



**Universidad de Valladolid**



PROGRAMA DE DOCTORADO EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

TESIS DOCTORAL:

**RECONSTRUCCIÓN TRIDIMENSIONAL DEL  
PATRIMONIO ARQUITECTÓNICO MEDIANTE  
LA UTILIZACIÓN DE LOS SISTEMAS BIM Y  
HBIM. VALIDACIÓN CON DOS CASOS DE  
ESTUDIO: LA IGLESIA SANTA MARÍA LA REAL  
DE MAVE Y EL CASTILLO DE LOS  
COMUNEROS DE TORRELOBATÓN**

Presentado por FACUNDO JOSÉ LÓPEZ para optar  
al grado de  
Doctor por la Universidad de Valladolid

Dirigida por:  
Dr. D. JAIME GÓMEZ GARCÍA-BERMEJO  
Dr. D. EDUARDO ZALAMA CASANOVA

*“¿Qué es la historia? Un eco del pasado en el futuro;  
un reflejo del futuro en el pasado”*

*Víctor Hugo*

*“La memoria es una parte intrínseca de la  
arquitectura, porque sin saber dónde hemos estado,  
no tenemos idea de hacia dónde vamos”*

*Daniel Libeskind*



## ***Dedicado***

*A mis padres Andrés y María Sandra, por su apoyo, confianza y amor incondicional.*

*A mi novia Vic, por empujarme a cumplir mis sueños y por caminar a mi lado siempre.*

*A mis hermanos Juanma y Charo que junto a mis sobrinos me han hecho feliz a la distancia.*



## ***Agradecimientos***

*Deseo agradecer a todas aquellas personas que de alguna manera han contribuido al desarrollo de esta Tesis.*

*A mi director Jaime Gómez García-Bermejo y a mi codirector Eduardo Zalama Casanova, que han brindado su confianza, predisposición y conocimientos para que pueda llevar adelante mi investigación.*

*A Pedro Martín Leronés y José Llamas que me han ayudado con sus sapiencias, consejos e indicaciones a resolver varios de los temas importantes de la tesis doctoral.*

*A CARTIF por las herramientas y los recursos facilitados,*

*A mis padres, hermanos, novia y amigos que con su apoyo emocional han logrado que estos años de duro trabajo sean felices.*



## Resumen

La gestión, conservación y restauración del patrimonio cultural se está llevando a cabo en todo el mundo debido a su creciente interés como motor del desarrollo socioeconómico y cultural. La existencia de modelos digitales fiables y tridimensionales (3D) del patrimonio cultural tangible, particularmente de los bienes inmuebles (monumentos, edificios, etc.), son actualmente una necesidad creciente debido a la posibilidad de facilitar la comprensión, planificación y difusión de los proyectos de gestión, conservación y restauración.

Hoy en día, una solución para representar fielmente las superficies de los edificios históricos es el uso de las nubes de puntos obtenidas mediante sistemas de escaneado láser y fotogrametría. Desafortunadamente, las nubes de puntos capturadas no contienen información adicional sobre los objetos arquitectónicos cuya geometría representan. Por lo tanto, resulta necesario producir modelos geométricos 3D a partir de la utilización de dichas nubes. Para lograr el modelado geométrico 3D, las nubes de puntos se pueden incorporar a las plataformas *Building Information Modeling* (BIM), que en las últimas décadas han sido adoptadas por los sectores de Arquitectura, Ingeniería, Construcción (AEC) y *Facility Management* (FM) como un medio para integrar el diseño, la documentación y la gestión digital de edificios. Particularmente, las plataformas BIM se basan en componentes paramétricos almacenados en una base de datos denominada biblioteca de objetos. Estos componentes paramétricos son objetos reutilizables que pueden almacenar y representar los atributos geométricos, semánticos o topológicos que describan a cada elemento modelado.

Sin embargo, pese a el progreso que se ha logrado por las plataformas BIM, todavía sus programas de modelado paramétrico poseen algunas limitaciones para representar y modelar las superficies homogéneas e irregulares presente en la mayoría de los edificios históricos. Esto se debe principalmente, a que las plataformas BIM carecen de bibliotecas históricas con objetos paramétricos capaces de representar las características particulares del patrimonio arquitectónico escaneado. Además, la obtención de modelos 3D a partir del uso de las nubes de puntos puede considerarse como una problemática más debido a que actualmente las plataformas BIM no tienen herramientas o componentes aptos para convertir automáticamente las superficies irregulares de una nube de puntos en objetos paramétricos. Por lo tanto, el proceso de modelado puede considerarse lento y complejo.



En este contexto, el actual documento de tesis doctoral presenta una metodología eficiente y replicable que facilita y acelera el modelado digital y detallado del patrimonio arquitectónico. Para ello, la metodología propuesta consta de tres etapas.

La primera etapa abarca la recopilación de la información geométrica, semántica y tipológica. Los datos geométricos se obtienen a partir de las nubes de puntos capturadas por los métodos de escaneado láser y fotogrametría. Por su parte, los datos semánticos y tipológicos se obtienen a partir de los manuscritos y documentos históricos, y también del análisis técnico del edificio. Esta información es capaz de representar el estado de conservación de los edificios analizados, sus características particulares, sus materiales, las reglas y patrones constructivos que siguen, así como las transformaciones pasadas que podrían haber afectado al edificio. La segunda etapa abarca la organización ontológica de los datos semánticos adquiridos y el preprocesamiento de las nubes de puntos. Esta etapa de organización y preprocesamiento permite referenciar con precisión la información adquirida.

En la tercera etapa los datos semánticos y las nubes de puntos preprocesadas se integran en una única estructura semántica gráfica utilizando el entorno BIM. Para esta etapa, se proponen realizar cortes, secciones y vistas sobre la nube de puntos (siguiendo las reglas y patrones constructivos), para reconocer las características de los objetos arquitectónicos escaneados. Posteriormente, se utilizan las rejillas para delimitar manualmente el contorno interno y externo de la nube de puntos. Una vez segmentada y delimitada la nube de puntos, se utilizan las herramientas básicas de BIM para modelar paramétricamente las superficies simples (de acuerdo con su apariencia en vista, sección o elevación) que presenta el edificio estudiado. Por otro lado, para las superficies irregulares, se utilizan otras herramientas, las cuales están relacionadas con el perfilado y modelado tridimensional de los objetos.

Los componentes obtenidos, al aplicar la metodología desarrollada, se utilizan para crear una biblioteca de elementos paramétricos bajo el concepto de *Heritage Building Information Modeling* (HBIM). Se considera a HBIM como una biblioteca especial de objetos paramétricos BIM que ha sido diseñada como un sistema multidisciplinar y en constante evolución, que se utiliza para administrar, documentar, gestionar y reconstruir digitalmente el patrimonio cultural arquitectónico.

La metodología propuesta ha sido validada en dos casos de estudio: la iglesia Santa María la Real de Mave y el Castillo Torrelobatón. Los resultados del modelado digital de ambos casos representan una solución para el modelado 3D de una amplia gama de edificios con los mismos estilos, debido a la flexibilidad de los elementos modelados que pueden cambiar en forma y proporciones, adaptándose

así a los nuevos requisitos sin tener que comenzar desde cero. Asimismo, gracias a las cualidades de BIM y a la información almacenada en los elementos agrupados en HBIM, es posible producir documentación técnica (planta, secciones, detalles, proyecciones, etc.) con información cuantitativa y cualitativa, lo que permite un análisis detallado de forma remota y multidisciplinar en el marco general del *patrimonio inteligente*.

Por otro lado, aunque la información geométrica sobre los elementos patrimoniales incorporados resulte semánticamente rica en sí misma, al vincular la base de datos de los elementos modelados con el vocabulario de Getty, mundialmente conocido como Tesoro de Arte y Arquitectura (AAT), es posible lograr la consistencia en la catalogación de los elementos necesarios, así como una recuperación más eficiente de la información de forma estandarizada. Esta vinculación gráfico-semántica tan útil se aplica particularmente al caso de estudio del Castillo de Torrelobatón para hacer del HBIM una biblioteca significativa de elementos fundamentales de la arquitectura defensiva desde la Edad Media hasta el Renacimiento en Europa, de los cuales este Castillo es un ejemplo representativo.

## **Abstract**

The management, conservation and restoration of cultural heritage is being carried out all over the world due to its growing interest as an engine of socio-economic and cultural development. The existence of reliable and three-dimensional (3D) digital models of tangible cultural heritage, particularly of real estate (monuments, buildings, etc.), is currently a growing need due to the possibility of facilitating the understanding, planning and dissemination of projects of management, conservation and restoration.

Nowadays, a solution to faithfully represent the surfaces of historic buildings is the use of point clouds obtained by systems of laser scanning and photogrammetry. Unfortunately, the captured point clouds do not contain additional information about the architectural objects whose geometry they represent. Therefore, it is necessary to produce 3D geometric models from the use of these clouds. To achieve 3D geometric modeling, point clouds can be incorporated into the Building Information Modeling (BIM) platforms, which in recent decades have been adopted by the Architecture, Engineering, Construction (AEC) and Facility Management (FM) sectors, to integrate the design, documentation and digital management of buildings. Particularly, BIM platforms are based on parametric components stored in a database called object library. These parametric components are reusable objects that can store and represent the geometric, semantic or topological attributes that describe each modeled element.

However, despite the progress that has been achieved by the BIM platforms, their parametric modeling programs still having some limitations to represent and model the homogeneous and irregular surfaces present in most historic buildings. This is mainly due to BIM platforms lack historical libraries with parametric objects capable of representing the particular characteristics of the scanned architectural heritage. In addition, obtaining 3D models from the use of point clouds can be considered as one more problem because BIM platforms do not have tools or components capable of automatically converting the irregular surfaces of a point cloud into parametric objects. Therefore, the modeling process can be considered slow and complex.

In this context, the current doctoral thesis document presents an efficient and replicable methodology that facilitates and accelerates the digital and detailed modeling of the architectural heritage. For this, the proposed methodology consists of three stages.

The first stage covers the collection of geometric, semantic and typological information. The geometric data is obtained from the point clouds captured by laser scanning and photogrammetry methods. On the other hand, the semantic and typological data are obtained from the manuscripts and historical documents, and from the technical analysis of the building. This information is able to represent the state of conservation of the buildings analyzed, their particular characteristics, their materials, rules and constructive patterns that follow, as well as the past transformations that could have affected the building. The second stage covers the ontological organization of acquired semantic data and the preprocessing of point clouds. This stage of organization and preprocessing makes it possible to accurately reference the information acquired.

In the third stage, semantic data and pre-processed point clouds are integrated into a single graphical semantic structure using the BIM environment. For this stage, it is proposed to make cuts, sections and views on the point cloud (following the norms, rules and construction patterns), to recognize the characteristics of the scanned architectural objects. Subsequently, are used grids to manually delimit the internal and external contour of the point clouds. Once the point cloud has been segmented and delimited, the basic tools of BIM are used to parametrically model the simple surfaces (according to their appearance in view, section or elevation) that the studied building presents. On the other hand, for the irregular surfaces, other tools are used, which are related to the profiling and three-dimensional modeling of the objects.

The obtained components, when applying the methodology developed, are used to create a library of parametric elements under the concept of Heritage Building Information Modeling (HBIM). HBIM is considered as a BIM parametric objects special library that has been designed as a multidisciplinary and constantly evolving system that is used to administrate, document and digitally reconstruct the architectural cultural heritage.

The proposed methodology has been validated in two case studies: the Santa María la Real de Mave church and the Torrelobatón castle. The results of the digital modeling of both cases represent a solution for the 3D modeling of a wide range of buildings with the same styles, due to the flexibility of the modeled elements that can change in form and proportions, thus adapting to the new requirements without having to start from the scratch. Also, thanks to the qualities of BIM and the information stored in the elements grouped in HBIM, it is possible to produce technical documentation (plant, sections, details, projections, etc.) with quantitative and qualitative information, which allows a detailed analysis in remote and multidisciplinary way in the general framework of *intelligent heritage*.

