

---

# LEVANTAMIENTO DIGITAL DE ELEMENTOS CON TIPOLOGÍA DE TORRE: EXPERIENCIAS INICIALES DE APLICACIÓN EN RAVENNA (ITALIA)

Susana Molina Sánchez<sup>1</sup>, Francisco Juan Vidal<sup>1</sup>, Luca Cipriani<sup>2</sup>, Gianna Bertacchi<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Instituto Universitario de Restauración del Patrimonio (IRP), Universidad Politécnica de Valencia (UPV), España.

<sup>2</sup> Alma Mater Studiorum Università di Bologna, Dipartimento di Architettura, Bologna, Italia.

**Autor de contacto:** Susana Molina Sánchez, [smolina102@gmail.com](mailto:smolina102@gmail.com)

**RESUMEN:** *En primer lugar, el presente artículo se enmarca en el actual desarrollo de la tesis cuyos objetos de estudio son elementos con tipología de torre. Concretamente, se trabaja con un grupo de alminares mudéjares de Aragón, a los que se incorporan dos experiencias de levantamiento con torres-campanario ubicadas en Ravenna (Italia), llevadas a cabo durante la estancia de investigación en la Università di Bologna. De esta forma, se plantean dos objetivos claros. Por una parte, se pretende hacer un breve recorrido por las actividades de carácter formativo y divulgativo realizadas en este último periodo. Por otro lado, y dentro de este escenario de tareas, se centra la atención en la descripción de las campañas de levantamiento digital con técnicas avanzadas ejecutadas durante la estancia doctoral en Italia. Dichas campañas producen un doble fruto/producto: una metodología de levantamiento de elementos con tipología de torre campanario que será aplicable, igualmente, a los alminares mudéjares de Aragón. Además, los primeros modelos tridimensionales hiperrealistas y texturizados obtenidos, permiten hacer una verificación inicial de la pertinencia de su utilidad para el conocimiento profundo de estos bienes.*

**PALABRAS CLAVE:** torres, levantamiento digital, metodología, modelos tridimensionales, fotogrametría, escáner láser

---

English version

**TITLE:** *Digital Survey of Elements with Tower Typology: Initial Experiences of Application in Ravenna (Italy)*

**ABSTRACT:** *Firstly, this article is part of the current development of the thesis whose objects of study are elements with a tower typology. Specifically, work is being done with a group of Mudejar minarets in Aragon, in addition to two survey experiences with bell towers located in Ravenna (Italy). These latter survey experiences are carried out during the research stay at the Università di Bologna. In this way, two clear objectives were set. On the one hand, the aim is to make a brief review of training and dissemination activities carried out during this last period. On the other hand, and within this background of tasks, attention is focused on the description of digital survey campaigns with advanced techniques executed during PhD stay in Italy. These digital surveys produce a double result/product: a methodology for the survey of elements with a bell tower typology that will also be applicable to Mudejar minarets in Aragon. In addition, first hyper-realistic and textured three-dimensional models obtained allow an initial verification of the relevance of their utility for an in-depth knowledge of these assets.*

**KEYWORDS:** *bell towers, digital survey, methodology, three-dimensional models, photogrammetry, laser scanner*

## 1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

Este trabajo se incluye en el marco de la tesis doctoral que se está desarrollando cuyo plan de investigación, ya presentado en un artículo anterior (Molina S. y Juan F. 2017), se centra en el estudio de la evolución histórico-constructiva de un grupo de torres mudéjares aragonesas, así como en la verificación de la pertinencia del uso de los modelos tridimensionales hiperrealistas para el conocimiento profundo de estos bienes.

El propósito principal de este estudio es hacer un breve recorrido por las actividades realizadas en este último año, así como presentar los resultados iniciales obtenidos.

