

## Estándares y métodos para optimizar la digitalización 3D de las fortificaciones.

Pablo Rodríguez-Navarro<sup>a</sup>, Teresa Gil-Piqueras<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Universitat Politècnica de València, Valencia, Spain, [rodriguez@upv.es](mailto:rodriguez@upv.es); [tgil@ega.upv.es](mailto:tgil@ega.upv.es)

### Abstract

The three-dimensional digitisation of fortifications may be treated as a specific scenario, that is, fortifications have certain formal, dimensional and typological characteristics, as well as their setting in the territory, which make them worthy of specific study of their digitisation process. This leads us to establish standards and workflows to guarantee the most appropriate application of the chosen methods.

This paper aims to analyse the peculiarities of data collection in fortifications, with an emphasis on both big castles and those located on complex orography. At the same time, this paper outlines a process for determining the digitisation resolution standard based on the required scale in order to satisfy the aim of the graphic survey, as well as the recommendations to be considered in the data collection process to obtain it.

**Keywords:** castle, digitization standard, SfM photogrammetry, 3D laser scanner, drone.

### 1. Introducción

La digitalización tridimensional del patrimonio arquitectónico y arqueológico se encuentra en una fase de elevada madurez. Aunque el proceso ha llevado algo más de una década de avances significativos continuos, atendemos actualmente a un proceso de estabilización. Podemos afirmar, sin lugar a duda, que el cambio de paradigma ya está superado, siendo momento ahora de ejercer una crítica sobre los resultados, más que sobre los medios. En este entorno podemos preguntarnos, ¿qué debemos hacer ahora? ¿estamos obteniendo lo que queremos, lo que realmente necesitamos?

La fase de fascinación ante el modelo digital tridimensional ya es historia, ya no podemos seguir contemplando las virtudes de los algoritmos SfM o de las capacidades de los nuevos escáneres láser 3D. Ya no podemos recrearnos más observando una nube de puntos. Es momento pues de someter a revisión los resultados que obtenemos y ver si realmente

alcanzan y se ajustan a nuestros objetivos, a nuestros requerimientos...

Si observamos las investigaciones de los diferentes grupos que trabajan actualmente en la digitalización del patrimonio (Camagni et al., 2019; Remondino et al., 2018; Guidi et al., 2020; Nex & Remondino, 2019; Verdiani, 2017), observamos que se están focalizando en solucionar problemas críticos, cuellos de botella, como sería el caso de la semántica (muy útil para poder avanzar en HBIM) que permite la clasificación (segmentación) automática. Se echa en falta la optimización y estandarización de los resultados de las aplicaciones consolidadas; cada levantamiento tiene un flujo de trabajo, con unos resultados de diversas resoluciones independientemente de nuestra escala de trabajo, sin que se hayan planteado que se pueden optimizar según el modelo y la finalidad del levantamiento.

## 2. Digitalizar fortificaciones

La diversidad del patrimonio arquitectónico y arqueológico es tal, que a menudo se realizan estudios concretos sobre un determinado escenario, es decir, sobre unos elementos constructivos o tipológicos concretos, para poder determinar soluciones que no podrían ser tratadas de forma genérica, o que, si lo tratáramos así, no podríamos profundizar del mismo modo.

Dos ejemplos claros de estos trabajos sobre escenarios específicos podrían ser las investigaciones realizadas para la digitalización de *Santa Maria del Fiore*, Catedral de Florencia (Verdiani, 2019), con las dificultades que supone la dimensión, la forma y los materiales, con sus esculturas y mármoles de distintos colores; igualmente podemos hablar de otro caso particular, como las investigaciones realizadas en las complejas e imaginativas cúpulas barrocas de Turín (con especial énfasis en Guarino Guarini) (Spallone, 2019), con toda una geometría a descifrar mediante el levantamiento gráfico de precisión.

Las fortificaciones, aunque con una casuística muy amplia, también forman un escenario característico y específico, que debe dar lugar al planteamiento de métodos y estándares particulares.