On the other hand, although the geometric information about the incorporated patrimonial elements result semantically rich in itself, linking the data base of modeled elements with the vocabulary of Getty, worldwide well-known as the Art and Architecture Thesaurus (AAT), it is possible to achieve consistency in the cataloging of the necessary elements, as well as a more efficient retrieval of information in a standardized way. This so useful graphical-semantic linking is particularly applied to the case study about Torrelobatón Castle to make up the HBIM meaningful set of fundamental elements of the defensive architecture from the Middle Age to the Renaissance in Europe, of which this Castle is a representative example.

# Índice

<b>Lista de abreviaciones .....</b>	<b>IV</b>
-------------------------------------	-----------

<b>Lista de figuras .....</b>	<b>VI</b>
-------------------------------	-----------

<b>Lista de tablas .....</b>	<b>X</b>
------------------------------	----------

## **Capítulo 1: Introducción**

<b>1.1. Introducción .....</b>	<b>12</b>
<b>1.2. Marco de la investigación .....</b>	<b>12</b>
<b>1.3. Motivación y objetivos .....</b>	<b>15</b>
<b>1.4. Alcance de la tesis .....</b>	<b>17</b>
<b>1.5. Principales contribuciones .....</b>	<b>18</b>
<b>1.6. Publicaciones .....</b>	<b>21</b>
<b>1.7. Organización de la tesis .....</b>	<b>22</b>

## **Capítulo 2: Captura y procesamiento de datos**

<b>2.1. Introducción .....</b>	<b>25</b>
<b>2.2. Documentación del patrimonio .....</b>	<b>25</b>
<b>2.3. Tecnologías de medición .....</b>	<b>29</b>
2.3.1. Método tradicional .....	29
2.3.2. Método topográfico convencional .....	30
2.3.3. Método Fotogramétrico .....	31
2.3.4. Técnica de escaneado láser .....	32
<b>2.4. Nube de puntos .....</b>	<b>35</b>
2.4.1. Preprocesamiento de datos geométricos .....	35
<b>2.5. Marco conceptual del modelado geométrico 3D .....</b>	<b>37</b>
<b>2.6. Modelado geométrico 3D desde la nube de puntos .....</b>	<b>39</b>
2.6.1. Aproximación al modelado manual y semiautomático .....	40
2.6.2. Aproximación al modelado automático .....	41
<b>2.7. Conclusiones .....</b>	<b>45</b>

## **Capítulo 3: Modelado Paramétrico**

<b>3.1. Introducción</b>	<b>48</b>
<b>3.2. Modelado paramétrico de los edificios existentes</b>	<b>48</b>
<b>3.3. Building Information Modeling (BIM)</b>	<b>50</b>
3.3.1. Evolución de BIM	52
3.3.2. Actualidad y características de BIM	54
3.3.3. Librerías Paramétricas	59
3.3.4. Modelado de componentes BIM a partir del uso de la nube de puntos	60
<b>3.4. BIM para la preservación y documentación del patrimonio</b>	<b>62</b>
<b>3.5. Heritage Building Information Modeling (HBIM)</b>	<b>63</b>
3.5.1. Revisión de la investigación	64
<b>3.6. Conclusiones</b>	<b>66</b>

## **Capítulo 4: Metodología para la creación de objetos paramétricos históricos bajo el concepto de HBIM**

<b>4.1. Introducción</b>	<b>69</b>
<b>4.2. Primera etapa</b>	<b>70</b>
4.2.1. Recolección de datos históricos (información semántica)	71
4.2.2. Recolección de datos geométricos (información espacial)	75
<b>4.3. Segunda etapa: análisis, organización y procesamiento de datos</b>	<b>76</b>
<b>4.4. Tercera etapa: modelado de los componentes arquitectónicos</b>	<b>78</b>
4.4.1. Superficies regulares	85
4.4.2. Superficies irregulares	87
<b>4.5. Conclusiones</b>	<b>90</b>

## **Capítulo 5: Evaluación del HBIM en casos de estudios**

<b>5.1. Introducción</b>	<b>93</b>
<b>5.2. Caso de estudio: Iglesia Santa María la Real de Mave</b>	<b>93</b>
5.2.1. Datos de captura	95
5.2.2. Modelado geométrico en BIM con el procedimiento desarrollado	96
5.2.3. Resultado del modelo paramétrico de la Iglesia Santa María la Real de Mave	105
<b>5.3. Caso de estudio: Castillo Torrelobatón</b>	<b>108</b>
5.3.1. Datos de captura	110
5.3.2. Modelado geométrico en BIM con el procedimiento desarrollado	112

5.3.3. Resultado del modelado paramétrico del Castillo Torrelobatón .....	116
<b>5.4. Productividad de la metodología desarrollada .....</b>	<b>119</b>
<b>5.5. Conclusiones .....</b>	<b>123</b>
<b>Capítulo 6: Conclusiones y trabajos futuros</b>	
<b>6.1. Conclusiones .....</b>	<b>126</b>
<b>6.2. Análisis de las Debilidades, Amenazas, Fortalezas y Oportunidades (DAFO) .....</b>	<b>128</b>
6.2.1. Debilidades .....	129
6.2.2. Amenazas.....	129
6.2.3. Fortalezas .....	130
6.2.4. Oportunidades .....	130
<b>6.3. Trabajos futuros .....</b>	<b>131</b>
<b>Referencias .....</b>	<b>133</b>
<b>Webgrafía .....</b>	<b>143</b>



## Lista de abreviaciones

<b>Acrónimo:</b>	<b>Nombre completo:</b>
AEC	Arquitectura, Ingeniería y Construcción
AIA	American Institute of Architecture
API	Application-programming interface/Interfaz de programación de aplicaciones
as-built	Modelos BIM que demuestren como se ha construido
as-is BIM	Modelos BIM que demuestren las condiciones tal cual estan construidos
BIM	Building Information Modeling
BPA	Ball-Pivoting
B-rep	Boundary Representation
CAD	Diseño Asistido por Computadora
CH	Patrimonio Cultural/Cultural Heritage
CIPA	Comité Internacional de Fotogrametría Arquitectónica
CIPA Heritage Documentation	Comité Internacional para la Documentación del Patrimonio Cultural
COBie	Construction Operations Building Information Exchange
CSG	Constructive Solid Geometry
FM	Facility Management
GPS	Sistema de Posicionamiento Global
HBIM	Heritage Building Information Modeling
H-BIM	Historic Building Information Modeling
IAI	Industry Alliance for Interoperability
ICOMOS	Consejo Internación de Monumentos y Sitios
ICP	Iterative Closet Point
IFC	Industry Foundation Class
LOD	Level Of Development
MD	Metodología desarrollada
MVD	Model View Definition
NURBS	non-Uniform Rational B-Spline
OM	Otras metodologías
OSS	Open Source Software

PAS 1192-2 / PAS 1192-5	Publicly Available Specifications 1192-2/5
PCA	Principle Component Analysis
PCL	Point Cloud Library/Biblioteca de nube de puntos
RA	Realidad Aumentada
RANSAC	Random Sample Consensus
RV	Realidad Virtual
SfM	Structure for Motion
SDK	Software development kits/kits de desarrollo de <i>software</i>
Solid Modeling	Modelado de Solidos
STEP	Standard for The Exchange of the Product model
TLS	Escáner láser terrestre
TOF	Time of Flight
UNESCO	Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura
xBIM	eXtensible Building Information Modeling
WOB	Walking On BIM
UAV	Unmanned Aerial Vehicle/ Vehículo Aéreo no Tripulado

## Lista de figuras

<b>Figura 1:</b> Principio del método fotogramétrico. Fuente: Adaptado de (Luhmann et al., 2013). ....	31
<b>Figura 2:</b> A) Proceso de escaneo láser. B) Nube de puntos georreferenciados (X, Y, Z). .....	33
<b>Figura 3:</b> A) Sistemas TLS que se basan en triangulación. B) Sistemas TLS que se basan en diferencia de fase. C) Sistemas TLS que se basan en tiempo de vuelo. ....	34
<b>Figura 4:</b> El círculo con el término Building Information Modeling en el centro, muestra todas las fases del ciclo de vida de un edificio. Fuente: Adaptación al castellano de la versión original de <a href="http://www.grupoditecsa.com/es/metodologia-bim-renovarse-o-morir/">http://www.grupoditecsa.com/es/metodologia-bim-renovarse-o-morir/</a> . ....	51
<b>Figura 5:</b> Explicación de las distintas dimensiones de BIM. ....	56
<b>Figura 6:</b> Diagrama de bloques sobre el método de construcción de la biblioteca HBIM. ....	70
<b>Figura 7:</b> Planta figurativa sobre módulos y proporciones. Fuente: Izquierda: adaptado desde (Lorente & Francis, 2007). Derecha: figura propia. ....	72
<b>Figura 8:</b> Sección sobre un sistema de módulos repetitivos. Fuente: Izquierda: adaptado desde (Cohen, 2014). Derecha: figura propia. ....	73
<b>Figura 9:</b> Prototipo de un arco ricamente decorado, típico de las entradas románicas. Fuente: Izquierda: adaptado desde (Jackson, 1920). Derecha: figura propia. ....	74
<b>Figura 10:</b> A) Plan de trabajo de escaneo general. B) y C) Posicionamiento del escáner. D) Simulación de áreas ocultas. ....	76
<b>Figura 11:</b> Inserción de la nube de puntos procesada a la plataforma BIM (Autodesk Revit®). ....	77
<b>Figura 12:</b> A) Formas irregulares. B) Formas regulares. Fuente: Arquivolta: <a href="http://dentrodemochila.blogspot.com.es/2015/03/">http://dentrodemochila.blogspot.com.es/2015/03/</a> . Capitel: <a href="http://www.arquivoltas.com/8-palencia/Mave%20G05.jpg">http://www.arquivoltas.com/8-palencia/Mave%20G05.jpg</a> . Muro: <a href="https://i0.wp.com/castillosdelolvido.com/wp-content/uploads/2015/09/Castillo-de-Torrelobato%CC%81n_3156.jpg">https://i0.wp.com/castillosdelolvido.com/wp-content/uploads/2015/09/Castillo-de-Torrelobato%CC%81n_3156.jpg</a> . ....	79

**Figura 13:** **A)** Sección longitudinal de la nube de puntos. El recuadro de sección se resalta con una línea discontinua roja. **B)** Sección transversal de la portada (Pie) de la iglesia analizada. ....80

**Figura 14:** Conjunto de rejillas creadas sobre la planimetría de la nube de puntos. ....82

**Figura 15:** **A)** Vista Este de la nube de puntos con los niveles como límites de referencia. **B)** Tamaño de piedra aproximado. ....83

**Figura 16:** **A)** Planos de sección trazados sobre la planta principal proporcionada por la nube de puntos. **B)** Sección longitudinal con las inclinaciones de las paredes marcadas en rojo. La inclinación es inferior al 1% en todos los casos, por lo tanto, no hay peligro de colapso. ....84

**Figura 17:** Proyección y elevación del muro Norte, siguiendo el límite de las rejillas y niveles. ...85

**Figura 18:** Modelo paramétrico de una pared asociada a los diferentes elementos de los objetos: las propiedades pueden modificarse al realizar cambios en los valores numéricos del cuadro de dialogo. ....86

**Figura 19:** **A)** Planos de referencia verticales y horizontales. **B)** Imagen del perfil dibujado. **C)** Perfil trazado sobre las nubes de puntos del elemento. ....87

**Figura 20:** Cotas dimensionales creadas para el perfil de la cornisa (izquierda). Parámetros configurables del perfil (derecha). ....88

**Figura 21:** **A)** Línea de referencia diagramada y perfil 2D vinculado. **B)** Modelo solido 3D generado. **C)** Parámetros del objeto. ....89

**Figura 22:** **A)** Fachada sur de la iglesia románica Santa María la Real de Mave. **B)** Emplazamiento del monumento. Fuente: A) adaptado de <http://www.flickrriver.com/photos/rabiespierre/tags/klaster/>. B) adaptado de <http://www.bing.com/maps/>. ....93

**Figura 23:** Planta basilical dividida en tres naves. La entrada principal y el campanario se desarrollan en el pie. La sección de las tres naves articuladas y la torre-linterna se desarrollan en el cuerpo. Finalmente, se encuentra un ábside semicircular triple en la cabecera. ....94

**Figura 24:** **A)** Ubicación interna y externa del escáner láser durante el proceso de escaneo. **B)** Recopilación de datos internos. **C)** Recopilación de datos externos. **D)** Nube de puntos resultante.

