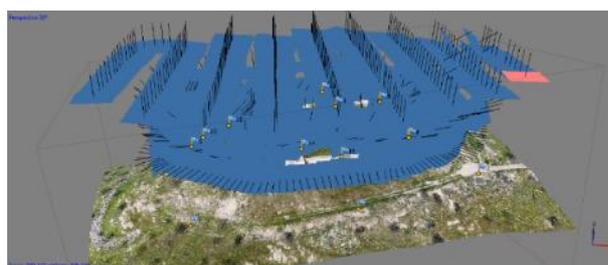
Hambrey, & Reynolds, 2012) . El procesamiento sigue los siguientes pasos (Benavides et al., 2016; Schönberger & Frahm, 2016).

### 2.3.1. Ajuste y orientación de fotografías

Situar y orientar las imágenes en la misma posición relativa en la que se capturaron ha sido y sigue siendo el problema fundamental de la fotogrametría. Este proceso denominado orientación relativa se realiza utilizando algoritmos relacionados con la visión por computador. Por ejemplo, el algoritmo SIFT (*Scale Invariable Feature Transform*) (Lowe, 1999) permite detectar y enlazar miles de puntos singulares por imagen de forma rápida y precisa para posteriormente, mediante el ajuste de haces *Bundle* (Cefalu, Haala, & Fritsch, 2017), correlacionar los puntos homólogos de las imágenes, determinando la posición y orientación relativa de cada una de las cámaras con respecto a las demás.

La orientación relativa de 602 imágenes (Fig. 9) mediante el programa PhotoScan Pro versión 1.4.4 exige establecer un filtro de detección y selección de puntos de nivel medio, reduciendo los tiempos de procesamiento informático. En total se han obtenido 33906 puntos homólogos, datos más que suficientes para el ajuste de todas las imágenes.

En una primera fase, la determinación de la nube de puntos discreta (Fig. 10) solo precisa conocer los parámetros de orientación interna de la cámara, es decir, su geometría y calibración, (centro óptico, deformación radial y tangencial, etc...) (Tabla 2, Fig. 8) (El-Habrouk, Li, & Faig, 1996). En una fase posterior, el modelo se orienta, escala y ajusta con respecto al sistema de referencia definido por los puntos de apoyo (Fig. 4) a través de lo que se denomina orientación absoluta.



**Figura 9:** Situación y orientación de las cámaras en el vuelo del año 2017.



**Figura 10:** Vista en perspectiva de la nube de puntos discreta (puntos unitivos) del castillo de Píñar (33906 puntos).

### 2.3.2. Generación de nube de puntos densa

Calculada la posición y orientación exacta de las cámaras se procede, por intersección múltiple de haces a la generación de una nube de puntos densa, formada por millones de puntos en 3D que se corresponden fielmente con el modelo real objeto de estudio.

Fijar la resolución del modelo es un factor decisivo a la hora de generar nubes de puntos y mallas 3D. Por lo general, esta resolución vendrá fijada por el tamaño del GSD y por las necesidades del estudio. Los modelos muy precisos requieren mayor tiempo de procesamiento generando archivos que pueden ser inmanejables. La nube densa del castillo de Píñar está formada por 11.85 millones de puntos con color homogeneizado correspondiente al píxel de las imágenes.

### 2.3.3. Generación de MDS y MDE

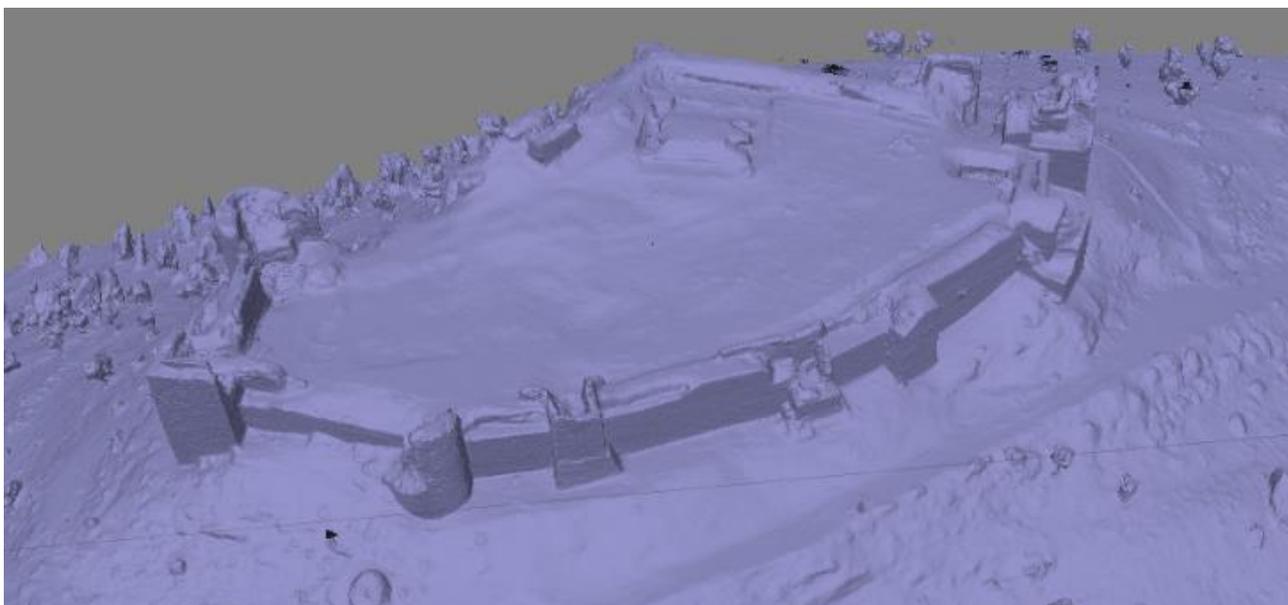
La indefinición de formas que genera la nube de puntos nos plantea la necesidad de disponer de un modelo digital de superficie (MDS) mucho más realista y efectivo (Figs. 11 y 12). Este proceso consiste en la aplicación

de diferentes algoritmos de triangulación, decimado y suavizado, realizado con PhotoScan. La precisión de la superficie generada TIN (*Triangular Irregular Network*) (Peucker, Fowler, & Little, 1978) dependerá de la resolución inicial de la nube de puntos.

Estos modelos constituyen el soporte ideal para la obtención de la documentación gráfica necesaria donde plasmar los resultados del análisis de los elementos patrimoniales. Modelos digitales de elevaciones (MDE) (Fig. 13), micro-topografías u ortofotografías de alta definición (Fig. 14) son utilizados o transferidas a otros programas específicos de gestión para una mejor extracción de la información.

## 3. Evolución constructiva de la fortaleza de Píñar

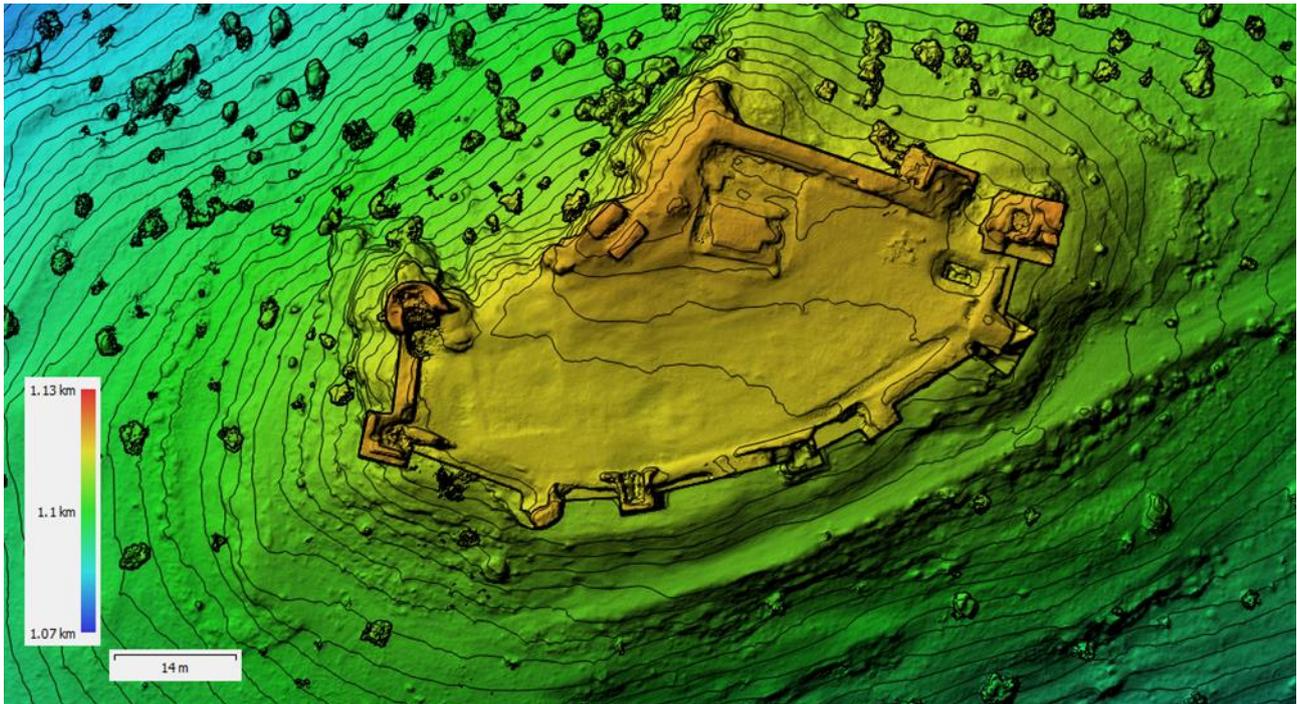
El análisis arqueológico realizado en el castillo de Píñar (Bonet & Martín, 2007; de Luque, 2003), y el estudio de las técnicas constructivas y sus relaciones espaciales, nos ha permitido ordenar una secuencia evolutiva del mismo, intentando establecer su cronología histórica.