De esta forma, se podrían señalar dos objetivos diferenciados:

- Por una parte, se describen brevemente las tareas llevadas a cabo tanto a **nivel metodológico** como a **nivel divulgativo**. Cabe destacar las labores de adquisición, selección y clasificación de datos in situ junto con actividades formativas de tipo específico.
- Por otro lado, se explican las campañas de levantamiento realizadas durante la **estancia de investigación en la Universidad de Bologna**, así como los resultados obtenidos. Esta sección se tratará con mayor detenimiento puesto que constituye la primera experiencia usando técnicas de levantamiento digital avanzadas. Generando, con todo ello, un tipo de metodología aplicable igualmente a los casos de estudio de Aragón y cuyos primeros modelos empiezan a dar respuesta a uno de los objetivos básicos de la tesis.

## 2. METODOLOGÍA

Llegados a este punto, se van a estructurar las tareas en función de su tipología (carácter formativo y trabajo de campo), reservando la última parte a la aplicación práctica de las técnicas de levantamiento digital desarrolladas durante la estancia de investigación en Italia.

### 2.1. Formación especializada para la adquisición de aptitudes

Para la adquisición de las capacidades previas necesarias en la ejecución de los levantamientos, así como en el desarrollo general de la investigación, se han realizado actividades de formación específica adecuadas a tal fin.

En primer lugar, como **herramientas de apoyo al desarrollo de la parte práctica** de la investigación destaca la participación en las III Jornadas Activa tu Futuro, en los talleres de: *ABC de la cámara digital*, *Realidad Virtual* y *Los drones* y sus aplicaciones, entre otros.

Por otra parte, la **formación** en *Seguridad en Trabajos en Altura*, promovida por el Servicio Integrado de Prevención y Salud Laboral de la UPV (SIPSL), resulta conveniente y está muy **enfocada** al tipo de **tareas** llevadas a cabo **in situ** (al tratarse de torres campanario).

Además, cabe señalar las **competencias** adquiridas en cursos especializados en convenio con otras universidades a nivel internacional:

- Mejora de la **destreza** en la parte de **digitalización y creación de modelos 3D** proporcionada por *Digital Design*.



Figura 1. Detalle de la decoración cerámica de la torre de San Francesco en Ravenna (Italia). Modelo tridimensional texturizado.

- Ampliación de conocimientos sobre las **herramientas de medición y levantamiento in situ**, gracias a *Dispositivos móviles para la Gestión del Territorio*.
- Habilidad en la **interpretación y lectura de los documentos procedentes de archivos históricos** con el curso de *Caligrafía y Paleografía*: espacios históricos para su estudio y práctica.
- Formación provechosa para el futuro desarrollo de **trabajo de campo apoyado en fotogrametría aérea** proporcionada por *Drones: Prepare and Design your Drone Mission*.

Por último, la materia de *Survey of Historic Buildings* desarrollada en paralelo a las campañas de levantamiento durante la estancia de investigación en **Bologna**, constituye el **complemento fundamental de los levantamientos digitales**, estableciendo las pautas clave para su correcta ejecución (*Docci M. 2012, Guidi G. 2010*).

## 2.2. Trabajos in situ. Torres mudéjares de Aragón

En el marco fundamentalmente práctico de la tesis, se inician los trabajos de **toma de datos in situ** por métodos tradicionales. Todos ellos en relación al elenco de torres mudéjares seleccionado en Aragón en base a su tipología y estructura interna (*Molina S. 2018*).

Se escogen para ello un total de **30 torres** clasificadas, en un primer nivel, de acuerdo a su **tipología**: cuadradas, octogonales y mixtas. A su vez, se hace una segunda distinción atendiendo a su **funcionalidad** (torres-puerta, torres-atalaya, torres-contrafuerte) y **estructura interna** (con estancias, con machón central o huecas).

Una vez realizada la toma de datos parcial de la mayoría de ellas (hasta el momento), se lleva a cabo un análisis basado en dimensiones características en todas ellas (lado de la base, altura, aparejo, peldaños...). Obteniendo progresivamente, de esta forma, unas **relaciones geométricas y aspectos comunes** a todas ellas.