Fuente: A y D) Figuras propias. B-C) Adaptado de (Lerones et al., 2014). .....	95-96
<b>Figura 25:</b> A) Conjunto de arcos. B) Conjunto de bóvedas y sus parámetros modificados. ....	99
<b>Figura 26:</b> A) Planos de referencia y perímetro de la forma (Familia Voluta). B) Parámetros del plano de trabajo 2D. ....	100
<b>Figura 27:</b> A) Línea de referencia. B) Geometría sólida del elemento (Arco 5). C) Parámetros del plano de trabajo 3D (Arco 5). ....	101
<b>Figura 28:</b> Secuencia constructiva del cilindro que sirve como centro del Capitel que decora la portada de la Iglesia. ....	102
<b>Figura 29:</b> Secuencia constructiva de una de las hojas que decoran el capitel y el resultado obtenido. ....	102
<b>Figura 30:</b> Resultado final del modelado de <i>Familia de Entrada</i> . ....	103
<b>Figura 31:</b> A) Columna cruciforme. B) Tipos y subtipos que componen las familias modeladas. C) Sección longitudinal, donde los pilares cruciformes con semicolumnas y la bóveda de cañón son separados por arcos que cubren la nave central. ....	104
<b>Figura 32:</b> Ejemplo de los diferentes niveles de desarrollo. ....	105
<b>Figura 33:</b> Similitudes entre la nube de puntos y los elementos creados. ....	106
<b>Figura 34:</b> A) Sección longitudinal de la iglesia. B) Sección transversal de la iglesia. C) Plano de planta de la Iglesia. ....	106-107
<b>Figura 35:</b> A) Vista sur del Castillo Torrelobatón. B) Emplazamiento del Castillo Torrelobatón. Fuente: A) adaptado de <a href="https://jesusantaroca.files.wordpress.com/2015/04/2-crop1.jpg">https://jesusantaroca.files.wordpress.com/2015/04/2-crop1.jpg</a> . B) adaptado de <a href="https://www.google.es/maps/@41.6504048,-5.0257042,390m/data=!3m1!1e3!5m1!1e4?hl=es">https://www.google.es/maps/@41.6504048,-5.0257042,390m/data=!3m1!1e3!5m1!1e4?hl=es</a> . ....	108
<b>Figura 36:</b> Planta arquitectónica del Castillo Torrelobatón. ....	109
<b>Figura 37:</b> Sección de la torre homenaje del Castillo Torrelobatón. ....	110

<b>Figura 38:</b> Nube de puntos final del Castillo Torrelobatón. ....	111
<b>Figura 39:</b> A) Vista 3D de la <i>Familia de muro</i> , subtipo <i>Muro Exterior Castillo Torrelobatón</i> . B) Modelado del muro sobre las rejillas del proyecto. C) Tablas de dialogo para modificar los parámetros del muro. ....	113
<b>Figura 40:</b> Bóvedas de la torre del homenaje. . ....	114
<b>Figura 41:</b> A) Vinculación de Getty AAT con los parámetros de la torre de homenaje. B) Vinculación del vocabulario Getty AAT con la paleta de propiedades. ....	115
<b>Figura 42:</b> Modelo Virtual Castillo Torrelobatón. ....	116
<b>Figura 43:</b> Similitudes entre secciones de la nube de puntos y los componentes modelados. ....	117
<b>Figura 44:</b> Resaltada en azul: Izquierda: alambor; Derecha: almenas. ....	118
<b>Figura 45:</b> Resaltado en azul: Izquierda: garitón; Derecha: maticán/ménsula. ....	118
<b>Figura 46:</b> Resaltada en azul: izquierda: muros cortina; Derecha: torres cubo. ....	119
<b>Figura 47:</b> Resaltado en azul: Izquierda: torre de homenaje; Derecha: bóveda medio cañón (arriba) y bóveda de crucería (abajo). ....	119

## Lista de tablas

<b>Tabla 1:</b> Datos de la adquisición de la nube de puntos. ....	111
<b>Tabla 2:</b> Biblioteca HBIM enriquecida semánticamente para el Castillo de Torrelobatón (Valladolid, España). ....	118
<b>Tabla 3:</b> Tiempo empleado para el modelado paramétrico de los monumentos a partir del uso de las nubes de puntos. ....	122
<b>Tabla 4:</b> Tiempo empleado para el modelado paramétrico utilizando los componentes de la biblioteca HBIM. ....	123

# Capítulo 1

Introducción



## **1.1. Introducción**

El primer capítulo de esta tesis proporciona una introducción a la investigación realizada. Además, este capítulo incluye una descripción de las problemáticas, las motivaciones y los objetivos, el alcance, las aportaciones y las publicaciones de esta investigación.

## **1.2. Marco de la investigación**

El patrimonio mundial que se divide integralmente en patrimonio natural y cultural es considerado como todo aquello que tiene un valor universal desde el punto de vista histórico (Simenone et al., 2014). A su vez, el patrimonio cultural (CH) se divide en dos grandes categorías, el patrimonio cultural tangible y el patrimonio cultural intangible. El patrimonio cultural tangible, particularmente los bienes inmuebles (monumentos, edificios, etc.), se consideran patrimonio arquitectónico y son una fuente de vida e inspiración cultural irremplazable. Lamentablemente, los elementos, monumentos o edificios considerados patrimonio arquitectónico se encuentran amenazados por el deterioro de los materiales, los desastres naturales, el aumento del turismo, las guerras, las campañas militares o el terrorismo (Ibañez et al., 2015). Por esta razón, y como se ha planteado en la Carta de Venecia (ICOMOS, 1964), la necesidad de registrar y documentar el patrimonio arquitectónico es crucial de cara a gestionar, conservar o restaurar un legado histórico para las generaciones actuales y venideras.

La documentación y el registro del estado actual del patrimonio constituyen los primeros pasos para desarrollar eficazmente los procesos de gestión, conservación y/o restauración. Por lo tanto, la recopilación sistemática, el almacenamiento y el procesamiento de todo tipo de información disponible sobre los edificios será necesario para determinar sus características geométricas y estado físico actual, los defectos o patologías, el estilo arquitectónico, las diferentes etapas constructivas, así como también las circunstancias históricas y culturales de cuando fueron concebidos.

Ciertamente, la posibilidad de documentar, reproducir y difundir en detalle el aspecto real de un monumento ya construido, fragmentado o destruido es una necesidad para los interesados en el campo de la conservación y la restauración. Por esta razón, el desarrollo de modelos digitales 3D estructurados, como parte de mejora en la documentación del patrimonio arquitectónico es en realidad una necesidad urgente. En general, los modelos 3D resultantes se convierten en un marco de referencia crucial para la comprensión y la gestión del edificio documentado (Letellier et al., 2007), Además, estos modelos se consideran una fuente de datos (gráficos, semánticos y topológicos)

adecuada para ayudar en los proyectos de conservación, restauración y reconstrucción, y en los trabajos de otros aspectos de gran interés como el análisis energético, estructural y económico del edificio.

Dentro del marco formado por las tendencias teóricas contemporáneas, para crear una representación precisa y actualizada de un monumento se requiere que el mismo esté completamente medido y documentado con precisión. Por tal motivo, los expertos en patrimonio cultural han empleado diversos métodos de adquisición de datos geométricos. Antiguamente, se utilizaban el método tradicional<sup>1</sup> y el método topográfico<sup>2</sup> convencional como sistemas de levantamiento gráfico. Sin embargo, al ser técnicas de medición manual, consumían mucho tiempo y la precisión de sus resultados de medición no siempre era uniforme.

Hoy en día se puede lograr un alto nivel de automatización mediante el uso pertinente de tecnologías de escaneo 3D y fotogrametría. Estas herramientas permiten acelerar la recopilación de los datos espaciales, manteniendo siempre el nivel de detalle y la precisión de la información adquirida. En particular, los escáneres láser proporcionan una gran cantidad de datos tridimensionales en poco tiempo, bajo la forma de millones de puntos con coordenadas geométricas (X, Y, Z) (Gómez-García-Bermejo et al., 2013). Además, la información cromática también puede ser incorporada mediante el uso de cámaras digitales (Lerones et al., 2014). Sin embargo, manejar dicha cantidad de datos requiere grandes recursos computacionales. Además, para que las nubes de puntos resulten útiles, se requieren una serie de pasos previos como la limpieza y el filtrado de las mismas, obteniendo así una nube global final que represente la complejidad real del patrimonio documentado.

Las nubes de puntos así procesadas podrían incorporarse a las plataformas Building Information Modeling (BIM), que han sido adoptadas por los sectores de Arquitectura, Ingeniería, Construcción (AEC) y Facility Management<sup>3</sup> (FM) en los últimos años como un medio para integrar el diseño, la documentación y la gestión digital de edificios. Las plataformas BIM se basan en componentes paramétricos almacenados en una base de datos dinámica 3D denominada biblioteca de objetos. En general, los elementos paramétricos son objetos reutilizables que pueden almacenar y representar los atributos geométricos, semánticos o topológicos que describan a cada elemento modelado.

---

<sup>1</sup> Método tradicional. Véase apartado 2.3.1.

<sup>2</sup> Método topográfico. Véase apartado 2.3.2.

<sup>3</sup> FM es un término genérico de naturaleza holística que reúne una amplia gama de funciones relacionadas al beneficio de la propiedad y sus usuarios (Hosseini et al., 2018).

Sin embargo, cuando se piensa en la arquitectura, la ingeniería o la industria de la construcción, se consideran a menudo nuevas construcciones y proyectos. Por esta razón, las bibliotecas BIM nativas se centran en el diseño y la construcción de nuevos edificios con objetos simples, regulares y estandarizados, por lo cual se crean vacíos o imperfecciones al utilizarse en el modelado de edificios históricos. En consecuencia, la reconstrucción digital y detallada del patrimonio arquitectónico ha revelado algunas limitaciones de las plataformas BIM. Principalmente, las plataformas BIM no tienen herramientas específicas para gestionar y modelar con precisión las formas complejas e irregulares presentes en los edificios históricos. Además, estas plataformas carecen de bibliotecas históricas con objetos paramétricos predefinidos adecuados para el modelado del patrimonio arquitectónico. Por lo tanto, resulta necesario crear cada componente arquitectónico desde cero, de tal forma que el modelado digital y detallado de los edificios históricos se convierte en un proceso que requiere mucho tiempo.

Por otro lado, la obtención de modelos 3D paramétricos de los elementos constructivos a partir de las nubes de puntos puede considerarse como una problemática más. Esto se debe a que actualmente no existen algoritmos o componentes de *software* capaces de reconocer y convertir automáticamente las superficies irregulares de una nube de puntos en objetos paramétricos. Por lo tanto, en la práctica la intervención humana especializada será necesaria hasta cierto punto para modelar los diferentes elementos. Al intervenir personal especializado el proceso de modelado puede considerarse complejo y costoso.

De acuerdo con los trabajos de (Murphy et al., 2009; Volk et al., 2014), una vez que se crean los objetos paramétricos en 3D utilizando la documentación técnica e histórica arquitectónica y los datos de escaneo láser o fotogrametría<sup>4</sup>, se deben generar bibliotecas de los elementos modelados, encapsulando así el concepto de Heritage Building Information Modeling (HBIM)<sup>5</sup>. Estas nuevas bibliotecas HBIM, que funcionan como un complemento de BIM, permiten que los procesos de diseño, gestión, reconstrucción, conservación y mantenimiento del patrimonio arquitectónico sean más simples, claros y rápidos durante el resto de su ciclo de vida.