**Figura 11:** Perspectiva desde el sur del MDS renderizado sombreado del castillo de Píñar.



**Figura 12:** Perspectiva desde el sur del MDS texturizado del castillo de Píñar.



**Figura 13:** Modelo Digital de Elevaciones (MDE) con resolución de malla de 15 cm y equidistancia de curvas 1 m. El color es función de la altitud sobre el nivel del mar.



**Figura 14:** Ortofotografía del alzado sur del castillo, obtenida a partir del MDS.

La complejidad estructural y de fases del castillo de Píñar y su compleja adaptación al terreno hacen necesario un exhaustivo análisis de campo y el posterior traslado de la información sobre los documentos gráficos previamente generados. La incorporación de ortofotografías de planta y alzados ayudan de manera significativa a su trazado y comprensión.

En el castillo de Píñar se han registrado la existencia de cuatro grandes fases constructivas que afectan a partes o a la totalidad del conjunto, además de una serie de actuaciones concretas de reparación o adecuación.

### 3.1. Fase 1: Tapial de tierra

La primera fase (Fig. 15) se corresponde con una serie de torres y murallas de tapial de tierra, que define un perímetro muy similar al actual. Aunque se trata del mismo tapial, se han registrado algunas variaciones entre el mortero de las torres y el de las murallas, siendo el de estas últimas bastante más rico en cal y con mayor cantidad de cantos, lo que las hace más resistentes.

La ausencia de referencias escritas al castillo de Píñar en fechas anteriores a época nazarí ha planteado problemas a la hora de atribuir cronologías. De igual

manera, el estudio del tapial no ha permitido adscribirlo a ninguna época concreta. Tan solo, se han localizado dos fragmentos de cerámica que de manera probable pertenecen al siglo XII, o sea de época almohade, lo que ha permitido establecer una cronología *post quem* (de Luque, 2003). Esta datación es coherente con la propuesta de sistematización de las técnicas constructivas realizada por Martín (2004) y con la intervención de apoyo a la restauración del castillo dirigida por Bonet & Martín (2007).

### 3.2. Fase 1.2: Reparación estructuras fase I

Tras un análisis minucioso de los paramentos y su ubicación podemos observar que se trata de reparaciones de los muros de tapial de tierra debido al deterioro por humedades del terreno. Esta tesis se fundamenta en que las estructuras encontradas presentan forma irregular. En la mayoría de los casos se trata de emparchados con mampostería que recubrirían los huecos que dejaría el tapial, situándose junto al terreno en las zonas más bajas de la explanada del castillo, donde existe mayor acumulación de aguas de lluvia. Además, la cara interior de estas reparaciones está sin terminar, lo que demuestra que se apoyaban



Figura 15: Dibujo de la fase 1: tapial de tierra sobre ortofotografía en planta del castillo.

directamente sobre el tapial existente, rellenando el hueco que se hubiera producido. Por otro lado, la reconstrucción de trozos de muro en todo su espesor evidencia su derrumbe total.

### 3.3. Fase 1.3: Construcción de torre 4 con tapial real

En el flanco norte hay una torre maciza de tapial real (Fig. 16), construida y apoyada sobre ambos lados de la primera muralla de tapial de tierra, que al haberse perdido deja una especie de pasillo que discurre por en medio de ella (de Luque, 2003). Se trata de una torre de muy buena factura que venía a completar un tramo tan complejo como el de las torres 3 y 5. Las pequeñas dimensiones de la torre y la complejidad del terreno donde se sitúa obligaban a una obra de mejor factura que la ejecución del castillo en su totalidad. Su construcción en una zona de topografía compleja con fuertes desniveles obliga a la realización de una base de mampostería irregular de forma que permitiese nivelar los cajones de tapial.

En el interior del recinto se han localizado dos aljibes. El más antiguo, coetáneo al inicio de la edificación, se sitúa junto a la entrada del castillo, apoyado sobre el lienzo 10. Sus muros son de tapial hormigonado que lo hacen más impermeable.

### 3.4. Fase 2: Reforzamiento de torres y lienzos meridionales con tapial calicostrado

Esta fase consiste en el reforzamiento exterior de las torres 1 y 11, así como de casi todos los lienzos meridionales del castillo mediante la construcción de gruesos muros de tapial calicostrado. Este tipo de tapial



(a)



(b)

Figura 16: Torre 4. Tapial Real sobre mampostería irregular: a) El hueco interior de la torre se corresponde con la antigua muralla de tierra, perdida en la actualidad; b) La compleja topografía obliga a cimentar sobre muros de mampostería concertada que se adaptan a las formas del terreno.

aparece en el periodo tardoalmohade, pero es en época nazarí, durante el reinado de Yusuf I (1333-1354), cuando se generaliza su uso.

### 3.5. Fase 3: Reforzamiento de torres y lienzos con mampostería enripiada

La tercera fase se corresponde con un programa constructivo específico del periodo nazarí de la segunda mitad del siglo XIV, motivado por la aparición de armas de fuego y que se manifiesta en un aparejo de mampostería enripiada y en la alternancia de torres de planta rectangular con sillares de piedra en las esquinas y otras de planta semicircular (Malpica, 1988; Torres, 1949). Sus paramentos exteriores son reforzados mediante un enfoscado rico en cal que deja la piedra vista, realizando un llagueado a modo de vitola. Cronológicamente están bien datadas por corresponderse con un proceso refortificador llevado a cabo por Mohammad V (1354-1359 y 1362-1391) (de Luque, 2003, p. 162).

Es curioso comprobar que la refortificación con mampostería enripiada se ha realizado en aquellas zonas en las que no aparece el refuerzo con tapial calicostrado (Fig. 17). Solamente en la torre 1, coexisten ambas técnicas mediante un pequeño reforzamiento en la puerta de acceso al recinto. La torre 10 y el lienzo 9 son de nueva factura, debiendo sustituir, por lógica constructiva, a otra muralla anterior. De igual modo se construye una nueva torre de mampostería enripiada (torre 6), no habiendo evidencias de alguna anterior.