Fig. 1- Castillo de Vilavella, Castellón (Rodríguez-Navarro)

### 2.1. Factores debidos a la accesibilidad

El problema de la accesibilidad es intrínseco a las propias fortificaciones y forma parte de su esencia. Su construcción está basada en la mejor defensa e inexpugnabilidad, ambas dependientes de una ubicación y construcción poco accesible o inaccesible. Este factor es determinante cuando debemos digitalizar fortificaciones, y hacen que

en la mayoría de los casos tengamos que utilizar drones para poder acceder a los lugares necesarios para la toma de datos completa.

Si bien podríamos transportar en dicho dron un lidar o un escáner laser 3D, es mucho más habitual transportar una cámara fotográfica para obtener una secuencia fotográfica con la que obtendremos el modelo mediante restitución fotogramétrica. También hay que añadir el coste que supone adquirir un dron capacitado para transportar el peso que supone un escáner láser y su sistema inercial, y las dificultades logísticas para transportarlo en entorno montañoso.

Por último, señalar que muchos de los castillos no han tenido un mantenimiento adecuado en cuanto a la vegetación, llegando a resultar difícil su visualización por culpa de árboles y monte bajo que lo van colonizando.

### 2.2. Factores debidos a la morfología

La forma de los castillos es muy diversa, pero aún así, podemos identificar problemas comunes que surgen a la hora de proceder a la toma de datos para su digitalización. En este sentido podemos afirmar que de forma general, disponen de estructuras altas e inaccesibles, que aprovechan las orografías del terreno para aumentar dicha falta de accesibilidad; disponen también de espacios enterrados para mejorar su protección; en ocasiones cuentan con aljibes de agua y almacenes, también bajo la cota superior del terreno; tienen espacios de diseños complejos para mejorar su defensa, como puede ser el caso de las entradas, fosos, puentes, ...

### 2.3. Factores debidos a la dimensión

Encontramos fortificaciones de tamaños diversos, desde una pequeña torre o bastión, hasta un gran castillo con varios recintos amurallados. En este caso nos vamos a fijar en las grandes construcciones, ya que las más pequeñas, no necesitarán especificaciones en este sentido.

Estos grandes castillos se encuentran mayoritariamente en entorno rural y/o montañoso, con dimensiones que van desde los 100 metros hasta los 500 metros de longitud, dependiendo del número de recintos amurallados que presenten. Con estas dimensiones, la digitalización va a tener que dividirse necesariamente, obteniendo a su vez, varias tomas de datos con especificaciones distintas.



Fig. 2- Planta del Castillo de Vilavella, Castellón (Rodríguez-Navarro, Gil-Piqueras & Pérez-Vila)

### 3. Medios y métodos

Hoy en día, el levantamiento gráfico del patrimonio pasa, necesariamente, por la obtención de una réplica digital tridimensional de altísima precisión y calidad gráfica. Este modelo tridimensional lo obtendremos mediante fotogrametría SfM (Structure From Motion) y/o escáner láser 3D. Los dos métodos han llegado a una madurez tal, que ya no hay dudas en su uso, y en muchas ocasiones, para realizar el levantamiento de un modelo complejo, necesitaremos utilizar ambos métodos de manera conjunta, con sus consiguientes sistemas y softwares, para poder obtener el resultado esperado.

Por último y de manera transversal, debemos incluir el uso de los drones, que son capaces de situar a nuestras cámaras fotográficas y a nuestros escáneres, en posiciones hasta ahora impensables,

fundamentales para la toma de datos de este tipo de construcciones.

Así pues, hablamos de levantamiento gráfico integrado, pues es fruto de una combinación de medios y métodos.

#### 3.1. Fotogrametría SfM

Atendiendo fundamentalmente a los factores debidos a la accesibilidad y a la dimensión de las fortificaciones, la restitución fotogramétrica mediante SfM será el método fundamental para la obtención de los modelos tridimensionales. Además, en la mayoría de los casos, deberemos auxiliarnos de un dron para poder realizar las tomas fotográficas necesarias.