En el dominio del patrimonio cultural, el enfoque orientado a HBIM representa una solución hacia el modelado 3D de una amplia gama de edificios con un mismo estilo, debido a la flexibilidad de los

---

<sup>4</sup> En general, en esta tesis se asume que la información tridimensional se obtiene mediante técnicas de escaneo láser, aunque podría utilizarse igualmente fotogrametría o una combinación de ambas técnicas

<sup>5</sup> En la comunidad científica, el acrónimo HBIM también se utiliza como Historic-BIM (H-BIM). Ambas terminologías son aceptadas para su uso en la investigación sobre modelado paramétrico de monumentos históricos.

elementos modelados que pueden cambiar de forma y proporciones, adaptándose así a los nuevos requisitos. Además, los componentes de las bibliotecas HBIM pueden ser utilizados para producir información cuantitativa y cualitativa relacionada con temas como la documentación técnica e histórica, los datos de monitorización y la información energética, lo que abre las puertas a un análisis detallado, incluso remoto, y multidisciplinar en el marco general del *patrimonio inteligente*.

Por último, a pesar de que la información gráfica sobre los elementos patrimoniales incorporados a la biblioteca HBIM es semánticamente rica en sí misma, se considera obligatorio definir una ontología adecuada, es decir una representación formal del conocimiento como una jerarquía de conceptos dentro del dominio del patrimonio cultural, utilizando un vocabulario compartido para denotar los tipos, propiedades e interrelaciones de los aspectos del patrimonio cultural.

En este contexto, el Tesoro de Arte y Arquitectura Getty (AAT)<sup>6</sup>, como vocabulario estructurado mundialmente conocido, es el que permite no solo la automatización sino también la catalogación de los registros relacionados con las bellas artes, la arquitectura, las artes decorativas, los materiales de archivo y el material cultural. Getty AAT es un diccionario de sinónimos que consta de alrededor de 44.000 conceptos, incluidos 131.000 términos genéricos, descripciones, citas bibliográficas y otra información. Es la herramienta punta para la recuperación de la información de forma estandarizada.

Estos dominios de gestión, documentación, modelado 3D y catalogación del patrimonio arquitectónico resultan en sí mismos un área amplia y de un alcance demasiado grande para una tesis única. Por lo tanto, el foco se centrará en la capturar de información geométrica y semántica, y en la creación de objetos paramétricos a partir del uso de las nubes de puntos en el entorno BIM.

### **1.3. Motivación y objetivos**

La principal motivación que impulsa a investigar sobre la reconstrucción tridimensional del patrimonio arquitectónico mediante la manipulación de nubes de puntos y datos históricos en sistemas BIM es la amplia variedad de aplicaciones para las que pueden utilizarse los modelos resultantes. Esto incluye que los modelos puedan ser utilizados como maquetas virtuales, como fuente de información para la documentación y gestión de los edificios existentes, y como herramientas para cálculos energéticos, estructurales y económicos. Una segunda motivación que induce a esta

---

<sup>6</sup> The Getty Research Institute. Contribute to the Getty Vocabularies. URL <http://www.getty.edu/research/tools/vocabularies/contribute.html>. [En línea] Acceso: 10/09/2017.

investigación es la necesidad de mejorar las actuales metodologías de modelado digital de los edificios existentes. En este contexto, la complejidad general de los bienes inmuebles y el limitado progreso en la automatización completa del proceso de paso de nubes de puntos a BIM resaltan algunos aspectos prácticos que deben tenerse en cuenta al investigar este tema.

Como resultado de todo esto, el objetivo general de esta tesis es crear modelos BIM precisos y actualizados del patrimonio arquitectónico, a partir del uso de nubes de puntos y datos históricos. El BIM resultante reflejará el estado actual de cada edificio histórico y será utilizado como herramienta documental para obtener rápidamente planos, alzados, secciones, vistas y detalles técnicos de los edificios en cuestión.

Este objetivo general del presente trabajo de investigación deriva en los siguientes objetivos específicos:

- Obtener los datos (geométricos y semánticos) necesarios para el estudio y modelado de los inmuebles seleccionados.
- Desarrollar un flujo de trabajo para combinar los datos obtenidos de la exploración láser y la documentación histórica en una única estructura digital, utilizando las herramientas BIM.
- Diseñar una metodología aplicable sobre las plataformas BIM, para acelerar el modelado paramétrico del patrimonio arquitectónico.
- Implementar el procedimiento diseñado sobre las nubes de puntos obtenidas, respetando los patrones históricos analizados, para de este modo lograr un modelo digital 3D que se adapte a las características particulares de cada edificio histórico estudiado.
- Generar geometrías BIM que contengan información semántica y espacial del edificio analizado.
- Agrupar y organizar los objetos modelados en una biblioteca HBIM actualizable, a fin de proporcionar una herramienta que simplifique las actividades de documentación, gestión, control, mantenimiento y restauración del edificio analizado.
- Crear una biblioteca HBIM disponible a través de servicios web, capaz de ser utilizada por las distintas oficinas involucradas en la investigación del patrimonio cultural, para acelerar la consulta y simplificar las operaciones de actualización de los parámetros que definen los aspectos gráficos, constructivos y analíticos, en tiempo real.
- Validar la eficacia de la biblioteca de modelado HBIM con dos casos de estudio real.

- Validar con un caso de estudio el proceso de vinculación de los modelos de la biblioteca HBIM con la taxonomía Getty (AAT) para así proporcionar a los distintos elementos información semántica estandarizada a nivel mundial.

#### **1.4. Alcance de la tesis**

Como las plataformas BIM son utilizadas para el trabajo digital en todo el dominio de la industria de la construcción y debido a que el modelado de edificios existentes puede involucrar muchas áreas de investigación, es necesario definir con precisión el alcance específico de esta Tesis.

En concreto, tal y como se indicó anteriormente, el foco de la presente investigación se centrará en la captura de información geométrica y semántica, y en el proceso de modelado de objetos paramétricos a partir del uso de las nubes de puntos en el entorno BIM. Para ello se han llevado a cabo extensas investigaciones previas sobre la captura y el procesamiento de los datos, y también sobre las técnicas de automatización del modelado 3D de los edificios existentes.

Por otra parte, el nivel de precisión y detalle, gráfico y semántico de cada elemento modelado, dependerá del uso al que esté vinculado dicho elemento. El caso de los elementos utilizados para la gestión de espacios, instalaciones o simulaciones cae en el rango de los modelos de menor precisión, ya que la información que contienen se utiliza principalmente para la planificación de los espacios. Por otro lado, los casos de restauración o mantenimiento del patrimonio arquitectónico requerirán elementos con altos niveles de detalle y precisión, ya que su función será representar el aspecto real del objeto analizado. El presente trabajo se centra en el modelado preciso del patrimonio arquitectónico, utilizando las tecnologías de vanguardia relacionadas con BIM y su capacidad de intercambiar información para su posterior análisis y gestión. En concreto, se propone una metodología eficiente y replicable, para convertir datos láser o fotogramétricos en elementos de BIM agrupados en una biblioteca, adaptados a las características particulares de los edificios históricos. Para ello, se propone la utilización de secciones, vistas y rejillas que sigan las normas, reglas y patrones constructivos analizados en los datos bibliográficos correspondientes a los períodos arquitectónicos históricos.

La metodología propuesta se aplica a dos casos de estudio: un monumento del periodo Románico del siglo XII y otro del Gótico tardío del siglo XV, ambos pertenecientes al patrimonio histórico español. Sin embargo, las reglas de procedimiento desarrolladas podrían aplicarse a edificios de cualquier otro

período, siempre que las secciones, vistas y rejillas estén adaptadas al método de construcción, tecnología, tipología y materiales correspondientes.

Paralelamente este trabajo de tesis representa una oportunidad para iniciar un programa avanzado de digitalización, catalogación y recuperación del patrimonio arquitectónico europeo, permitiendo y facilitando el proceso de creación de una base de datos digital, unificada y estandarizada.

## 1.5. Principales contribuciones

Las aportaciones al conocimiento realizadas por esta tesis se resumen a continuación:

- **Descripción de las herramientas de adquisición de datos espaciales y su introducción al entorno BIM.** Uno de los puntos claves para la documentación y el modelado digital del patrimonio arquitectónico es la captura y el levantamiento gráfico de la superficie del edificio. Esto significa que es de gran importancia conocer cuáles son las herramientas de medición más importantes. En este contexto, en el capítulo 2 se describen las herramientas de adquisición de datos espaciales más influyentes en la actualidad. Paralelamente, en este capítulo se demuestra que los escáneres laser 3D y la fotogrametría permiten acelerar enormemente el proceso de levantamiento gráfico, logrando obtener representaciones detalladas en menor tiempo. En el capítulo 4 se describe como los datos capturados por los escáneres laser y la fotogrametría son introducidos al entorno BIM, para su posterior uso como guía en el proceso de modelado paramétrico.
- **Análisis bibliográfico que nos permite identificar y comprender las tendencias actuales y las lagunas en el conocimiento sobre el modelado de geometrías BIM a partir del uso de las nubes de puntos.** La literatura del capítulo 2 demuestra las contribuciones internacionales más significativas con relación al modelado geométrico 3D a partir del uso de los datos capturados. Este análisis bibliográfico presenta una serie de enfoques que describen procesos de modelado manuales y automáticos, lo que resulta importante para la comprensión de las capacidades de modelado actuales. Aunque existen algunos enfoques científicos que ayudan a automatizar el modelado de las nubes puntos, todavía su implementación es viable para el proceso de segmentación y reconocimiento de las superficies simples y regulares que presenta una nube de puntos. Además, el análisis bibliográfico demuestra que son pocos los enfoques científicos que utilizan los objetos paramétricos de BIM, para modelar las geometrías que representan las nubes de puntos. Esto

significa, que el conocimiento y la comprensión de las tendencias actuales son de gran ayuda para el desarrollo de una metodología dinámica, que mejore y sistematice el proceso de modelado paramétrico.

- **Revisión crítica de la literatura existente sobre BIM y su implementación para el modelado 3D del patrimonio arquitectónico.** La revisión sobre BIM demuestra las capacidades y cualidades que presenta esta herramienta de vanguardia para el desarrollo de modelos paramétricos integrales. En este contexto, el capítulo 3 describe el origen, la evolución e implementación de BIM a nivel mundial. Además, la literatura muestra algunos enfoques prometedores para la implementación de BIM en el modelado digital del patrimonio arquitectónico, sin embargo, la mayoría de las obras analizadas han utilizado a las plataformas BIM como medio para parametrizar los modelos digitales creados externamente y no como herramienta de modelado propiamente dicha. La utilización de varias herramientas de diseño puede funcionar bien cuando se trata de objetos aislados, pero resulta un inconveniente cuando se busca tener una perspectiva global de los elementos creados y el modelo final. El análisis bibliográfico de los capítulos 2 y 3, sirven como base para el desarrollo de una metodología dinámica, que permita sistematizar y acelerar el modelado del patrimonio arquitectónico desde un único archivo BIM.
- **Nuevo proceso de diseño desarrollado como complemento de BIM para acelerar y facilitar la reconstrucción digital de objetos paramétricos a partir del uso de las nubes de puntos.** Las bases del proceso de diseño desarrollado se presentan en el capítulo 4. En este capítulo se describe como a través del conocimiento histórico se acelera el proceso de segmentación y corte de la nube de puntos introducidas al entorno BIM. Además, se detalla como a partir del uso de las herramientas nativas de BIM es posible modelar en detalle las superficies que proveen las nubes de puntos. Los componentes paramétricos modelados se agrupan en una biblioteca histórica denominada HBIM y posteriormente se posicionan con facilidad en el modelo global del edificio. El proceso de diseño presente en el capítulo 4 es una metodología de modelado semiautomática que en comparación a otras metodologías, permite acelerar el modelado de componentes arquitectónicos con información semántica e histórica dentro de su base de datos. La productividad del proceso de diseño desarrollado se prueba y cuantifica en el capítulo 5.