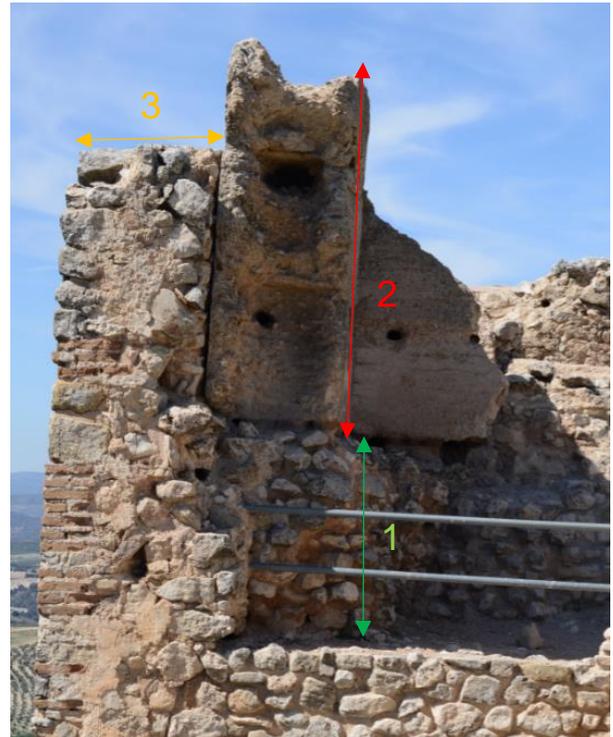
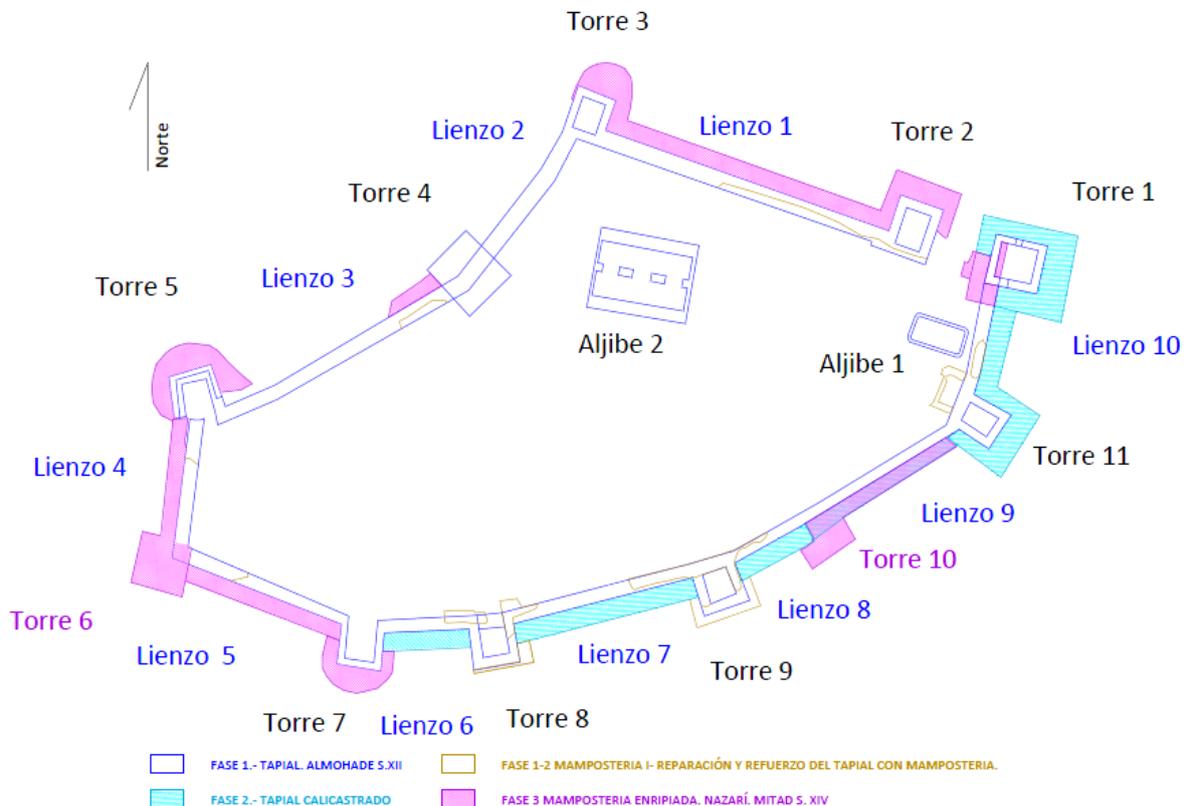


Figura 18: Fase castellana de reconstrucción de la torre 6 en tres sub-fases: 1) Recreido del muro de mampostería; 2) Recreido de la torre con tapial calicostrado; 3) Refuerzo mediante revestido exterior con la construcción de un nuevo muro de mampostería.



JOSE ANTONIO BENAVIDES LOPEZ

FASES CONSTRUCTIVAS DEL CASTILLO DE PIÑAR. FASES I + II + III

Figura 17: Plano de planta con indicación de la fase II-Tapial calicostrado (color cian) y la fase III-Mampostería (color magenta).

La construcción del segundo aljibe no ha podido adscribirse al período almohade o nazarí, pues es en esta época cuando se generaliza esta tipología. Se trata de un aljibe de doble bóveda excavado en roca con muros de tapial de hormigón con encofrado a una cara. Las esquinas interiores se encuentran achaflanadas para evitar las fugas de agua a través de las juntas.

### 3.6. Fase 4: Castellana

En época castellana se ha constatado un pequeño refuerzo en la torre 6 (Fig. 18), mediante la construcción de una estancia con muros del tapial calicostrado sobre la mampostería enripiada de la fase anterior. A esta fase IV hemos añadido igualmente el reforzamiento de la misma mediante un forro de mampostería en los flancos sur y oeste.

### 3.7. Fase 5: Contemporánea

Por último, a lo largo del siglo XX y el XXI se han realizado diferentes obras de restauración para su conservación. En los años 2006-2007 se realizó una intervención arqueológica (Bonet & Martín, 2007) con motivo de la restauración o consolidación de determinados lienzos y torres (torre 2, torre 9, torre 8, lienzo 6, torre 7, lienzo 5, torre 6, lienzo 4 y la bóveda del aljibe 2).

La excavación llevada a cabo en el interior del castillo puso de manifiesto una serie de viviendas, cuya existencia ya era conocida tras una excavación ilegal llevada a cabo en 1994, no pudiéndose precisar si estas viviendas corresponden a época cristiana o islámica. En la actualidad, estas estructuras se encuentran enterradas para evitar su deterioro, pero gracias a los datos capturados en 2009 se ha conseguido realizar un levantamiento que documenta perfectamente su estado y situación (Figs 20, 21).

### 3.8. Ejemplo práctico de lectura de paramentos

Como ejemplo práctico de la utilidad del levantamiento fotogramétrico como base para el análisis de la evolución constructiva, realizamos a continuación el

análisis de tres estructuras de la fortaleza de interés para mostrar su secuencia histórica, siguiendo los presupuestos de la Arqueología de la Arquitectura (Mileto & Vegas, 2003; Martín, Cámara & Murillo, 2018).

La Estructura 1 (E1) se corresponde con la cara externa del lienzo 6 (Fig. 19). Presenta unas medidas de 5.5 m de altura por 6.1 m de anchura. En su parte inferior se encuentra la Unidad Estratigráfica (UE) 03, un zócalo de mampostería concertada de mampuestos de mediano tamaño trabados con un mortero de cal blanquecino con árido fino de cantera. Esta cimentación está cubierta por la UE 13, un llagueado en vitolas realizado con un mortero de cal blanco y acabado alisado que deja a la vista la cara de los mampuestos. Se trata de un elemento que, además de proteger las juntas de mortero, tiene una función decorativa y acostumbra a corresponderse con una técnica de época nazarí. Sobre la UE 03 se apoya la 01. Es una tapia calicostrada que constituiría la mayor parte del paramento medieval. Esta técnica es habitual en territorio granadino desde época almohade (Martín, 2009). De color marrón rojizo, está compuesta por una costra de mortero de cal en el que se aprecia árido muy fino con abundancia de chinos y una pequeña proporción de grava, con nódulos de cal. En los puntos en los que la costra se ha deteriorado más puede observarse que el núcleo es de tierra grisácea con cal y poco árido. En algunas partes parece conservar los restos de un enlucido de cal que en algún momento recubrió la cara externa.

La UE 01 es cubierta por la 02, una tapia de color marrón claro-rojiza realizada en la restauración del año 2009, que reconstruye actualmente la mayor parte del lienzo. En la parte inferior, a 02 se le une la 06, un mortero de cal rojiza y acabado basto por la cantidad de árido que cubre a las UEs 03 y 13. Sobre 02 se encuentra 04, un mortero equivalente a la 06. Bajo 04 se observa la existencia de otra UE, la 05. Se trata de los restos de un alzado en mampostería no concertada trabada con mortero de cal, cuyas relaciones con el resto de las UEs de la E1 no se apreciarían por encontrarse parcialmente cubierta por 04, pero se trataría de parte de las reparaciones medievales de la fase 1.2.