La planificación de las tomas se realizará atendiendo a un vuelo cenital global, programado mediante software de vuelo fotogramétrico, que

va a garantizar la obtención de una ortofotografía completa de la fortificación. A continuación, e intentando siempre seguir una secuencia con las tomas fotográficas, se realizan vuelos a 45° y 90° de las construcciones que dispongan de elementos con elevación (muros, parapetos, torres, ...)

También podemos completar con tomas fotográficas realizadas a mano, bien con la cámara del dron o con otra distinta, aquellas zonas que se puedan recorrer y/o que necesiten fotografías tomadas desde abajo, como por ejemplo para restituir partes inferiores de vuelos, pasarelas, ...



Fig. 3- Castillo de Vilavella, Castellón. Escáner láser de la construcción enterrada (Rodríguez-Navarro & Gil-Piqueras)

Podríamos también seguir nuestra secuencia en el interior de espacios cerrados, pero normalmente, es complejo debido al difícil o pequeño acceso

(por ejemplo, brocal del aljibe) o a los cambios de iluminación y contraluces, que nos favorecen la aparición de errores y artefactos en el modelo 3D.

### 3.2. Escáner láser 3D

El uso del escáner láser 3D en la digitalización de fortificaciones es, normalmente, complementario. Precisamente por las dificultades de accesibilidad, las grandes dimensiones y la presencia vegetal, vemos que su uso en exteriores es complejo. En este caso, disponer de un dron con suficiente capacidad de carga (carga de pago) para transportar el escáner y su sistema inercial, hacen por un lado que el coste económico aumente notablemente, y la dificultad del transporte de los mismos en medios montañosos, lo hagan inviable en muchas ocasiones.

Por todos estos motivos, el uso del escáner láser en el exterior de las fortificaciones se limita, de manera no excluyente, a fortificaciones accesibles, con una dimensión limitada, que no requiera de la obtención de un MDT de su entorno inmediato.

Sin embargo, en los interiores, el escáner láser se convierte en esencial, siendo el método idóneo en la mayoría de los casos, ya que resuelve los problemas de cambios de iluminación y la toma y unión de cuantiosos y complejos espacios, con una alta precisión.

### 3.3. Método integrado

Finalmente deberemos integrar las partes tomadas mediante la fotogrametría SfM con las que fueron tomadas con el escáner láser 3D. En este sentido podremos registrar la unión de los dos registros mediante sus nubes de puntos (Lumini, 2023).

Para ello podemos proceder a exportar la nube de la fotogrametría en formato e57, para posteriormente importarlo y registrarlo con la nube del escáner en cualquier software de registro. En este caso tendremos la ventaja de escalar con la nube del escáner, lo que nos va a favorecer la precisión dimensional.

También podemos proceder a la inversa, e importar la nube de puntos del escáner en un software de fotogrametría SfM. En este caso podemos utilizar la fotografía como textura, incluso para la nube del escáner, obviamente si tenemos las tomas realizadas.

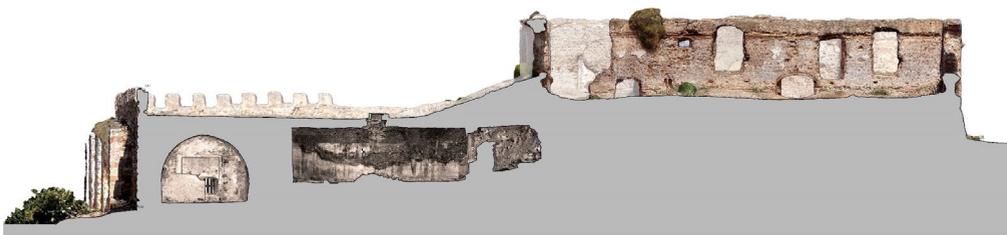


Fig. 4- Castillo de Petrés, Valencia. Sección que integra fotogrametría y escáner láser 3D. (Rodríguez-Navarro, Gil-Piqueras & Pérez-Vila)