- **Casos de estudio para validar la productividad del proceso de diseño desarrollado.** EL proceso de diseño desarrollado en el capítulo 4 se implementa para el modelado paramétrico y sistemático de dos monumentos representativos del patrimonio español. Los resultados obtenidos sirven como base de aprendizaje para los interesados en generar modelos paramétricos a partir del uso de los datos del levantamiento gráfico. El capítulo 5 describe como los modelos digitales de los dos casos de estudio pueden utilizarse para la documentación técnica del patrimonio arquitectónico analizado.
- **Nuevos elementos paramétricos, almacenados en una biblioteca HBIM, para sistematizar y acelerar el modelado digital de otros proyectos de similares características.** Los componentes arquitectónicos obtenidos al modelar digitalmente los casos de estudios se almacenan en una biblioteca HBIM. Estos componentes resultantes, brindan la oportunidad de acelerar el modelado paramétrico de las superficies escaneadas de otro monumento de similares características. Esto significa, que al crear una biblioteca HBIM universal se mejorara, fortalecerá y acelerara el mantenimiento y rehabilitación del patrimonio arquitectónico global. El capítulo 5 evalúa y cuantifica la productividad de utilizar los componentes de la biblioteca HBIM para el modelado paramétrico.
- **Orientación de los objetos resultantes hacia una catalogación estandarizada.** Uno de los casos de estudio de la presente tesis doctoral se vincula con el vocabulario de Getty AAT, con el fin de estandarizar la catalogación de los componentes arquitectónicos modelados. La vinculación entre BIM y Getty, permite que la información semántica de la base de datos de cada componente sea mundialmente conocida. Esto significa, que los usuarios a través de un enlace web pueden conocer la identidad y los datos semánticos de los distintos componentes que se agrupan en una biblioteca HBIM, sin tener la necesidad de corroborar la veracidad de la información adquirida.

El proceso de diseño desarrollado es parte de una metodología integral basada en el uso de las nubes de puntos y los patrones constructivos correspondientes a los periodos arquitectónicos históricos. Esta unión gráfica y semántica permitirá modelar las diversas superficies encontradas en los edificios analizados. Además, el desarrollo de esta metodología se considera una solución eficiente para superar las limitaciones de los programas BIM, lo que demuestra que podrá ser utilizada como herramienta para el modelado de un patrimonio completo, así como también para las nuevas aplicaciones en los sectores de AEC/FM.

## 1.6. Publicaciones

A continuación, se muestra la lista de publicaciones generadas a lo largo de la realización de la presente tesis doctoral.

### Revistas:

- López, F. J., Leronés, P. M., Llamas, J., Gómez-García-Bermejo, J., & Zalama, E. (2017). *A Framework for Using Point Cloud Data of Heritage Buildings Toward Geometry Modeling in A BIM Context: A Case Study on Santa Maria La Real De Mave Church*. *International Journal of Architectural Heritage*, 11(7), 965-986. (<https://doi.org/10.1080/15583058.2017.1325541>).
- López, F. J., LERONES, P. M., LLAMAS, J., GÓMEZ-GARCÍA-BERMEJO, J. A. I. M. E., & ZALAMA, E. (2018). *Semi-automatic Generation Of Bim Models For Cultural Heritage*. *International Journal of Heritage Architecture*, 2(2), 293-302. (<https://doi.org/10.2495/HA-V2-N2-293-302>)
- López, F. J., Leronés, P. M., Llamas, J., Gómez-García-Bermejo, J., & Zalama, E. (2018). *A review of Heritage Building Information Modeling (H-BIM)*. Special Issue of the journal *Multimodal Technologies and Interaction on the subject of Digital Cultural Heritage*. *Multimodal Technologies Interact.* 2018, 2(2), 21. (<https://doi.org/10.3390/mti2020021>).

### Congresos:

- López, F. J., Leronés, P. M., Llamas, J., Gómez-García-Bermejo, J., & Zalama, E. (2016). *Generación Automática de modelos BIM para Patrimonio Cultural*, *Proceedings del X Congreso Internacional AR&PA*, 10-12 Noviembre, 2016, Valladolid, España.
- López, F. J., Leronés, P. M., Llamas, J., Gómez-García-Bermejo, J., & Zalama, E. (2018). *Linking HBIM graphical and semantic information through the Getty AAT: Practical application to the Castle of Torrelobatón*. *In Proceedings of the 1st International Conference, Florence Heri-Tech - The Future of Heritage Science and Technologies*, 16-18 May 2018 Florence, ITALY. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 364, conference 1.

## **1.7. Organización de la tesis**

La organización de la presente tesis se divide en seis capítulos:

El primer capítulo proporciona una introducción a la investigación, que expresa de manera sintética y en general los temas abordados. Además, este capítulo describe las problemáticas, las metas y los objetivos, el alcance de la tesis, las principales aportaciones y las publicaciones realizadas.

El segundo capítulo de la tesis explica en detalle los pasos necesarios para la documentación del patrimonio arquitectónico. Inicialmente se presenta un resumen de las tecnologías de captura de datos más relevantes. Posteriormente se enfatiza la descripción del escáner laser terrestre y su resultado, que se describe como una nube de puntos. Luego se explican las etapas de procesamiento necesarias para que estas nubes de puntos puedan ser utilizadas. Además, en este capítulo se introduce el concepto de modelado geométrico 3D y el uso de las citadas nubes de puntos para la reconstrucción tridimensional de las geometrías que serán relevantes para el modelado digital de los edificios.

El tercer capítulo presenta el concepto de modelado paramétrico. Además, la revisión bibliográfica realizada para este capítulo ha demostrado el aumento de investigaciones dirigidas a la reconstrucción digital del patrimonio arquitectónico con BIM. Por lo tanto, será importante entender que es BIM, cómo ha evolucionado y su utilización en la gestión de los edificios existentes. Este capítulo también examina la incorporación de las nubes de puntos a las plataformas BIM para el registro y el modelado paramétrico del patrimonio arquitectónico. Además, se describe el nuevo concepto de biblioteca HBIM y la capacidad de sus componentes paramétricos.

Después de haber explicado las herramientas y el marco teórico en el que se desarrolla la presente tesis doctoral, el cuarto capítulo presenta el diseño de una metodología eficaz para el modelado de los componentes paramétricos que se agruparán en una biblioteca de objetos bajo el concepto de HBIM. En este capítulo se explica el proceso de adquisición e implementación de los datos geométricos y semánticos. Las fuentes arquitectónicas que son parte de los datos semánticos permitirán comprender e interpretar las reglas y patrones arquitectónicos correspondientes al periodo analizado. Además, en este capítulo se proponen un conjunto de reglas y acciones que mejoran y aceleran el proceso de creación de geometría a partir del uso nubes de puntos y patrones arquitectónicos históricos.

Esto es seguido por dos casos de estudio concretos, en el quinto capítulo, que implementan y validan la efectividad de la metodología diseñada para el modelado de los componentes históricos y la

creación de biblioteca HBIM. Además, los escenarios de evaluación prueban la exactitud de los modelos resultantes contra los datos reales obtenidos sobre el terreno. Por otro lado, este capítulo describe cómo la biblioteca HBIM creada puede ser utilizada como herramienta para producir la documentación técnica del monumento modelado. Además, en uno de los casos de estudio, se implementa la vinculación de la biblioteca HBIM con el vocabulario Getty (AAT), con la finalidad de obtener elementos virtuales con información semántica estandarizada a nivel mundial. En este capítulo también se cuantifica la productividad y eficacia de la metodología desarrollada.

La tesis concluye en el sexto capítulo con una discusión sobre la investigación realizada. Además, este capítulo se completa con las conclusiones que describen las debilidades, amenazas, fortalezas y oportunidades de la investigación y con la descripción de cómo podrían orientarse los trabajos futuros.

# Capítulo 2

Captura y procesamientos de datos

## **2.1. Introducción**

La investigación realizada en este capítulo aclara conceptos sobre patrimonio y presenta el estado actual de las diversas tecnologías de medición utilizadas para la captura de datos geométricos. Particularmente, en esta tesis se ha utilizado el escáner laser terrestre como método de captura, debido a sus ventajas y su eficacia para acelerar la adquisición de los datos geométricos del patrimonio arquitectónico.

Una vez descritos los métodos de medición, se explicarán las etapas de procesamiento necesarias, para que los datos adquiridos puedan ser utilizados. Además, en este capítulo se explican los enfoques relacionados con el modelado geométrico 3D tradicional, así como los relacionados con el modelado geométrico 3D a partir del uso de nube de puntos.

## **2.2. Documentación del patrimonio**

Según las naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO)<sup>7</sup>, la finalidad del estudio del patrimonio mundial es facilitar la comprensión de las sociedades pasadas y presentes, de forma que los elementos patrimoniales se definan como testigos y fuentes para su análisis, logrando con ello el conocimiento del pasado, la comprensión de nuestro presente y el origen de los posicionamientos futuros, vinculándonos con nuestras raíces culturales y tradiciones. Como se ha mencionado anteriormente el patrimonio mundial está dividido integralmente en patrimonio natural y cultural.

El patrimonio natural representa a las reservas de la biosfera, los monumentos naturales, las reservas y parques nacionales, y los santuarios de la naturaleza (Lowell, 2017).

Por otro lado, el patrimonio cultural (CH) es la herencia recibida de los antepasados, formada por los bienes culturales que la historia ha legado, a los cuales la sociedad da importancia histórica, científica, simbólica o estética. Dichos bienes se constituyen en valores estimables que conforman sentidos y lazos de pertenencia, identidad y memoria para un grupo humano (López Sorzano et al., 2005). Además, el patrimonio cultural se divide en dos categorías, tangible e intangible. El patrimonio tangible es la expresión de las culturas a través de realizaciones materiales. Estas realizaciones materiales pueden ser bienes muebles como objetos arqueológicos, históricos, artísticos o científicos,

---

<sup>7</sup> UNESCO. URL: <http://whc.unesco.org/>. [En línea] Acceso: 10/01/2018.

es decir aquellos elementos que por lo general no están ligados al suelo; y también bienes inmuebles, tales como sitios, monumentos o edificaciones con valor relevante desde el punto de vista arquitectónico. Por otro lado, el patrimonio intangible, engloba los modos de vida, los derechos fundamentales del ser humano, los sistemas de valores, las tradiciones y las creencias (Brusaporci, 2017).

Según el art. 14.1 de la Ley del Patrimonio Histórico Español, el patrimonio cultural arquitectónico es aquel bien que tiene la consideración de inmueble. A los efectos de esta ley se consideran como bienes inmuebles a aquellos elementos consustanciales de un edificio, que forman parte del mismo o lo hayan formado; y que, en caso de poder ser separados, su falta no perjudique el mérito histórico o artístico al que están adheridos.

Generalmente, los bienes culturales tangibles inmuebles (patrimonio cultural arquitectónico) son obras o producciones humanas que están ligadas al suelo, no pueden ser trasladadas de un sitio a otro y en muchas ocasiones necesitan ser conservadas, monitorizadas y gestionadas para atesorar su valor. Por tal motivo, es fundamental adquirir la documentación del patrimonio cultural arquitectónico. La documentación del patrimonio es la recopilación de información sistemática y científica relativa a cada uno de los elementos, sean tangibles o intangibles, en su entorno histórico. Su finalidad es proporcionar información precisa y detallada que permita la intervención del patrimonio analizado (Le Blanc & Eppich., 2005; Dore, 2017). En este contexto, cabe mencionar que existen organismos internacionales y nacionales, gubernamentales y no gubernamentales relacionados con la documentación y protección del patrimonio cultural.

Del informe de (UNESCO et al, 2013) se interpreta que el patrimonio se ha beneficiado en las últimas décadas gracias al desarrollo de estándares internacionales para su documentación. Como organismo internacional, la UNESCO y su Comisión de Patrimonio Cultural han establecido como estándar que la documentación de un monumento o sitio patrimonial debe representar su morfología real. Además, las herramientas utilizadas deben ser medios que permitan monitorizar la condición del patrimonio a través del tiempo, y la información obtenida del análisis debe ser de fácil interpretación (UNESCO, 2011).

Por su parte, el Consejo Internacional de Monumentos y Sitios (ICOMOS)<sup>8</sup> a través del Comité Internacional de Fotogrametría Arquitectónica (CIPA)<sup>9</sup> ha establecido estándares dedicados al registro, documentación, conservación, protección y revalorización de los monumentos, conjuntos y sitios históricos, en todas sus formas posibles. CIPA, actualmente conocido como CIPA Heritage Documentation, tiene como objetivo alentar al desarrollo de nuevas tecnologías de medición, visualización y almacenamiento digital, para mejorar y automatizar los métodos de inspección, registro, documentación, gestión y difusión de la información del patrimonio cultural (CIPA, 2010).