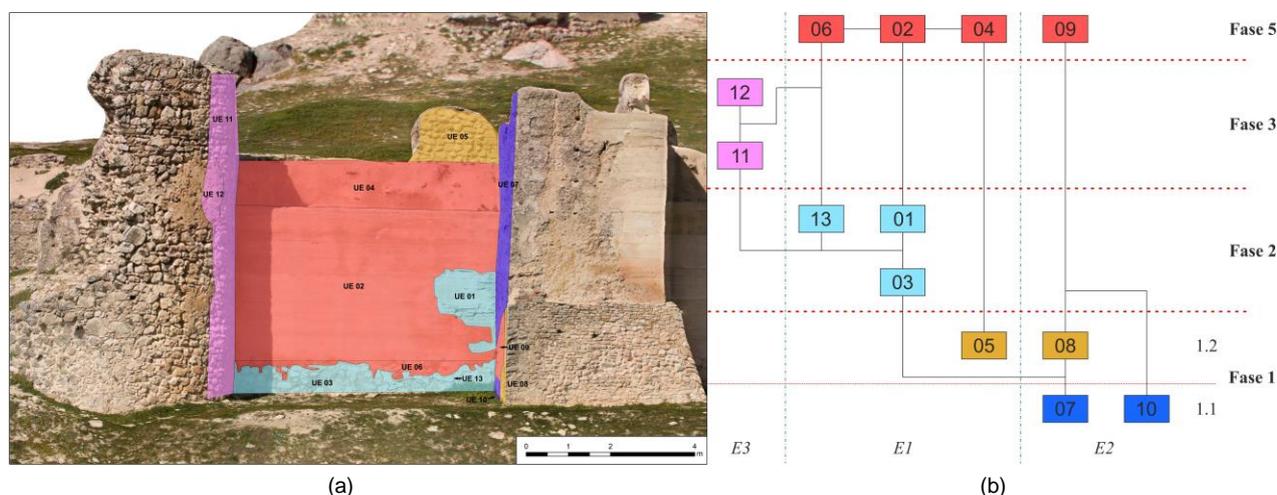


Figura 19: a) Unidades Estratigráficas y b) matriz de la secuencia constructiva de las Estructuras 1, 2 y 3.

LEVANTAMIENTO ARQUITECTÓNICO Y ANÁLISIS ARQUEOLÓGICO DEL CASTILLO DE PÍÑAR COMO PUNTO DE PARTIDA PARA SU CONSERVACIÓN

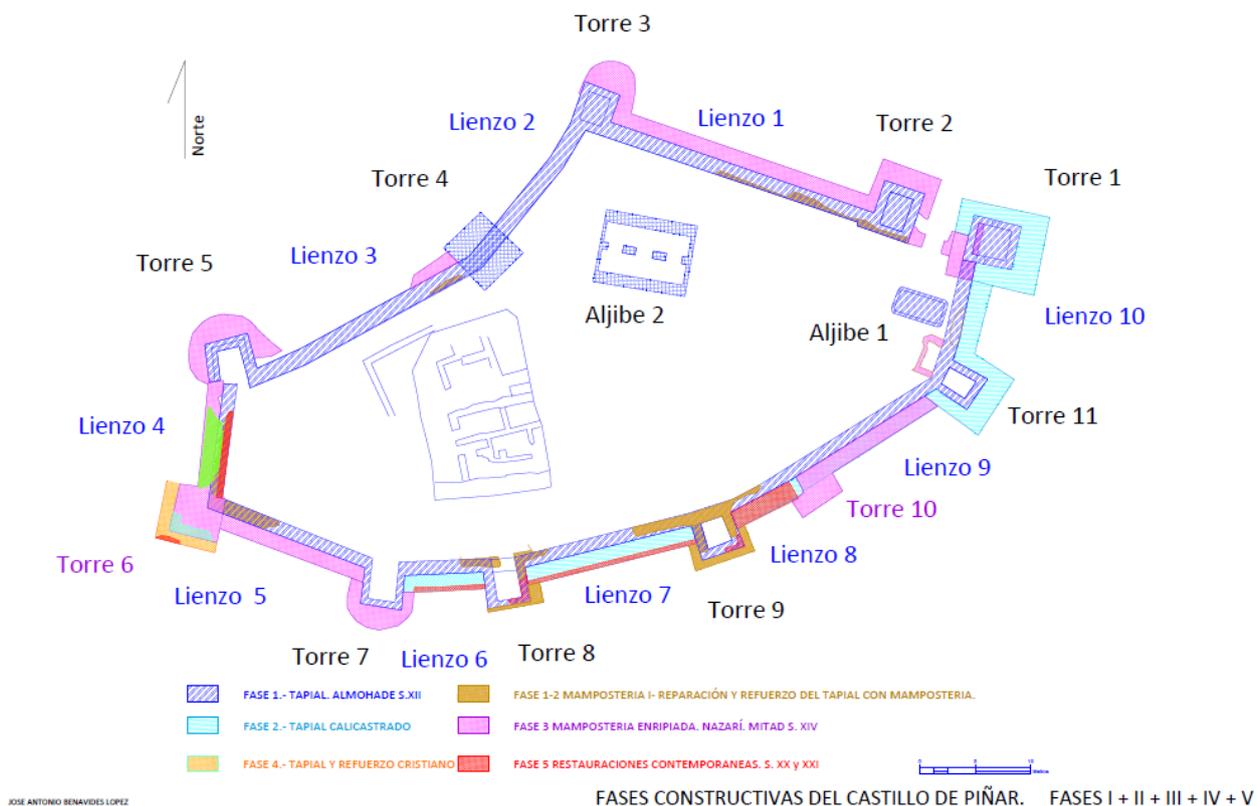
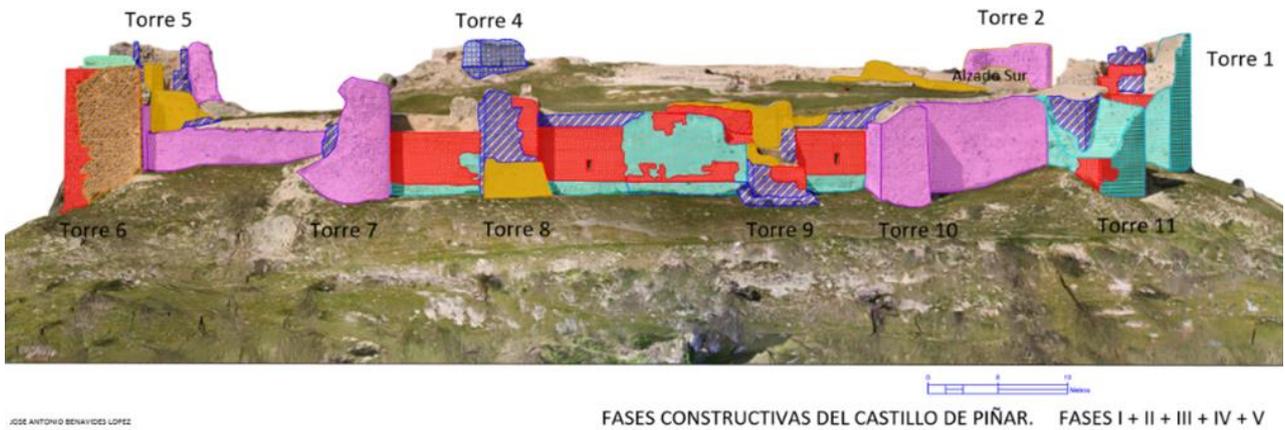


Figura 20: Plano de planta con indicación de todas las fases constructivas. En el interior se muestran las estructuras de las viviendas actualmente enterradas.