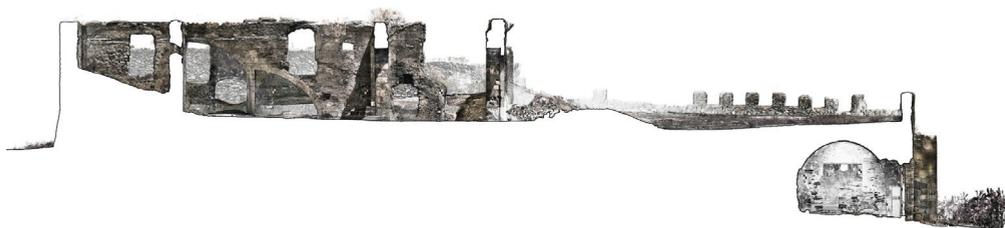


Fig. 5- Castillo de Petrés, Valencia. Sección escáner láser 3D. (Rodríguez-Navarro, Gil-Piqueras)

#### 4. Determinación del estándar

Una vez determinado los medios y métodos a utilizar en el levantamiento de una fortificación, debemos determinar el cuál es el estándar requerido, es decir, cuál es el detalle requerido según los objetivos de nuestro levantamiento, o lo que es lo mismo, qué resolución ( $R^{es}$ ) necesito.

Nuestro interés se va a centrar en la obtención de planos arquitectónicos (plantas, alzados y secciones) a una escala determinada. Este documento será el más exigente de los que podamos necesitar, ya que requerirá de una impresión digital o sobre soporte físico (papel).

Sabemos también que la impresión requiere un documento final de 300 ppp, que equivalen a 117,8 píxeles x cm, es decir, 1 metro a escala 1/100 (1 cm de impresión). Si volvemos a la realidad, es decir a escala 1:1 para obtener los mm/píxeles reales:

$$R^{es} = (1 \text{ mm} \times 117,8 \text{ píxeles/mm}) / 1000 \text{ mm} = 0,1178 \text{ píxeles/mm}$$

Calculando la inversa obtendremos la resolución mínima necesaria en mm/píxel para la escala 1/100:

$$R^{es} = 1/0,1178 = 8,49 \text{ mm/píxel}$$

Empezamos viendo los requerimientos necesarios para las ortoimágenes de la fotogrametría. Debemos calcular la altura de nuestro vuelo (distancia a la superficie a representar), en función de los parámetros de la cámara que vayamos a utilizar, para determinar el nivel de detalle que podemos alcanzar con nuestras fotografías, es decir, la resolución o GSD (Ground Sample Distance). El GSD define la longitud representada por cada píxel, dada la distancia desde la cámara al objeto fotografiado, y conociendo las características del sensor y la distancia focal de la cámara (Rodríguez-Navarro et al., 2022). En nuestro caso usamos una cámara Sony RX100II, con sensor de 1 pulgada y 20 megapíxeles, con las siguientes características:

$$GSD = (Sw \times H \times 1000) / (Fr \times imW)$$

Si despejamos H (distancia a la superficie a representar o altura de vuelo)

$$H = (GSD \times Fr \times imW) / (Sw \times 1000)$$

$$H = (8,49 \times 10 \times 5472) / (13,2 \times 1000) = 35,19 \text{ m}$$

Así pues, para obtener este levantamiento con la resolución necesaria para la escala requerida, debemos de mantener siempre una distancia en la toma fotográfica  $\leq 35$  metros.