Otra institución comprometida con la preservación del patrimonio mundial es el Getty. El Getty a través de sus institutos de conservación y de investigación<sup>10</sup> está involucrado en la conservación y difusión de los objetos, artistas, conceptos y lugares importantes para diversas disciplinas que se especializan en el arte, la arquitectura y la cultura material. Además, Getty facilita el intercambio y el uso de información a través de propuestas multidisciplinares con especialistas en el campo semántico y científico del patrimonio cultural.

Como organismos nacionales se encuentran el Ministerio de Educación, Cultura y Deporte del gobierno de España, y el Instituto del Patrimonio Cultural Español (IPCE). El primero es el organismo de gestión en el Ministerio y en las Comunidades Autónomas, encargado de la comunicación y el intercambio de programa de actuación en materia de Patrimonio Cultural. Además, a través de su página web<sup>11</sup>, facilita a los ciudadanos el conocimiento de los bienes integrantes del Patrimonio Histórico Español. El segundo o IPCE<sup>12</sup>, es una subdirección general adscrita a la Dirección General de Bellas Artes y Patrimonio Cultural, del Ministerio de Educación, Cultura y Deporte. Su cometido es la investigación, conservación, restauración y enriquecimiento de los bienes que conforman el patrimonio cultural. El IPCE aborda esta labor desde una perspectiva multidisciplinar, a través de arquitectos, arqueólogos, etnógrafos, restauradores, etc.

Otro campo de actuación para la gestión, documentación, preservación y difusión del patrimonio

---

<sup>8</sup> ICOMOS. es un organismo internacional no gubernamental de profesionales e instituciones dedicados a la conservación y protección del patrimonio. URL: <http://www.icomos.org/en> [En línea] Acceso: 27/09/ 2017.

<sup>9</sup> CIPA (2010). CIPA\_Heritage Documentation: Objectives and Activities. URL: <http://cipa.icomos.org/index.php?id=40> [En línea] Acceso: 12/09/2017.

<sup>10</sup> En la página web de *The Getty Research Institute*, las actividades del instituto se dividen en bibliotecas de investigación, programas públicos, servicios digitales, herramientas de búsquedas, bases de datos, etc. Entre la bases de datos mas solicitadas de Getty se encuentra los vocabularios. Estos vocabularios contienen terminologías estructuradas y se dividen en: The Art & Architecture Thesaurus (AAT), The Getty Thesaurus of Geographic Names (TGN), The Cultural Objects Name Authority (CONA) y en The Union List of Artist Names (ULAN). URL: <http://www.getty.edu/research/tools/> [En línea] Acceso: 10/01/2018.

<sup>11</sup> Ministerio de Educación, Cultura y Deporte. URL: <http://www.mecd.gob.es/cultura-mecd/areas-cultura/patrimonio/portada.html;jsessionid=FA07DEB4ACA8731E8AC2547762B78559>. [En línea] Acceso: 10/04/2017.

<sup>12</sup> Instituto del Patrimonio Cultural de España (IPCE). URL: <http://ipce.mecd.gob.es/documentacion.html> [En línea] Acceso: 10/04/2017.



cultural es la creación de modelos tridimensionales. En los informes (Gant, 2013; Ruiz Torres, 2015) se establece que el desarrollo y la incorporación de nuevas tecnologías en información, comunicación y digitalización 3D han traído grandes beneficios en la representación y documentación del patrimonio cultural, ya que gracias a estas nuevas tecnologías será más fácil mostrar y difundir, a una gama más amplia de personas, las cualidades e intereses de cada monumento analizado. Además, el contacto directo con los elementos patrimoniales sea físicamente o a través de un modelo digital que emule la obra real, podrá emplearse como fuente relevante de aprendizaje sociohistórico, natural, científico y tecnológico. Unas de las tecnologías más utilizadas para la difusión y divulgación del patrimonio y su entorno son la realidad virtual (RV) y la realidad aumentada (RA). Las tecnologías de RV pueden representar en un mundo virtual escenarios pasados, actuales o futuros. Además, las RV mejoran la visualización de los datos representativos, con la posibilidad de navegar e interactuar (con cada componente) dentro de las simulaciones. Por su parte, las tecnologías de RA se utilizan para definir una visión de un entorno ficticio en el mundo real, donde los elementos del mundo real se combinan con elementos virtuales para la creación de una realidad mixta en la que el usuario puede navegar en tiempo real.

En particular, como se ha mencionado en el capítulo anterior, las plataformas BIM tienen la capacidad de intercambiar información gráfica y no gráfica para su posterior análisis y gestión. Además, los modelos resultantes pueden utilizarse para una amplia variedad de aplicaciones. Es por ello que, en la actualidad, existen diversas investigaciones encaminadas al desarrollo de estándares para documentar, diseminar y catalogar con BIM la información relacionada con la historia y la transformación cronológica del patrimonio cultural.

Otra alternativa empleada para la documentación y gestión del patrimonio cultural arquitectónico es el nuevo *software* colaborativo PetroBIM<sup>13</sup>. Este programa informático de autoría BIM, posee la capacidad de importar y albergar los modelos BIM 3D y toda la información disponible del bien histórico estudiado dentro de una interfaz intuitiva, con el fin de tener en un único archivo, una maqueta virtual tridimensional, dinámica y navegable del monumento arquitectónico en cuestión, con toda la información relativa a su estado actual, a su estado de conservación y/o a su estado de restauración. Además, PetroBIM permite interactuar con todos los elementos que están presentes en el modelo, y también permite generar consultas sobre la información gráficas y semánticas de dichos

---

<sup>13</sup> PetroBIM nace como un *software* virtual interactivo de gestión y consulta, creado mediante el uso de tecnología propia “Walking On BIM” (WOB). URL: <http://petrobim.com> [En línea] Acceso: 25/09/2018.

elementos (Redondo et al., 2016).

Cabe mencionar que la irregularidad y complejidad que caracterizan las formas de los monumentos patrimoniales hacen que la documentación y gestión de estos se vuelva difícil. Por tal motivo, el uso de las distintas tecnologías de medición y fuentes de información serán consideradas como herramientas relevantes para trabajar el patrimonio cultural.

### **2.3. Tecnologías de medición**

Antiguamente se utilizaban los métodos tradicionales y los métodos topográficos convencionales, como sistemas de levantamiento gráfico “tal como está” (*as-is*) de las superficies de un terreno o edificación. Sin embargo, la revolución tecnológica lograda durante las últimas décadas ha traído consigo tecnologías que han mejorado y acelerado las técnicas de obtención de datos gráficos, así como el almacenamiento, la precisión y la fiabilidad de estos. Hoy en día, algunas de las técnicas más influyentes para este proceso de levantamiento gráfico son la fotogrametría y el escaneado laser 3D. El levantamiento gráfico 3D se caracteriza por su grado de precisión y exactitud en su intento de representar la realidad del objeto.

La selección de una u otra técnica de captura de datos gráficos es un aspecto de difícil decisión y dependerá en algunos casos de la características formales y morfológicas del objeto o lugar, de la envergadura del objeto de estudio, de los recursos económicos y de la calidad métrica que se espera obtener del resultado final (Farjas, 2003; Patias et al, 2008). En esta sección, se describen todas estas grandes alternativas para la medición.

#### **2.3.1. Método tradicional**

El método tradicional es una ciencia geométrica capaz de plasmar en un plano la superficie terrestre y los hechos existentes como muros, calles, edificios, etc. (Martín, 1994). Este método no se limita a realizar los levantamientos de campo en terreno, sino que posee componentes de edición y redacción cartográfica, para que al confeccionar un plano este se pueda entender.

A grandes rasgos, el levantamiento gráfico tradicional de las estructuras o monumentos históricos consiste en: (A) sistema de medición manual utilizando plomada, flexómetro, cintas métricas, niveles y escuadras de agrimensor, (B) sistema de medición manual utilizando distanciómetro láser y equipos ópticos como el teodolito, y (C) sistemas basados en imágenes fotográficas (De Villena, 2001). Además, estas tomas de medidas manuales se pueden realizar por métodos como: alineación

referenciada, descomposición poligonal por triangulaciones, replanteo de distancias parciales, acumuladas y totales, y realización de croquis que detallen las imperfecciones, los elementos constructivos y las características particulares de la obra (Livieratos, 1992).

Para llevar a cabo esta técnica de medición, es necesario realizar un estudio sobre la morfología y los elementos constructivos del edificio analizado. Por lo tanto, para que los resultados sean adecuados, dicha acción debe ser realizada por agrimensores o técnicos especializados en edificación. La precisión que obtendremos con este sistema de medición dependerá del grado de minuciosidad con el que se realice el trabajo. Sin embargo, la precisión alcanzada siempre será inferior a los datos de medición resultante del levantamiento gráfico por tecnologías digitales.

### 2.3.2. Método topográfico convencional

Los métodos topográficos convencionales, como la estación total y el Sistema de Posicionamiento Global (GPS), suponen herramientas auxiliares de utilidad para los estudios del patrimonio arquitectónico, ya que permiten medir las distancias horizontales y verticales de los puntos característicos de las superficies externas del monumento que luego se transformaran en referencias de coordenadas cartesianas.

La principal ventaja de estas herramientas es que proporcionan un proceso de medición sencillo y preciso, donde los datos recopilados son más concisos que los adquiridos con los métodos fotogramétricos y las técnicas de escaneados láser. Sin embargo, tal como se indica en (Anil et al., 2011), los métodos topográficos convencionales tienen una cobertura limitada y es posible que no representen las geometrías importantes. Además, se considera que el flujo de trabajo para grabar cada medida es un proceso lento que requiere largos períodos de presencia física de los operarios.

Generalmente, los métodos topográficos convencionales utilizan un sistema de medición a un solo punto y se limitan a lo que se eligió capturar en el momento. Por lo tanto, en (Percy et al., 2015) se considera que estas técnicas de medición no resultan económicas para el campo del patrimonio cultural, donde generalmente se requieren millones de datos para representar con precisión un monumento histórico.

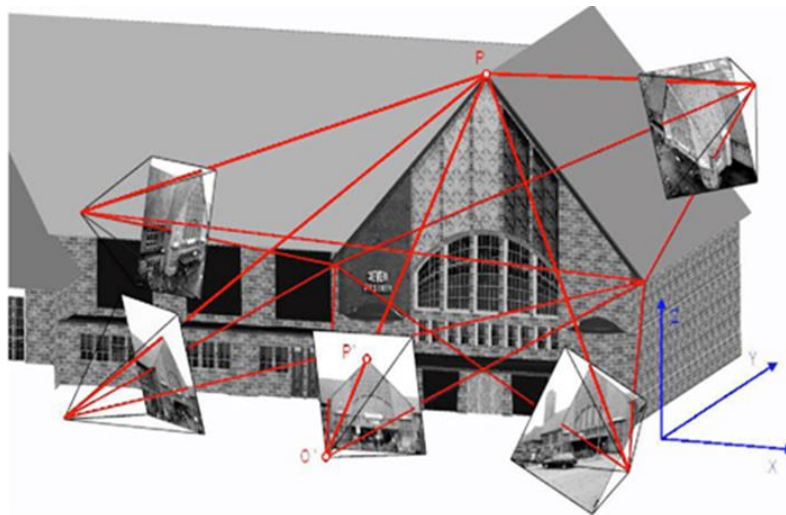
Aunque en la actualidad estos métodos convencionales no sean totalmente apropiados para la recopilación de datos espaciales históricos, sus cualidades serán de gran ayuda y complemento para procesar con precisión los datos adquiridos con las tecnologías de escaneo laser y fotogrametría. En concreto, el GPS es un sistema adecuado para la georreferenciación directa de las nubes de puntos

capturadas por el escáner láser (Schuhmacher & Böhm, 2005) y las nuevas estaciones totales robotizadas permiten automatizar la captura de datos, abriendo nuevas posibilidades hacia la optimización de esta fase del trabajo (Mata et al., 2008).