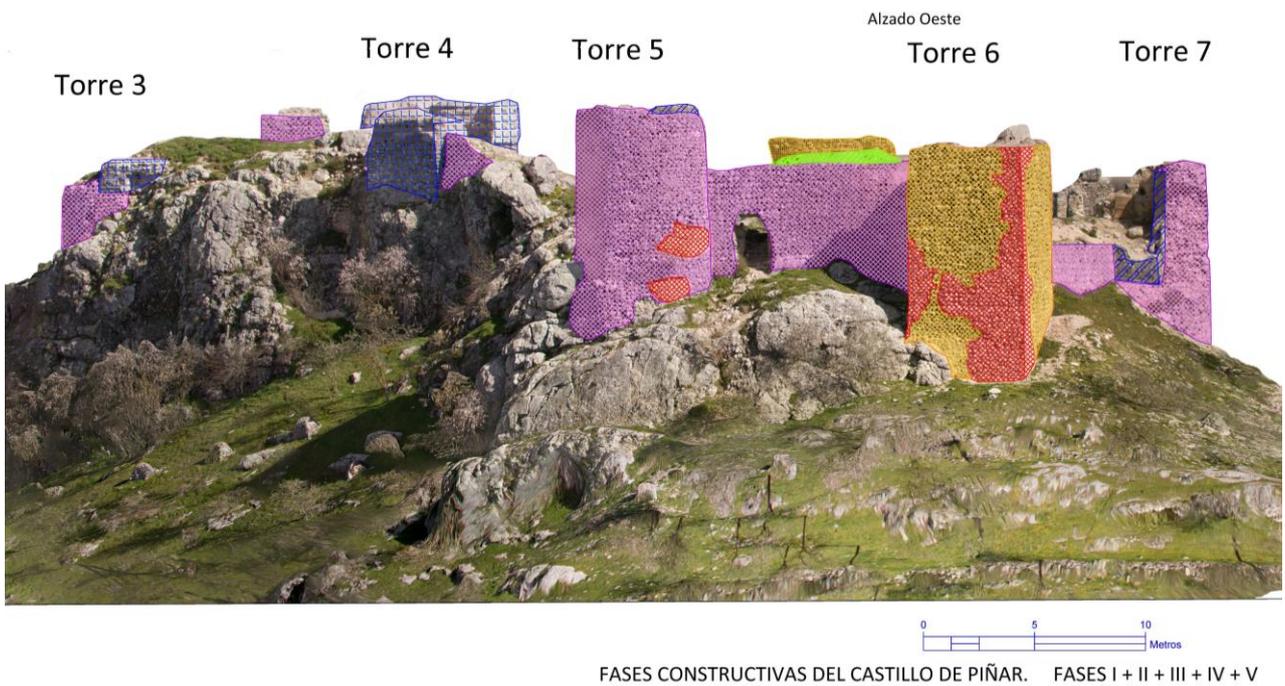


Figura 21: Representación de todas las fases constructivas sobre la ortofotografía de planta. En el interior se muestran las estructuras de las viviendas actualmente enterradas.



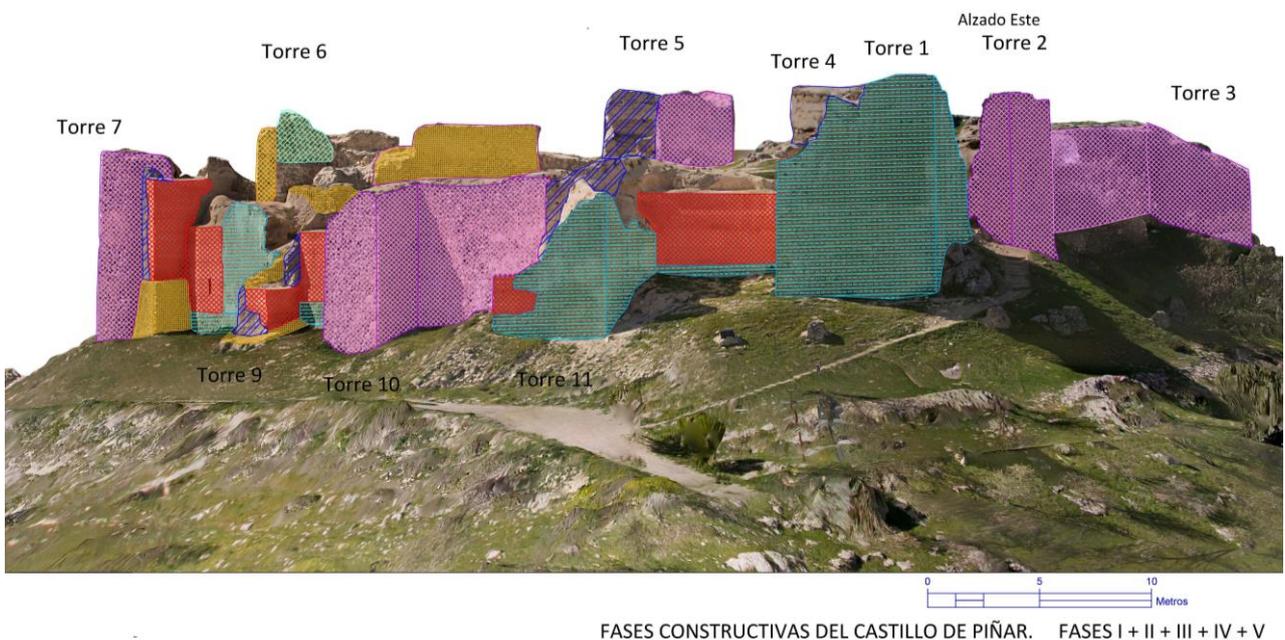
FASES CONSTRUCTIVAS DEL CASTILLO DE PIÑAR. FASES I + II + III + IV + V

**Figura 22:** Estratigrafía sobre ortofotografía del alzado sur en base al estudio arqueológico.



FASES CONSTRUCTIVAS DEL CASTILLO DE PIÑAR. FASES I + II + III + IV + V

**Figura 23:** Alzado oeste. Definición de las fases constructivas, en base al estudio arqueológico.



FASES CONSTRUCTIVAS DEL CASTILLO DE PIÑAR. FASES I + II + III + IV + V

**Figura 24:** Alzado este. Descripción de las fases constructivas, en base al estudio arqueológico.

La E2 se corresponde con la cara exterior oeste de la torre 8. Este paramento estaría realizado inicialmente con una tapia de tierra que se observa en las UEs equivalentes 07, situada en el centro y la parte superior de la E, y 010, en su parte inferior. Son UEs rojizas, construidas con tierra y abundante cal. El árido sería de mediano tamaño y bastante abundante para darle mayor consistencia. A la UE 07 se le apoya la tapia calicostrada (UE 02 de E1), por lo que sería anterior a este, y se observa un mechinal en su parte media. A la 010 se le apoya en su extremo derecho la UE 08. Se trata de un refuerzo de mampostería concertada, a modo de pie amigo, trabado con mortero de cal, realizado ante los problemas de conservación de la esquina de la torre, ya en época medieval. La secuencia de la E2 se finaliza con la UE 09, un mortero de restauración equivalente al de las UE 04 y 06 de la E1 que cubre a las tres UEs de esta fachada.

Por última, la E3 es la cara este de la torre 7. Está formada en toda su altura por la UE 011. Se trata de un forro semicircular de mampostería de gran tamaño enripiada con lajas. Se traba con un mortero de cal grisáceo con árido fino. Se apoya en la UE 03 de la E1, por lo que sería una fase sucesiva. En la parte superior, se conservan restos de un envitolado en cal marrón que cubre a los mampuestos de la UE 011. Esta técnica constructiva sería atribuida tradicionalmente al programa edilicio de época de Muhammad V, monarca nazarí que gobernaría durante la mayor parte del siglo XIV (Acién, 1999). Puede observarse por tanto en estas tres estructuras la evolución constructiva de las cuatro fases andalusíes, iniciándose con la fase 1 tapia de tierra (UEs 07 y 010), a la que se le realizan en la fase 1.2 reparaciones en mampostería (UEs 05 y 08). Posteriormente, la fortaleza será recrecida con tapia calicostrada en la fase 2 (UEs 01, 03 y 13) y se reforzarán algunos puntos con mampostería enripiada en la fase 3 (UEs 011 y 012). Todo ello en los escasos siglos que van desde su primera fase documentada a partir de época almohade (de Luque, 2003, pp. 159-164), finales del siglo XII, hasta la conquista castellana a finales del XV. El levantamiento 3D resulta base fundamental para el aparato gráfico de este análisis de Arqueología de la Arquitectura (Brogiolo, 1988), al permitir una documentación casi fotorrealista con dimensiones reales, lo que facilita la interpretación de la secuencia y su difusión.

Como se puede observar, la sola representación de la planta (Fig. 20) resulta insuficiente para definir la complejidad estructural del castillo y sus fases constructivas lo que nos obliga a trabajar sobre modelos virtuales 3D o sobre ortofotografías de los diferentes alzados.

El soporte gráfico que suponen las ortofotografías de planta (Fig. 21) y alzados (Figs. 22, 23, 24) han permitido plasmar de manera precisa cada una de las fases constructivas.

#### 4. BIM aplicado a la documentación y registro del castillo de Píñar

El BIM (*Building Information Modelling*) es una técnica de modelado sólido paramétrico en tres dimensiones basado en elementos constructivos capaces de integrar información de tipo material, histórico, de gestión, etc., en base a una herramienta gráfica 3D que ayuda a comprender mejor el objeto arquitectónico,

convirtiéndolo en un gran contenedor y organizador de la información. Es decir, el modelado 3D mediante esta herramienta consiste en realizar un modelo digital en 3D donde las formas no son meros gráficos vectoriales sino objetos con cualidades semánticas bien determinadas dentro de un entorno gráfico que permita su fácil visualización y edición (Angulo, 2012).