Tras el análisis de dichas relaciones, se acota el número de torres representativas con estos aspectos clave a cuatro casos, que serán objeto de estudio. Entre dichos casos, se va a profundizar el estudio en la **torre mudéjar** de la iglesia de **San Pablo en Zaragoza**. De hecho, ya se ha realizado el levantamiento tradicional y se están ejecutando las campañas de levantamiento digital con el uso de fotogrametría terrestre (SfM) y escáner láser (TLS).

## 2.3. Aplicación de las técnicas de levantamiento digital en Ravenna (Italia)

Las experiencias iniciales de aplicación de técnicas de levantamiento digital en torres se llevan a cabo durante el periodo de estudio desarrollado en Bologna. El título dado a la estancia doctoral, *Cultural Heritage surveying and documentation with digital survey techniques*, define de manera explícita los trabajos realizados durante la misma en *Alma Mater Studiorum Università di Bologna*. Dicho periodo se ha desarrollado en las sedes universitarias de Bologna y Ravenna durante 3 meses, bajo la supervisión del director de la Scuola Superiore di Studi sulla Città e il Territorio, Luca Cipriani.



Figura 2. Torre mudéjar de San Pablo en Zaragoza (Aragón). Uno de los casos de estudio de la tesis.

Durante este tiempo, además de la asistencia a conferencias/congresos y la participación en la materia específica de *Survey of Historic Buildings* (mencionada anteriormente), destaca la **ejecución de los levantamientos digitales de elementos altos** (con tipología de torre). Para ello, se escogen dos casos de estudio en la ciudad de Ravenna: la torre de la iglesia de **San Carlino** y la torre de la basílica de **San Francesco** (*Battistini G. 2008*). Ambas presentan ciertas similitudes con las torres mudéjares de Aragón, a nivel tipológico (torres campanario) y de material (ladrillo y, en uno de los casos, decoración cerámica).

Continuando, de esta forma, con la línea de investigación de la tesis doctoral.

Analizando el *modus operandi* para cada una de dichas torres, se distinguen dos bloques de actividades básicos:

- **Adquisición de datos *in situ***, utilizando las técnicas de levantamiento digital terrestres de Fotogrametría (SfM) y Escáner láser (TLS).
- **Procesamiento de los datos** con la ayuda de *software* especializado en fotogrametría, gestión de nubes de puntos, 3D *modelling*...

Todo ello, con el objetivo de: establecer una **metodología eficaz orientada al levantamiento de** este tipo de elementos (**torres**) y obtener unos primeros **modelos tridimensionales hiperrealistas** que verifiquen la utilidad de dichas técnicas para el **conocimiento detallado de los bienes**. Igualmente, estas experiencias prácticas iniciales servirán como punto de partida y serán equiparables en su aplicación en las torres mudéjares de Aragón.

A continuación, se describen brevemente ambos bloques de actividades:

#### Adquisición de datos

Para la parte fotogramétrica se utilizan dos tipos de cámaras con, a su vez, dos tipos de objetivos (18-55mm) y (70-300mm), un *color-checker* (para ajustar el balance de blancos) y un trípode. Se llevan a cabo varios sets de imágenes variando: las **distancias** a cada torre, las **longitudes focales** y, cuando hay posibilidad, las **cotas en altura**. Además, en el caso de San Francesco se ejecuta una campaña con trípode al interior de la basílica (que oculta parte de la base de la torre).

En cuanto al trabajo con escáner láser, se maneja uno de tiempo de vuelo con un alcance máximo de 35m. Como en el caso de la fotogrametría, se hacen estaciones de escaneo exteriores e interiores (éstas últimas sólo en San Francesco). En esta ocasión, se juega con las **densidades de escaneo** en función de la resolución buscada (utilizando mayoritariamente las densidades media y alta).