### 2.3.3. Método Fotogramétrico

La fotogrametría es una técnica de medición 3D precisa y sin contacto, basada en diversas imágenes de alta calidad, que permite acelerar la recopilación de datos geométricos de un edificio u objeto (El-Hakim et al., 2007). Es una técnica basada en la triangulación, donde las líneas de visión de una cámara ubicada en varios lugares se unen en un punto en común en el objeto. La intersección de las líneas de visión de la cámara determina la ubicación tridimensional del punto. Los resultados obtenidos con el levantamiento fotográfico incluyen imágenes ortográficas y nubes de puntos que luego pueden ser malladas con una superficie compuesta de triángulos y texturizadas a través de la superposición de figuras.

Esta técnica de medición al igual que la de escaneado láser son muy adecuadas para generar modelos 3D de los edificios analizados. El modelado fotogramétrico de edificios tiene un gran valor cultural y durante las últimas décadas se ha convertido en una técnica muy popular para registrar sitios valiosos a partir de un conjunto de fotografías (Guarnier et al., 2013). Además, es una técnica capaz de superar considerablemente en precisión y tiempo de adquisición de datos a los sistemas topográficos tradicionales; y en capacidad de discriminación de información, manejo y economía a los sistemas tecnológicamente más avanzados como el escáner láser. En la figura 1 se observa la implementación de la técnica de fotogrametría.



**Figura 1:** Principio del método fotogramétrico.  
Fuente: Adaptado de (Luhmann et al., 2013).

Existen trabajos, como (Hanke & Oberschneider, 2002; Kersten, 2006; Luhmann et al., 2013) que sostienen que los costes bajos o moderados de las cámaras digitales, el potente procesamiento informático, el alto nivel de calidad y detalles de los datos resultantes, la portabilidad de los equipos, el fácil manejo en sitios restringidos, el corto tiempo de registro y la mayor disponibilidad de *software* comercial y de código abierto, son ventajas suficiente para considerar que la fotogrametría es una de las mejores opciones como técnica de captura de datos. Sin embargo, según (Grussenmeyer et al., 2008; Furukawa et al., 2009) las desventajas o dificultades que enfrenta la reconstrucción fotogramétrica se refieren principalmente al postproceso que genera un gran esfuerzo manual que consume mucho tiempo, especialmente cuando la textura del objeto es pobre y su forma es muy compleja. Además, para que las imágenes se utilicen como modelos 2D o 3D de alta precisión, en primer lugar, los procesos de intersección de puntos característicos y escalabilidad deben aplicarse a cada captura obtenida, y luego combinarse con mediciones topográficas o empíricas precisas.

Aunque el desarrollo actual de la inteligencia computacional no permite la automatización completa, la combinación de fotogrametría con visión artificial (que básicamente incorpora algoritmos de *Structure for Motion* (SfM)) está comenzando a proporcionar resultados precisos en el modelado del patrimonio cultural (Aicardi et al., 2018), ya que permite generar una nube de puntos sobre el principio de la triangulación y, por consiguiente, poder construir modelos tridimensionales métricos precisos. Además, el acceso gratuito y en línea a una multitud de fotografías de calidad se está convirtiendo en una forma increíblemente rápida, barata y realista de capturar la realidad para reproducir virtualmente artefactos y construcciones (Shishido et al., 2017). Es por eso que cada vez se encuentran más herramientas de *software* para reconstruir modelos 3D a partir de fotos lo más automáticamente posible.

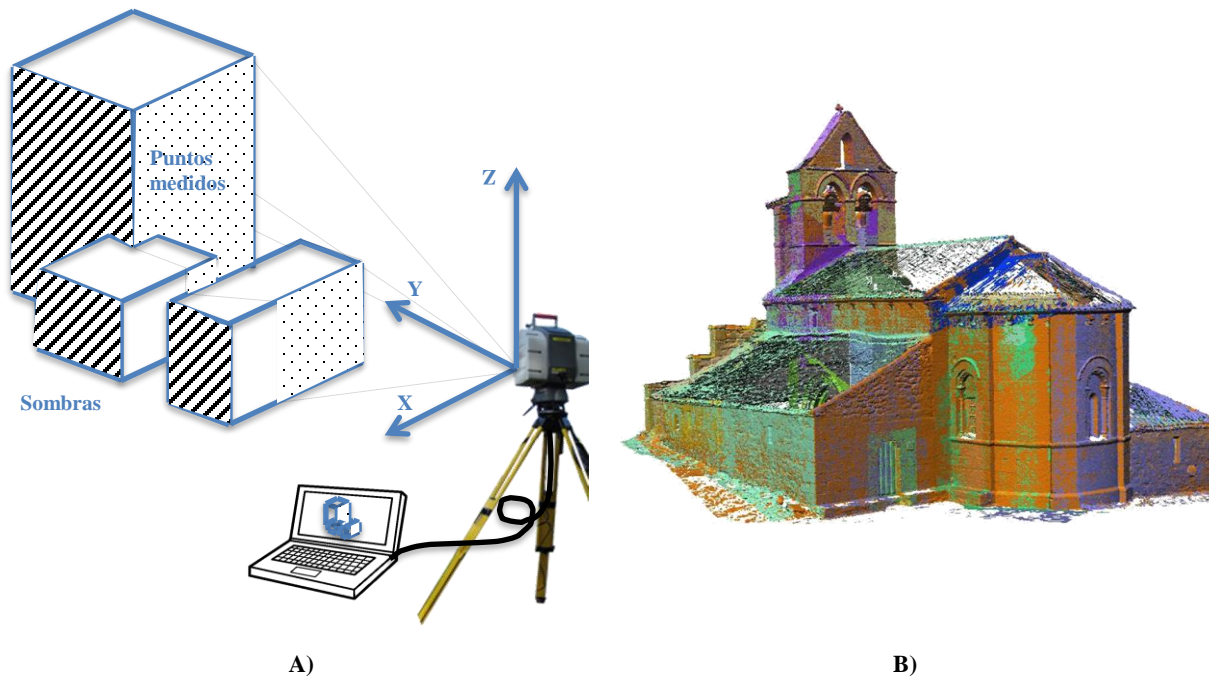
#### 2.3.4. Técnica de escaneo láser

Hoy en día las tecnologías de escaneo 3D se adoptan por su capacidad de acelerar la recopilación de datos espaciales de edificios existentes o superficies complejas, así como por la precisión y exactitud de los datos adquiridos. Los escáneres láser se pueden considerar como estaciones geodésicas avanzadas, que permiten medir automáticamente y en tiempo *casi real* las coordenadas tridimensionales de la superficie de un objeto (Allen et al., 2003; Grussenmeyer & Hanke, 2010).

Los escáneres láser se subdividen en dos áreas específicas, aéreas y terrestres. Cada uno tiene un rango y precisión específico para el uso al que será destinado. En la presente investigación se ha

considerado al escáner láser terrestre (TLS) como el de mayor conveniencia, por lo que se describirá y hará hincapié únicamente en este tipo.

Particularmente, los sistemas basados en tecnología TLS se configuran sobre un trípode y funcionan a través de un rayo láser que se desplaza hacia el área escaneada y hacia atrás, midiendo los ángulos y las distancias con precisiones de milímetros a centímetros (Tapponi, 2015) (figura 2A). En este contexto, los TLS proporcionan una reproducción geométrica precisa y detallada de objetos tridimensionales en poco tiempo, bajo la forma de millones de puntos (nube de puntos) (figura 2B), con coordenadas geométricas (X, Y, Z), en un entorno digital, con información métrica y radiométrica (Tang et al., 2010; Gómez-García-Bermejo et al., 2013).

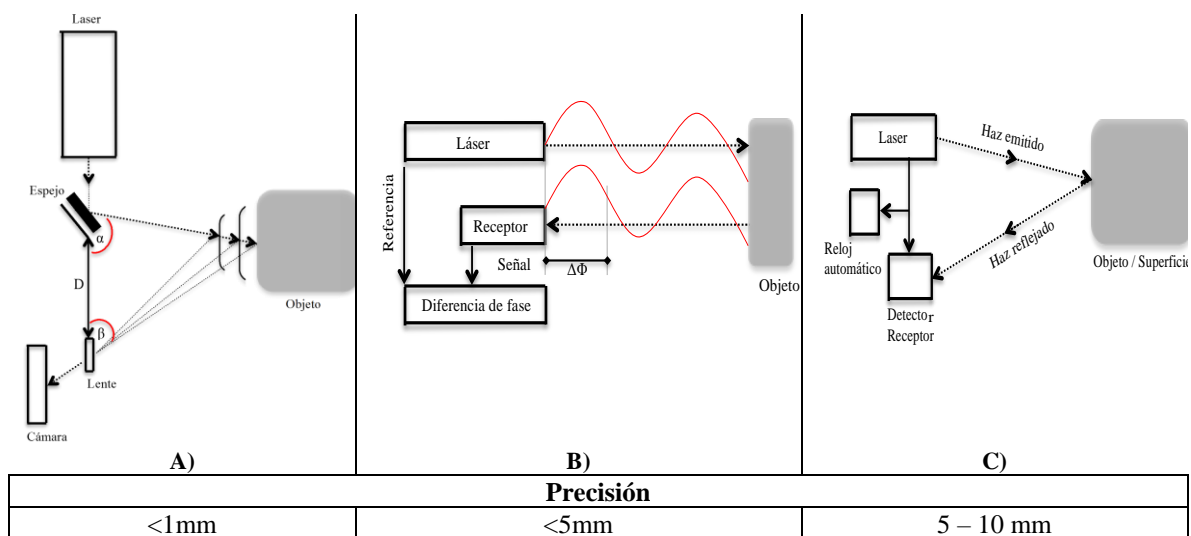


**A)** Proceso de escaneo láser. **B)** Nube de puntos georreferenciados (X, Y, Z).

Entre los sistemas de TLS destacan los que se basan en triangulación, en tecnología de diferencia de fase y en tiempo de vuelo (TOF). Los primeros calculan las medidas tridimensionales mediante la triangulación de los puntos o franjas del haz de láser que se proyectan sobre la superficie de un objeto (figura 3A). Los sistemas de diferencia de fase emiten un haz de láser continuo y de potencia modulada (figura 3B). Su operación se basa en medir el cambio de fase entre las ondas emitidas y las recibidas, utilizando dicha medida para estimar las distancias con precisión. No obstante, esta técnica se ve muy influenciada por la luz ambiental, lo que puede restringir trabajos en exteriores (Böhler & Marbs, 2002).

En el caso de los escáneres de tiempo de vuelo se mide el tiempo que tarda la emisión de un pulso de luz láser en alcanzar la superficie que se está escaneando y volver al detector receptor (figura 3C). Aprovechando que se conoce la velocidad de propagación, es posible calcular la distancia al objeto escaneado (Balletti et al., 2004).

Mediante el barrido automático de cada uno de los tres tipos de TLS se obtendrán las coordenadas geométricas de los puntos. La precisión y la densidad de las nubes de puntos obtenidas variaran en función del tipo de escáner seleccionado, así como también del número de escaneos realizados. En la actualidad, la información cromática también se puede incorporar o mapear en los modelos geométricos representados por nubes de puntos, mediante el uso de cámaras digitales, (Lerones et al., 2014).



**Figura 3:** A) Sistemas TLS que se basan en triangulación. B) Sistemas TLS que se basan en diferencia de fase. C) Sistemas TLS que se basan en tiempo de vuelo.

Actualmente los escáneres láser terrestres están desempeñando un papel muy importante en una amplia gama de propósitos que pueden extrapolarse directamente al patrimonio cultural (Alsadik et al., 2013), incluyendo el seguimiento de una intervención (Golparvar-Fard et al., 2011), la detección de defectos (Baselga et al., 2011) y la reproducción de modelos existentes (Mahdjoubi et al., 2013; Mukupa et al., 2017). Las principales ventajas de estas tecnologías son la alta precisión y la productividad, así como el gran volumen de datos de medición obtenidos en una fracción de tiempo. Sin embargo, a pesar del aumento en la demanda de este tipo de recogida de información 3D, el alto costo de estas tecnologías, la necesidad de manejo especializado, su dificultad de portabilidad, las dificultades para escanear superficies altamente reflectivas, transparentes u oscuras, la autonomía y

el preprocesamiento de la información adquirida que se requiere, se plantean como desventajas (Bhatla et al., 2012; Klein et al., 2012).