Por lo general, los nuevos sistemas BIM específicos para edificios históricos (HBIM) utilizan bibliotecas de elementos constructivos históricos que se definen paramétricamente (Paris & Wahbeh, 2016). Diferentes investigadores han desarrollado metodologías eficientes para la generación de modelos BIM que permiten una mejor gestión de los edificios patrimoniales (Bruno, De Fino & Fatiguso, 2018; Dore et al., 2015; Murphy, McGovern, & Pavia, 2013; Nieto & Moyano, 2014), o donde se describen las bondades e inconvenientes de su aplicación sobre las construcciones históricas debido a la irregularidad que presentan las estructuras, la falta de homogeneidad de los materiales y las alteraciones propias del tiempo (Antón, Medjdoub, Shrahily, & Moyano, 2018; Nieto, Moyano, & García, 2019).

La investigación realizada mediante BIM en el castillo de Píñar ha demostrado la eficacia en la documentación y registro de las fases constructivas como elemento fundamental de cara a las tareas de gestión, conservación y difusión.

Para nuestra investigación hemos desarrollado un modelo conceptual mediante la herramienta Revit® v. 2018 (Autodesk) utilizando como soporte la nube de puntos previamente generada (Fig. 25), de forma similar al modelado de objetos de ingeniería inversa. La complejidad de situar la posición exacta de los objetos paramétricos sobre la nube de puntos 3D hace que la solución propuesta pase por simplificar el modelo en base a secciones de espesor definido o sobre vistas 2D para posteriormente editarlos y ajustarlos al modelo 3D. Pero el objetivo de nuestro modelado BIM no ha sido el obtener un modelo 3D preciso que reproduzca las formas reales sino generar una metodología eficiente para la gestión de los datos, mucho más intuitiva y rápida, que nos ayude en el proceso de toma de decisiones en las tareas de conservación.

Conocer la evolución histórica de un edificio resulta esencial para comprender sus transformaciones constructivas, evaluando el estado de conservación o degradación. La introducción del factor tiempo en estos modelos facilita su comprensión permitiéndonos plantear estrategias de intervención (Bruno, Musicco, Fatiguso, & Dell'Osso, 2019).

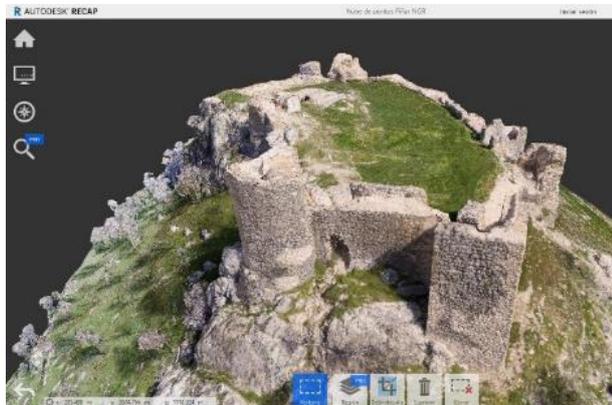
Este proceso requiere la reconversión de las nubes de puntos en el formato compatible (\*.RCS) o (.RCP) mediante el software de Autodesk Recap. Para no colapsar el equipo informático por el excesivo peso de los archivos de nubes de puntos (975 Mb para el castillo de Píñar) se recomienda compartimentar los ficheros en zonas de trabajo. Por otro lado, es de suma importancia que los datos se inserten en sus georreferencias exactas, para lo cual habrá que tener en cuenta tanto las unidades métricas de los modelos como el punto origen de georreferencia. En este sentido, hay que advertir que si bien el programa Recap admite nubes de puntos en coordenadas georreferenciadas UTM-ETRS89, no ocurre lo mismo con el programa Revit. Este no admite distancias mayores de 16 km y por tanto no es capaz de importar nubes de puntos con



**Figura 25:** Modelado paramétrico de las estructuras correspondientes a la fase I en base a la inserción (vinculo) de la nube de puntos georreferenciada.

coordenadas UTM, teniendo que recurrir al artificio de desplazar el sistema de referencia para que el modelo de nube de puntos tenga unas coordenadas próximas a las del origen, trasladando un número entero de metros en X e Y como se explica en el siguiente ejemplo (Fig. 26).

Un punto de coordenadas reales  $X= 461339.3180$ ,  $Y=4143562.4234$ ,  $Z= 1106.9487$  se traslada restando un valor elegido (p. ej. 461000 m en X y 4140000 m en Y, y 0.00 m en Z) dando lugar a su homólogo de coordenadas no georreferenciadas  $X=339.3180$ ,  $Y=3562.4234$ ,  $Z=1106.9487$



**Figura 26:** Nube de puntos importado en software Recap® con coordenadas no georreferenciadas para que pueda ser importado posteriormente en Revit®.

Esta tarea que parece compleja se realiza de forma automática con todos los puntos seleccionados en el proceso de exportar la nube de puntos del modelo a un archivo de guardado en formato tipo TXT, LAS, LAZ, e57, entre otros.

El modelado paramétrico de las estructuras del castillo (Figs. 27 y 28) se ha realizado mediante la extrusión y edición de las formas irregulares que definen las UEs, posteriormente se ha enriqueciendo mediante la inclusión de sus características materiales y constructivas. El uso del color resulta fundamental en la diferenciación tipológica de las fases.

Estos modelos BIM son una importante herramienta para el conocimiento, gestión y difusión de los bienes patrimoniales.

## 5. Accesibilidad y difusión de los datos

En la actualidad, todos los datos se recopilan, almacenan, procesan y analizan mediante el uso de herramientas digitales (Previtali & Valente, 2019). De igual manera, las tecnologías digitales facilitan el intercambio y la interoperabilidad entre los agentes intervinientes pero que muchos casos quedan restringidos a su uso particular. Por ello, entendemos que todas las investigaciones e intervenciones realizadas con dinero público deben estar abiertas y disponibles a todos los interesados facilitando su acceso a través de plataformas y software libre.

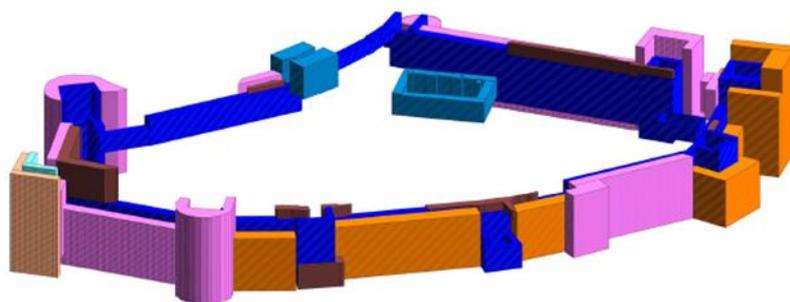
Pero todas las ventajas que aportan los modelos digitales 3D y su libre disposición chocan frontalmente con la falta de capacitación técnica por parte de los muchos investigadores y profesionales que intervienen en el conocimiento y gestión del patrimonio. Las nuevas posibilidades que nos ofrece la gestión de modelos 3D generados mediante la herramienta PDF-3D (Adobe Acrobat), permiten la obtención, gestión y difusión de documentos gráficos a partir de modelos 3D sin la necesidad de disponer de costosos programas informáticos. La facilidad de manejo y operatividad de esta herramienta la convierte en un instrumento ideal para visualizar y obtener la documentación gráfica realizada sobre un bien, permitiendo a otros profesionales, investigadores y administraciones utilizarlos como fuente de información para futuras intervenciones o investigaciones. Este tipo de modelos cumplen además el requisito de estar georreferenciados en coordenadas universales. Por este motivo, entendemos que este tipo de modelos debe ser uno de los requisitos mínimos exigidos por las administraciones para la gestión actual y futura de los bienes patrimoniales<sup>3</sup>. Existen además actualmente distintas plataformas web (3DHOP, Sketchfab) que permiten la subida y visualización de modelos 3D con alta calidad, lo que ofrece unas interesantes posibilidades de difusión no solo a nivel académico y técnico, sino también del público general (Scopigno, Callieri, Dellepiane, Ponchio, & Potenziani, 2017; Statham, 2019).

<sup>3</sup> Modelo PDF-3D del castillo de Piñar accesible en el repositorio institucional de la Universidad de Granada (<http://hdl.handle.net/10481/57136>)

# LEVANTAMIENTO ARQUITECTÓNICO Y ANÁLISIS ARQUEOLÓGICO DEL CASTILLO DE PÍÑAR COMO PUNTO DE PARTIDA PARA SU CONSERVACIÓN



PERSPECTIVA DESDE EL  
SUR



PERSPECTIVA DESDE EL  
SUR SIN VE

**Figura 27:** Modelado paramétrico de las estructuras correspondientes a todas las fases constructivas del castillo de Píñar. El color constituye un elemento fundamental en la identificación de las estructuras.