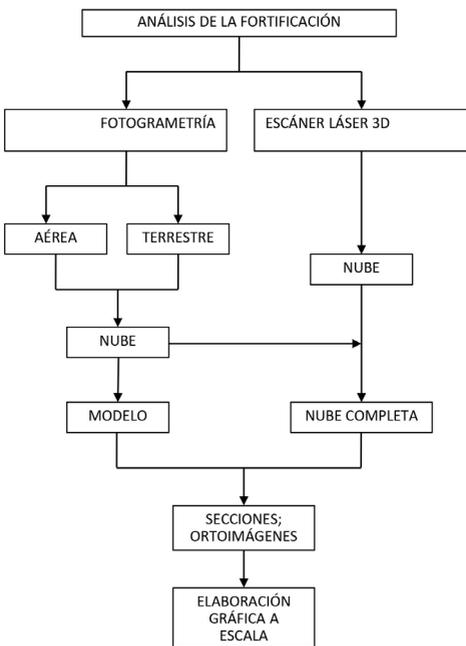
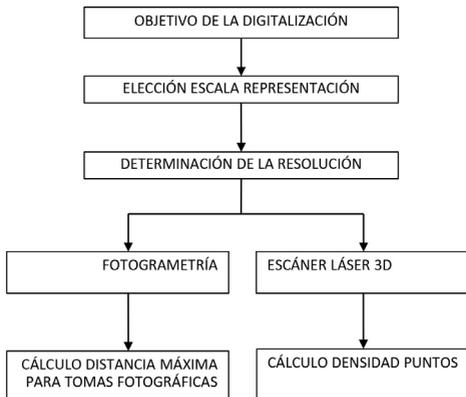


Fig. 1- Flujo de trabajo (Rodríguez-Navarro, & Gil-Piqueras)

- Sw (ancho del sensor) = 13,2 mm
- Sh (altura del sensor) = 8,8 mm
- Fr (distancia focal de la lente) = 10 mm (28mm distancia focal equivalente)
- imW (ancho de la imagen) = 5472 pixels

Esta distancia máxima la usaré principalmente en el vuelo del dron para las tomas fotográficas cenitales mediante el vuelo programado, que me garantizarán la obtención de la ortoimagen en planta. Lo lógico será que el resto de tomas fotográficas para cubrir los elementos verticales, y que se realizarán en vuelo manual, sean siempre a una distancia menor. No obstante, hay que tener la precaución de no superar esta distancia para evitar bajar la resolución requerida.

Con el escáner láser cambiaremos los píxeles por los puntos con información RGB; con una densidad suficiente, la ortoimagen de una nube puede dar una impresión fotográfica, pero nunca llegará a tener el mismo aspecto. En todo caso, si que podemos obtener una ortoimagen con la que podamos definir y dibujar cualquier elemento constructivo y sus patologías.

Sin embargo, en los levantamientos mediante escáner láser 3D va a ser más complejo garantizar la obtención del estándar determinado. La propia geometría de la toma de datos del escáner, en base a una toma radial, que impacta a su vez en distintos ángulos con la superficie a representar, hace mucho más complejo el conocimiento de una densidad de puntos mínima en toda la superficie.

En esta toma de datos manejamos las siguientes variables:

- Posicionamiento de las estaciones escáner en función del elemento (evitar sombras)
- Distancia a la superficie a representar.
- Ángulo de impacto desde la estación escáner.
- Resolución elegida en el escáner (a 10 metros)

Aunque a priori puedan parecer pocos factores, la complejidad de su sistematización es muy alta. La superposición de las distintas nubes individuales es fundamental en el resultado, y el factor de decisión entre:

- a- más estaciones escáner con menos resolución
  - b- menos estaciones escáner con más resolución
- es absolutamente determinante en los resultados finales.

## 5. Conclusiones

Previo a cualquier proceso de levantamiento gráfico debemos determinar el estándar necesario. Para ello analizaremos los objetivos del mismo, es decir, para qué quiero dicha digitalización. Un sistema aceptable sería establecer el uso más exigente que pudiera tener nuestra digitalización, y en la actualidad podemos establecer que es la impresión, digital o en papel, de los planos arquitectónicos a escala que lo definen. Así podemos establecer el factor de escala necesario y, a partir de aquí, obtener la resolución mínima necesaria para cumplir con el estándar requerido en nuestra digitalización.

Las fortificaciones constituyen un escenario particular a tener en cuenta en su proceso de digitalización tridimensional. Además, los grandes castillos y muy especialmente aquellos situados en entornos montañosos de difícil acceso requieren de la aplicación de un flujo de trabajo específico. En este flujo de trabajo estarán presentes tanto los sistemas basados en sensores pasivos (fotogrametría) como en sensores activos (escáner láser 3D). En el proceso de toma de datos será prácticamente imprescindible el uso de drones que nos transporten a la cámara fotográfica para poder obtener imágenes desde todos los puntos de vista necesarios para su restitución.