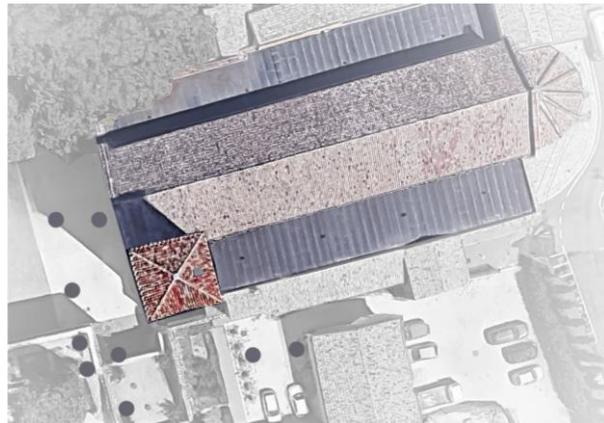
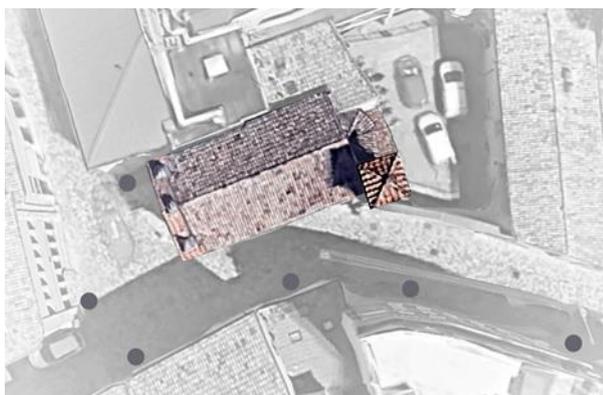


Figura 3. Adquisición de datos para las torres de San Carlino (anterior) y San Francesco (arriba). Estaciones de escaneo exteriores.

#### Procesamiento de datos

El *software* específico para la parte de fotogrametría tiene un **workflow** bien organizado e intuitivo. En este caso, se utilizan dos programas para contrastar los resultados. Indistintamente, el flujo de trabajo se inicia con un **alineamiento** (donde se calculan las posiciones y orientaciones de la cámara mediante una serie de algoritmos) que produce una nube de puntos dispersa.

A partir de dicha nube, se puede optimizar dicho alineamiento añadiendo *markers* o puntos de control con coordenadas. Siguiendo el proceso se pueden generar una **nube densa de puntos, una malla poligonal y la textura** aplicada (en ese orden). Todos estos *outputs* se pueden exportar y editar, a su vez, en otro *software* para conseguir unos modelos tridimensionales más optimizados.

Por otra parte, en el caso de los datos obtenidos por el escáner láser, se gestionan con el *software* propio del fabricante del escáner. Básicamente, éste permite la **gestión y registro de todas las nubes de puntos** obtenidas en las diferentes estaciones de escaneo. Este proceso lo lleva a cabo mediante la introducción y cálculo de una serie de **constraints** entre nubes mediante las áreas de solape. Como resultado final, se obtiene una nube densa de puntos que se puede exportar, como en el caso anterior, y seguir trabajando en *software* de edición y creación de mallas....

Una vez hecho el recorrido por cada uno de los flujos de trabajo proporcionados por cada técnica, se exponen en el siguiente apartado algunos de los resultados obtenidos hasta el momento.

### 3. RESULTADOS

Esta sección se centra en el tipo de *outputs* generados como fruto de la estancia en Bologna, distinguiendo entre bidimensionales y tridimensionales.

Los resultados relativos al trabajo in situ realizado para las torres mudéjares de Aragón todavía se hallan en proceso de elaboración, a la espera de la aplicación de la metodología mediante levantamientos digitales descrita para las torres de Ravenna.

### 3.1. Producción digital

Con la integración de los datos obtenidos mediante las dos técnicas de levantamiento desarrolladas en Ravenna, se obtienen diferentes *outputs* debido a la cantidad de información que el *software* es capaz de generar en cada caso. En esencia, se distingue entre resultados bidimensionales y tridimensionales.

- Entre los *outputs* bidimensionales se producen ortoimágenes, planimetrías (secciones, plantas o alzados), *normal mapping*, *texture mapping*...
- En referencia a los resultados tridimensionales se generan mallas poligonales, nubes densas de puntos, modelos texturizados a alta calidad...

De esta forma, para ambas torres objeto de estudio (San Carlino y San Francesco) se han obtenido modelos tridimensionales hiperrealistas de los que, a su vez, se pueden extraer datos concretos aislados (planos, textura, vistas...).