**Figura 28:** Infografía de hipótesis de reconstrucción de las torres 1, 2, 10 y 11 en diferentes materiales.

De igual forma, los resultados obtenidos han servido de base para realizar diferentes infografías e hipótesis de reconstrucción virtual que permiten analizar y evaluar el impacto de las propuestas de intervención planteadas por los equipos de conservación o restauración (Fig 28).

## 6. Discusión

Según nuestros resultados, los modelos digitales obtenidos por fotogrametría multi-imagen realizados a partir de vuelos con UAV se han convertido en la mejor herramienta de adquisición de datos geoespaciales, permitiendo un registro completo, rápido y de calidad de la geometría y textura de los elementos patrimoniales. El punto de vista que proporcionan los UAVs permite el registro de las estructuras incluso en aquellas zonas inaccesibles para el resto de los métodos, algo de gran utilidad dado la habitual ubicación en topografías de difícil acceso en el que se emplazan las fortificaciones medievales.

El flujo de trabajo presentado permite obtener representaciones tecnológicas de alta calidad de forma rápida y precisa sin apenas interrumpir el resto de tareas a desarrollar.

Las experimentaciones realizadas con diferentes objetivos con ángulos de visión mayor de 80° (súper gran angular) provocan distorsiones en la imagen que se traducen en un peor ajuste geométrico y radiométrico del modelo resultante. El mayor FOV de la cámara FC200 (110°) produce un peor ajuste (RMS 0.06 m) que los obtenidos con la cámara FC300X (FOV 94°), lo que nos ha permitido obtener el modelo del castillo de Píñar con una mejor geometría (RMS 0.02 m) y una excelente textura. La realización del vuelo programado mediante la utilización de app instaladas en el teléfono inteligente (Map Pilot y Litchi) ha mejorado considerablemente el registro respecto del vuelo realizado mediante control manual, consiguiendo disminuir el número de imágenes y proporcionando una mejor distribución geométrica de las mismas, reduciendo el tiempo de captura y mejorando la calidad geométrica y radiométrica del modelo.

El vuelo programado mediante estas aplicaciones inhibe al operador de tener que controlar la posición, desplazamiento y velocidad de la aeronave en todo momento, pudiendo dedicarse a controlar y optimizar los parámetros necesarios para la captura fotográfica, mejorando la calidad radiométrica de las imágenes.

En cuanto al coste, la fotogrametría SfM constituye la opción más económica. En nuestro caso, el equipo se limita a un UAV semiprofesional cuyo precio ronda los 1500€, un equipo topográfico formado por una estación total y un GNSS para captura de puntos apoyo (equipos fácilmente alquilables) y un software de procesamiento comercial o libre: Agisoft PhotoScan Pro® y Recap Photo® de Autodesk®.

El BIM del castillo de Píñar ha demostrado ser una eficaz herramienta para la documentación y registro de las fases constructivas, permitiendo una mejor comprensión y difusión. Pero este modelado paramétrico de los edificios históricos aún presenta serios inconvenientes, ya que no permite todavía reflejar la complejidad de formas que este presenta, siendo además una tarea manual en la que se emplea mucho tiempo (Nieto, Moyano & García, 2019). Por tanto, su

verdadera potencialidad radica en la futura gestión de la información asociada a los modelos conceptuales.

La importante especialización que requiere el uso de las herramientas tecnológicas o el análisis arqueológico y de materiales obliga a la creación de equipos interdisciplinares con funciones bien definidas pero que deben estar coordinadas de forma que se incremente el conocimiento de los bienes patrimoniales y una mejor optimización de los recursos (Martín, Cámara & Murillo, 2018).

Los organismos encargados de gestionar el patrimonio deben hacer un esfuerzo importante para adaptarse a las nuevas tecnologías formando a sus equipos en las nuevas metodologías de trabajo. Parece curioso que, siendo obligatorio desde diciembre de 2018 la ejecución en BIM todos los proyectos constructivos de edificación con financiación pública, aún la mayoría de los profesionales encargados de gestionarlos no estén formados.

## 7. Conclusiones

El desarrollo tecnológico digital ha modificado por completo la metodología de registro y documentación del patrimonio arquitectónico y arqueológico haciéndolo mucho más eficiente y preciso, pero necesita de una importante especialización técnica para que los resultados sean adecuados. Se requieren importantes conocimientos de topografía, procesamiento informático, manejo y normativa de UAVs, así como de normalización respecto de los sistemas de representación.

La generación de modelos digitales 3D de los edificios históricos mejora considerablemente la obtención de datos y su posterior gestión. La documentación gráfica constituye una herramienta fundamental donde plasmar el análisis de la morfología de sus estructuras y la tipología de los materiales, permite además el análisis de la evolución histórica del edificio mediante el estudio y documentación de sus fases constructivas y sus interrelaciones o incluso, el análisis de sus patologías para determinar sus causas. De igual modo, la documentación gráfica obtenida constituye el soporte ideal donde plasmar las propuestas de intervención o conservación y un medio imprescindible su investigación y difusión.

La evaluación de los modelos 3D del castillo de Píñar obtenidos mediante diferentes tecnologías –escáner láser ToF y fotogrametría de imágenes múltiples capturadas desde UAV– ha demostrado la mayor calidad y facilidad de las técnicas fotogramétricas. La economía de medios, la reducción considerable de tiempo en la toma de datos, la capacidad y precisión para la captura de formas complejas o la representación hiperrealista de las texturas lo convierten en un importante medio para la documentación del patrimonio arquitectónico y arqueológico.

La utilización de UAVs ha facilitado enormemente el registro de datos. La captura de imágenes desde el aire nos permite obtener puntos de vista imposibles de realizar por cualquier otro método.

La complejidad estructural o histórica de cualquier elemento patrimonial resulta imposible de definir con la sola representación de su planta. La generación de ortofotografías de planta, alzados y secciones a partir de

los modelos virtuales 3D constituye una herramienta fundamental para la mejor y más completa documentación de los elementos patrimoniales, justificando el análisis realizado o su posterior reinterpretación, incluso cuando estos hayan quedado ocultos o desaparecido por motivos de protección, intervención o catástrofe.

Pese a estas ventajas y avances, es necesario seguir experimentando y avanzando, no solo en los flujos de trabajo que permitan mejorar los procesos de toma de datos y su elaboración en campo y en laboratorio, sino sobre todo la integración de los modelos 3D con la información alfanumérica, con la secuencia diacrónica de construcción/deposición y con la complejidad topográfica y geométrica de las formas con las que trabajamos. Respecto al primer aspecto, es mucho lo que hemos conseguido avanzar gracias a la aplicación de diferentes técnicas y metodologías de trabajo y es un aspecto sobre el que hemos abundado a lo largo de este texto. Sobre el resto de problemáticas, es necesario seguir avanzando rompiendo los actuales límites de los sistemas de documentación y registro. Este es un aspecto que depende fundamentalmente de los progresos en el ámbito de la ingeniería informática, de manera que puedan llegar a implementarse sistemas

aún más complejos como los Sistemas de Información Geográfica (GIS) 3D, la posibilidad de dibujar en 3D superficies irregulares complejas como las de los elementos patrimoniales o la integración del factor tiempo, de la diacronía, como una parte esencial en la construcción de las edificaciones históricas y la generación de depósitos arqueológicos. Herramientas como los BIM están empezando a romper algunos de estos límites y están permitiendo explorar nuevas posibilidades de trabajo, pero es necesario seguir avanzando, experimentando con las aplicaciones y técnicas, explotando sus posibilidades y planteando nuevos retos en la representación y el análisis del patrimonio histórico.

## Agradecimientos

Este trabajo ha formado parte del proyecto I+D+i PREFORTI (BIA2015 69938-R) titulado "Metodología sostenible de conservación y mantenimiento de fortificaciones medievales de tierra del sudeste de la Península Ibérica. Diagnóstico y prevención ante riesgos naturales y antrópicos" el cual ha sido financiado por la Agencia Estatal de Investigación y el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER).