Por último, deberemos integrar todos los levantamientos, obtenidos por ambos métodos

que a su vez pueden estar divididos en distintas partes debido a su tamaño, para formar un único modelo digital, un clon digital, a partir del cual obtendremos los distintos productos que necesitemos.

## 6. Discusión

El estado actual de madurez de la fotogrametría y de los escáneres láser 3D, favorece, sin lugar a duda, la obtención de modelos tridimensionales hiperrealistas. Además, basándose en su aparente sencillez, economía y atractivo visual de sus resultados, hemos atendido a una popularización generalizada de estos métodos,

Sin embargo, esta aparente facilidad ha provocado en muchos casos resultados faltos de la calidad y rigor mínimos exigible. Así mismo, vemos como en muchas ocasiones se presentan nubes de puntos y/o modelos, tal y como salen del software, en bruto, faltos de la edición y elaboración gráfica necesaria para obtener el producto final, productos basados en un simple atractivo gráfico de la imagen que nos muestran.

Para garantizar una correcta digitalización se hace imprescindible partir del objeto de la misma y, a continuación, el establecimiento del estándar necesario. Sin este paso estaremos tomando datos aleatoriamente, desconociendo si serán suficientes, si nos faltarán, si nos sobrarán, y en todo caso, si atenderán a la calidad exigida en nuestro proyecto de digitalización.

## Financiación

Esta contribución es parte del proyecto de I+D+i ref. PID2020-119469RB-I00, financiado por Ministerio de Ciencia e Innovación / Agencia Estatal de Investigación / 10.13039/501100011033.

## Referencias

- Camagni, F., Colaceci, S., and Russo, M. (2019). Reverse modeling of cultural heritage: pipeline and bottlenecks, *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*, XLII-2/W9, 197–204, <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W9-197-2019>
- Guidi, G., Malik, U.S., Manes, A., Cardamone, S., Fossati, M., Lazzari, C., Volpato, C., Giglio, M. (2020a). Laser Scanner-Based 3D Digitization for the Reflective Shape Measurement of a Parabolic Trough Collector. *Energies*, 13: 5607. <https://doi.org/10.3390/en13215607>

- Lumini, Andrea. (2023). The integrated digital survey of the Florence Air Warfare School. HBIM-based protocols for documentation and information management. *Disegnarecon*, 16 (15). doi: 10.20365/disegnarecon.30.2023.11.
- Nex, F., Remondino, F. (2019). Latest Developments, Methodologies, and Applications Based on UAV Platforms. *Drones* special issue, 3(1): 26. <https://doi.org/10.3390/drones3010026>
- Remondino, F., Nocerino, E., Toschi, I., Menna, F. (2018). A critical review of automated photogrammetric processing of large datasets. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*, vol. XLII-2/W5, 591-599. doi:10.5194/isprs-archives-XLII-2- W5-591-2017.
- Rodríguez-Navarro, P., Cabezos-Bernal, P. M., Gil-Piqueras, T. y Giménez Ribera, M. (2022). Using drones under 250g for documenting architectural Heritage, *DisegnareCON*, volumen 15/ n. 29 - December 2022, ISSN 1828-5961.
- Spallone, R. (2019) Geometry of vaulted systems in the treatises by Guarino Guarini. *EGE- Expresión Gráfica en la Edificación*, 11, 79-93. doi: 10.4995/ege.2019.12872
- Verdiani, G. (2017). Fortifications and documentation: the case of Fortezza Vecchia in Livorno. State of the digital survey. In *Defensive Architecture of the Mediterranean XV to XVIII centuries*. 6, 311-318.
- Verdiani, G. (2019). Digital survey: from new technology to everyday use, a knowledge path and challenge for scholars. *EGE Revista de Expresión Gráfica en la Edificación*, (11), 94–105. <https://doi.org/10.4995/ege.2019.12873>