## 4. CONCLUSIONES

Para terminar, de estas experiencias de levantamiento se puede extraer una metodología aplicable in situ a otras campañas posteriores que se realizarán para las torres mudéjares de Aragón.



Figura 4. Nube densa de puntos de la basílica y torre de San Francesco.

Por otra parte, durante el proceso de postproducción (la gestión de los datos adquiridos in situ) se hace evidente la pertinencia del uso de modelos tridimensionales para el conocimiento profundo de los bienes (que es uno de los objetivos de la tesis).

Todo ello gracias a la amplia gama de *outputs* que genera este tipo de *software* con cantidades inmensas de información al combinar los resultados obtenidos con diferentes técnicas de levantamiento (desde planimetrías 2D: plantas, secciones, alzados, orto imágenes... hasta modelos tridimensionales de tipos variados: texturizados, mallas poligonales, nubes densas de puntos...).

En definitiva, se consigue una réplica virtual del objeto real con una geometría y dimensiones muy precisas (dadas por el escáner), así como definición de detalles y materialidad rigurosa (dada por la fotogrametría).

## AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, merecen especial reconocimiento el párroco de San Francesco, padre D. Ivo Laurentini, así como la señora encargada de custodiar la basílica y el amo de llaves de la torre, por su cordialidad y por facilitarme el acceso al templo y a la torre.

Por otro lado, cabe mencionar a los profesores Sara Gonizzi (del Politecnico di Milano), Filippo Fantini y Silvia Bertacchi (de la Universidad de Bologna), por hacer posible el desarrollo de los levantamientos y la formación recibida durante la estancia de investigación.

Por último, pero no menos importante, hay que destacar la predisposición y ayuda a nivel formativo de los profesores del Dpto. de Ingeniería Cartográfica, Geodesia y Fotogrametría de la UPV: José Luis Denia, José Herráez y Enrique Priego.



Figura 5. Nube de puntos y malla poligonal de la torre de San Francesco.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Battistini, G., Bissi, L. y Rocchi, L. (a cura di Rita Fabbri), (2008). *I campanili di Ravenna: Storia e restauri*. Ravenna: Longo Editore Ravenna.

Docci, M. y D. Maestri, (2012). *Manuale di rilevamento architettonico e urbano*. Bari: Editori Laterza.

García-León, J., Ros-Torres, J., Vázquez Arenas, G., Collado Espejo, P.E., Pérez Navarro, J., Ramos Martínez, M. (2019). “Graphic Survey and 3D Virtual Restoration of a 16th century watch tower: Navidad tower (Cartagena, Spain)”, *Advances on Mechanics, Design Engineering and Manufacturing II*, LNME. 2019, pp. 242-251.

Disponible en:

[https://doi.org/10.1007/978-3-030-12346-8\\_24](https://doi.org/10.1007/978-3-030-12346-8_24)

[Consultado 5-10-2020]

Guidi, G., Russo, M. y Beraldin, J-A, (2010). *Acquisizione 3D e modellazione poligonale*. Milano: Mc Graw-Hill.

Molina, S. y Juan, F. (2017). “Alminares mudéjares de la comarca de Calatayud: Nueva aproximación a su evolución histórica” en revista *Arché*, número 11-12, 2017, pp. 251-256.

Disponible en:

<https://riunet.upv.es/handle/10251/101192>

[Consultado 5-10-2020]

Molina, S. (2018). “Uncertain origin of Mudejar bell towers in the region of Calatayud: what can their walls tell us?” *XIV Congreso Internacional de Rehabilitación del Patrimonio (CICOP)*. Matera (Italia), 18-20 junio 2018. Napoli: Luciano Editore, pp. 323-336.

Tryfona, M. S., Georgopoulos, A. (2016). “3D image based geometric documentation of the Tower of Winds” *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XLI-B5, XXIII ISPRS Congress*. Prague, Czech Republic, 2016, pp. 969-975.

Disponible en:

<https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XLI-B5-969-2016>

[Consultado 5-10-2020]