## Referencias

- Acién, M. (1999). Los tugur del reino de Granada. Ensayo de identificación. In A. Bazzana (Ed.), *Castrum 5. Archéologie des spaces agraires méditerranéens au Moyen Âge* (pp. 427–438). Madrid: Casa de Velázquez.
- Almagro, A. (2004). *Levantamiento arquitectónico*. Granada: Universidad de Granada.
- Angulo, R. (2012). Construcción de la base gráfica para un sistema de información y gestión del patrimonio arquitectónico: Casa de Hylas. *Arqueología de la Arquitectura*, 9, 11–25. <https://doi.org/10.3989/arqarqt.2012.10005>
- Antón, D., Medjdoub, B., Shrahily, R., & Moyano, J. (2018). Accuracy evaluation of the semi-automatic 3D modeling for historical building information models. *International Journal of Architectural Heritage*, 12(5), 790–805. <https://doi.org/10.1080/15583058.2017.1415391>
- Benavides, J. A., Aranda, G., Sánchez, M., Alarcón, E., Fernández, S., Lozano, Á., & Esquivel, J. A. (2016). 3D modelling in archaeology: the application of Structure from Motion methods to the study of the megalithic necropolis of Panoria (Granada, Spain). *Journal of Archaeological Science: Reports*, 10, 495–506. <https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2016.11.022>
- Benavides López, J.A. (2017). *Nuevas tecnologías en la documentación del patrimonio: La alcazaba de Guadix. El castillo de Píñar* (Tesis doctoral, Universidad de Granada, España). <http://hdl.handle.net/10481/47477>
- Bonet, M. T., & Martín, J. M. (2007). Informe preliminar de la intervención arqueológica de apoyo a la restauración del castillo de Píñar (Píñar, Granada). Granada.
- Brogiolo, G. P. (1988). *Archeologia dell'edilizia storica*. Como: Edizioni New Press.
- Bruno, S., De Fino, M., & Fatiguso, F. (2018). Historic Building Information Modelling: performance assessment for diagnosis-aided information modelling and management. *Automation in Construction*, 86, 256–276. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2017.11.009>
- Bruno, S., Musicco, A., Fatiguso, F., & Dell'Osso, G. R. (2019). The role of 4D historic building information modelling and management in the analysis of constructive evolution and decay condition within the refurbishment process. *International Journal of Architectural Heritage*. <https://doi.org/10.1080/15583058.2019.1668494>
- Cefalu, A., Haala, N., & Fritsch, D. (2017). Hierarchical Structure from Motion combining global image orientation and structureless bundle adjustment. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information System*, XLII-1/W1, 535–542. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-1-W1-535-2017>
- de Luque, F. (2003). *El castillo de Píñar: análisis arqueológico de las estructuras de superficie*. Granada: Nailos.
- Dore, C., Murphy, M., Mccarht, S., Brechin, F., Casidy, C., & Dirix, E. (2015). Structural simulations and analysis of conservation - historical building information modeling (HBIM). *International Archives of the Photogrammetry, Remote*

*Sensing and Spatial Information Sciences, XL-5/W4*, 351–357. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-5-W4-351-2015>

- El-Habrouk, H., Li, X. P., & Faig, W. (1996). Determination of geometric characteristics of a digital camera by self-calibration. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XXI-B1*, 60–64.
- Kersten, T. P., & Lindstaedt, M. (2012). Automatic 3D object reconstruction from multiple images for architectural, cultural heritage and archaeological applications using open-source software and web services. *Photogrammetrie - Fernerkundung - Geoinformation*, 2012(6), 727–740. <https://doi.org/10.1127/1432-8364/2012/0152>
- Lowe, D. (1999). Object recognition from local scale-invariant features. In *The Proceedings of the Seventh IEEE International Conference on Computer Vision, Vol. 2* (pp. 1150–1157). Washington: IEEE Computer Society. <https://doi.org/10.1109/ICCV.1999.790410>
- Malpica, A. (1998). Los castillos en época nazarí. Una primera aproximación. In A. Malpica Cuello (Ed.), *Castillos y territorio en al-Andalus* (pp. 246–293). Granada: Athos-Pérgamos.
- Malpica, A., & Martín, J. M. (2006). Las villas nuevas medievales del reino de Granada (siglo XV-comienzos XVI). *Boletín Arkeolan*, 14, 350–369.
- Martín, J. M. (2004). Proposta preliminare di sistematizzazione delle tecniche costruttive d'al-Andalus nel territorio di Ilbira-Granada (Andalusia, Spagna). *Archeologia dell'Architettura*, 9, 105–118.
- Martín, M. (2009). La construcción del tapial calicastrado en época nazarí. In *V Convención técnica y tecnológica de la arquitectura técnica* (pp.1–15). Albacete: COAAT.
- Martín, R., Cámara, L., & Murillo, J. I. (2018). Análisis integrado de construcciones históricas: secuencia estratigráfica y diagnóstico patológico. Aplicación en la iglesia de Santa Clara (Córdoba). *Arqueología de la Arquitectura*, 15, 067. <https://doi.org/10.3989/arq.arqt.2018.001>
- Menna, F., Nocerino, E., Remondino, F., Dellepiane, M., & Callieri, M. S. R. (2016). 3D digitization of a heritage masterpiece - a critical analysis on quality assessment. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLI-B5*, 675–683. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XLI-B5-675-2016>
- Mileto, C., & Vegas, F. (2003). El análisis estratigráfico constructivo como estudio previo al proyecto de restauración arquitectónica: metodología y aplicación. *Arqueología de la Arquitectura*, 2, 189–196. <https://doi.org/10.3989/arq.arqt.2003.46>
- Ministerio de Educación, Cultura y Deporte (2015). *Plan Nacional de Arquitectura Defensiva*.
- Murphy, M., McGovern, E., & Pavia, S. (2013). Historic Building Information Modelling - Adding intelligence to láser and image based surveys of European classical architecture. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 76, 89–102. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2012.11.006>.
- Nex, F., & Remondino, F. (2014). UAV for 3D mapping applications: a review. *Applied Geomatics*, 6(1), 1–15. <https://doi.org/10.1007/s12518-013-0120-x>
- Nieto, J., & Moyano, J. (2014). El estudio paramental en el modelo de información del edificio histórico o Proyecto HBIM. *Virtual Archaeology Review*, 5(11), 73–85. <http://doi.org/10.4995/var.2014.4183>
- Nieto, J., Moyano, J., & García, Á. (2019). Estudio constructivo del Palacio de los Niños de Don Gome (Andújar, Jaén), gestionado desde el proyecto HBIM. *Virtual Archaeology Review*, 10(20), 84–97. <https://dx.doi.org/10.4995/var.2019.10567>
- Paris, L., & Wahbeh, W. (2016). Survey and representation of the parametric geometries in HBIM. *Disegnarecon*, 9(16), 12–11.
- Peinado, R. (1989). *La repoblación de la tierra de Granada. Los Montes Orientales (1485-1525)*. Granada: Universidad de Granada.
- Pereira Uzal, J. M. (2013). Modelado 3D en patrimonio cultural por técnicas de structure from motion. *Ph Investigación*, 1, 77–87.
- Peucker, T. K., Fowler, R. J., & Little, J. J. (1978). The triangulated irregular network. In *Proceedings of the Digital Terrain Models (DTM) Symposium*. Falls Church: American Society of Photogrammetry.

LEVANTAMIENTO ARQUITECTÓNICO Y ANÁLISIS ARQUEOLÓGICO DEL CASTILLO DE PÍÑAR COMO PUNTO DE PARTIDA PARA SU CONSERVACIÓN

- Previtali, M., & Valente, R. (2019). Archaeological documentation and data sharing: digital surveying and open data approach applied to archaeological fieldworks. *Virtual Archaeology Review*, 10(20), 17–27. <https://doi.org/10.4995/var.2019.10377>
- Rodríguez-Navarro, P. (2012). La fotogrametría digital automatizada frente a los sistemas basados en sensores 3D activos. *EGA Expresión Gráfica Arquitectónica*, 20, 100–111. <https://doi.org/10.4995/ega.2012.1408>
- Remondino, F., Nocerino, E., Toschi, I., & Menna, F. (2017). A critical review of automated photogrammetric processing of large datasets. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-2/W5, 591–599. <http://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W5-591-2017>
- Schönberger, J. L., & Frahm, J. M. (2016). Structure-from-motion revisited. In *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition* (pp. 4104–4113). Las Vegas, NV. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2016.445>
- Scopigno, R., Callieri, M., Dellepiane, M., Ponchio, F., & Potenzi, M. (2017). Delivering and using 3D models on the web: are we ready?. *Virtual Archaeology Review*, 8(17), 1–9. <http://dx.doi.org/10.4995/var.2017.6405>
- Statham, N. (2019). Scientific rigour of online platforms for 3D visualisation of heritage. *Virtual Archaeology Review*, 10(20), 1–16. <https://doi.org/10.4995/var.2019.9715>
- Torres, L. (1949). *Arte almohade. Arte nazarí. Arte mudéjar* (Vol. IV). Madrid: Plus Ultra.
- Westoby, M. J., Brasington, J., Glasser, N. F., Hambrey, M. J., & Reynolds, J. M. (2012). 'Structure-from-Motion' photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology*, 179, 300–314. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.08.021>