## **2.4. Nube de puntos**

El conjunto de datos que se obtiene desde un TLS se describe como una nube de puntos que representa las coordenadas del objeto escaneado. Las nubes de puntos tienen valores de dimensiones métricas y radiométricas. Además, se pueden complementar con valores cromáticos y texturizar a partir de datos de imágenes. Asimismo, las nubes de puntos capturan de manera precisa y detallada la geometría de un entorno, facilitando de este modo el proceso de extracción de información de las geometrías complejas y realistas de los elementos escaneados (Cera & Campi, 2017; Pritchard et al., 2017). En la figura 2B se observan las características de un monumento capturado por una nube de puntos.

En la actualidad, la utilización de las nubes de puntos para la medición 3D de un objeto se ha visto favorecida por el aumento de sensores de bajo costo. Además, el creciente enfoque tecnológico en el tema BIM y su capacidad de admitir nativamente los datos de nubes de puntos han estimulado la adopción del escáner laser en los sectores de Arquitectura, Ingeniería, Construcción y Facility Management (AEC/FM), encontrando de esta manera una audiencia más amplia para esta herramienta de medición (BIM Industry Working Group, 2011).

En la presente investigación las nubes de puntos han sido utilizadas como herramienta fundamental para simplificar las fases de modelado dentro del entorno BIM. Gracias a esta combinación es posible obtener resultados confiables y sin pérdidas de la concepción de la perspectiva general del edificio.

### **2.4.1. Preprocesamiento de datos geométricos**

Para que los datos en bruto obtenidos con el TLS puedan ser utilizados como guías para crear modelos 3D con BIM, primero será necesario una serie de pasos de preprocesamiento.

En primer lugar, debe tenerse presente que, por lo general, no es posible capturar toda la información geométrica de algunos objetos o superficies externas desde una única posición de escaneo, ya que en el mismo sitio pueden existir elementos que bloquean la vista del escáner. Por tal motivo es necesario situar el escáner en diferentes posiciones respecto al objeto para obtener nubes de puntos  $\{(x_i, y_i, z_i)\}$  correspondientes a las vistas parciales consideradas por cada una de esas posiciones. Posteriormente, cada una de estas nubes de puntos parciales se fusionarán para dar lugar a una nube global que describirá el sitio. Este proceso se conoce como alineamiento de nubes de puntos.



Para realizar el alineamiento se requiere por lo general un solapamiento del orden del 20 o 30% entre conjuntos de puntos adyacentes; y además que en dicho solapamiento se identifiquen al menos un objetivo especial (esquina, esfera, plano) que permita hallar puntos en común entre las nubes de puntos. Una vez cumplidas estas condiciones se procede a alinear las nubes de puntos entre sí. La alineación de las nubes de puntos se realiza comúnmente utilizando un algoritmo basado en Iterative Closest Point (ICP) (Besl y McKay, 1992) o alguna de sus variantes (Rusinkiewicz S., 2005). ICP es un método de optimización que comienza con un primer planteamiento aproximado de la transformación que impulsa una nube de puntos hacia la otra. Con frecuencia la alineación inicial es ayudada por el usuario seleccionando características en el área común de superposición con ayuda de programas informáticos de tratamiento y edición de datos 3D. Luego, los parámetros de transformación se refinan mediante la disminución de una función de coste cuadrático que mide la distancia entre las dos nubes de puntos en las regiones superpuestas. El refinamiento se repite iterativamente hacia un óptimo hasta que se alcanza la convergencia.

Posteriormente, para poder usar la nube de puntos en bruto se realizarán una serie de pasos como la limpieza y el filtrado del ruido de medida. Generalmente, la limpieza y el filtrado son guiados por el usuario por medio de un *software* específico de manejo de la nube de puntos (ej. Polyworks®)<sup>14</sup> porque se necesita cierto nivel de interpretación de la escena (por ejemplo, identificación de puntos limpios de árboles, personas, o de valores atípicos).

Alternativamente, se puede utilizar el mallado 3D de superficie poligonal como método de preprocesamiento de datos. Con este método se crea una superficie compuesta de triángulos sobre la nube de puntos. Dicha malla será editada para rellenar agujeros de la nube, así como también para refinar y reducir los puntos del modelo a través de operaciones de suavizado (Remondino & El-Hakim, 2006; Rodríguez-Moreno et al., 2016). Se considera que el preprocesamiento de la información es vital, ya que la alineación y depuración de la nube de puntos es lo que permitirá referenciar con precisión la información capturada. Sin las referencias exactas sería imposible obtener el modelo adecuado del objeto escaneado.

---

<sup>14</sup> Polywors. URL: [https://www.innovmetric.com/es/productos/polyworks-inspector?gclid=Cj0KCQjwpcLZBRcNARIsAMPBgF08aq7nLWQnfECpoDuJNdgCgLWjYyyS2CCq1sDjbg9qqRxDc\\_arJlaAnWrEA\\_Lw\\_wcB](https://www.innovmetric.com/es/productos/polyworks-inspector?gclid=Cj0KCQjwpcLZBRcNARIsAMPBgF08aq7nLWQnfECpoDuJNdgCgLWjYyyS2CCq1sDjbg9qqRxDc_arJlaAnWrEA_Lw_wcB). [En línea] Acceso: 22/01/2017.

## 2.5. Marco conceptual del modelado geométrico 3D

En la actualidad, los grandes avances tecnológicos con relación a los escáneres láser han logrado acelerar los métodos de recopilación de datos geométricos. Además, en (Abdelhafiz, 2018) se ha descrito que los avances tecnológicos también influyen en las herramientas de procesamiento de los datos escaneados, ya que este paso se está automatizando cada vez más. Sin embargo, aunque muchas tecnologías de modelado 3D se han desarrollado recientemente, el proceso de modelado 3D a partir del uso de los datos escaneados es todavía un proceso manual que consume mucho tiempo. Por lo tanto, se requiere un cambio en los flujos de trabajo y en los procedimientos para lograr acelerar el modelado geométrico 3D.

Principalmente se deben comprender los principios básicos de las tecnologías actuales que permiten el modelado geométrico 3D. En la década de los 60 se desarrollaron los primeros sistemas de Diseño Asistido por Computadora (CAD). Con ello nace una nueva era de representación de la geometría digital para propósitos de diseño 2D y 3D. Según (Akin, 2010) los primeros en dominar este arte de manipulación fueron los arquitectos, ingenieros y aquellos relacionados con la construcción. Con la llegada de los sistemas CAD digitales, las primeras técnicas de modelado disponibles en la industria del diseño fueron el modelado de aristas y el modelado de superficie.

En el esquema de modelado de aristas la geometría se define como una serie de líneas y curvas que representan los bordes de los objetos. El tipo de modelado de aristas es incapaz de expresar superficies o caras. Además, está limitado en la capacidad de calcular propiedades mecánicas o realizar análisis básicos (Kawaguchi et al., 2016). Por su parte, el modelado de superficie representa alguna o todas las superficies planas del componente. Aunque esta técnica de modelado tenga múltiples ventajas sobre el esquema de modelado de aristas, no cumple funciones críticas como otras técnicas de modelado. Esto se debe primero a que las superficies creadas están compuestas por caras delgadas separadas que no tienen relación o no están conectadas entre sí. Segundo, porque los objetos se representan como simple colección de diferentes superficies, sin información de conectividad y tampoco límites de cerramiento (Um, 2016).

El modelado 3D comenzó realmente a principios de la década de los 70 con el desarrollo de una técnica de representación en 3D denominada modelado de sólidos (*Solid Modeling*). El modelado de sólidos es un esquema de representación volumétrica en 3D que nace de la necesidad de una representación de mayor nivel de los objetos complejos. Esta técnica de modelado se diferencia de las antes mencionadas, ya que tiene la capacidad de crear superficies sólidas con grosor o masa, y

limites cerrados.

A finales de la década de los setenta y principio de los ochenta surgen dos ramificaciones generales en la técnica de modelado de sólidos. Dichas ramificaciones son *Boundary Representation* (B-rep) y *Constructive Solid Geometry* (CSG) (Gomes & Teixeira, 1991). El primero representa los objetos mediante la descripción de sus caras y bordes. Las superficies de un modelo 3D representadas por B-rep son siempre identificables ya que almacena información sobre cada una de las caras y los bordes de forma evaluada (Wypysiński, 2015). Además, *Boundary Representation* incluye operaciones como extrusión, barrido y giro que permiten crear representaciones 3D a partir de perfiles 2D.

A diferencia de B-rep, en CSG, los modelos se construyen como una combinación de *primitivas gráficas* (esfera, cubo, cono, etc.). En este método las operaciones booleanas de combinación, extrusión o unión se aplican a las primitivas sólidas simples para obtener nuevas formas o volúmenes más complejos. En CSG los modelos se almacenan como una combinación de lógica booleana y ubicaciones en 3D. Por lo tanto, los bordes y caras del modelo no se almacenan de forma evaluada, lo que significa que deberán calcularse siempre que sea necesario (Laidlaw et al., 1986).

En la actualidad la mayoría de las plataformas de *software* CAD incorporan y combinan las técnicas de modelado CSG y B-rep, con el fin de proporcionar una mayor flexibilidad para el modelado y la visualización de geometrías 3D complejas (Zawadzki, 2012). Los modelos 3D obtenidos con los métodos CSG y B-rep representan gráficamente al objeto diseñado. Sin embargo, las formas obtenidas carecen de información sobre el rol que cumple cada objeto y como estos se relacionan entre ellos.

La última etapa evolutiva en el modelado de sólidos es la introducción de parámetros. Los parámetros son los datos asociados a cada objeto modelado. Estos parámetros pueden representar una solución al modelado 3D, debido a su capacidad de cambiar instantáneamente la forma, proporciones u otras propiedades de los objetos diseñados, adaptándolos así a los nuevos requisitos. Los parámetros asociados pueden ser simples, como longitud, altura o profundidad del objeto. Sin embargo, el poder real viene con los parámetros que representan o asocian los datos semánticos a la geometría del objeto. La información semántica puede ser entre otras cosas, el estado, el uso, los materiales, el rendimiento térmico o la historia relacionada al objeto modelado. Es decir, son los atributos que asocian al modelo la información necesaria para calcular o administrar la etapa de su ciclo de vida.

Según (Baik et al., 2014) los objetos resultantes del modelado paramétrico se consideran como

modelos 3D eficiente, ya que pueden utilizarse varias veces en el mismo modelo o en modelos diferentes, variando únicamente la restricción o regla del parámetro en lugar de modificar al objeto completamente.

En la actualidad, las plataformas BIM descritas en el Capítulo 3 incorporan los principales desarrollos en el campo del modelado paramétrico 3D. Estas plataformas tienen la capacidad de almacenar dentro de sus objetos paramétricos, información geométrica, semántica y topológica de todos los componentes y elementos relacionados con la construcción y vida útil del edificio. En estas plataformas, todos los elementos modelados permanecen representados como un conjunto en sí mismo, por lo cual el resultado final será considerado como un modelo digital que representa a un objeto real.

## **2.6. Modelado geométrico 3D desde la nube de puntos**

Las nubes de puntos generadas por los TLS proveen la descripción precisa del modelo de superficie escaneado, considerándose esto como un proceso en gran medida, automático. Desafortunadamente, las nubes de puntos capturadas no contienen información adicional sobre los objetos cuya geometría representan. Por lo tanto, para obtener atributos geométricos, topológicos y semánticos será necesario producir modelos geométricos 3D u objetos paramétricos a partir de la utilización de las nubes de puntos. Esta acción de modelado 3D puede describirse como un proceso de ingeniería inversa.

En la actualidad, la combinación de los programas informáticos de modelado 3D con los sistemas de escaneo láser ha mejorado y acelerado el proceso, diseño y ejecución del trabajo, así como el ahorro de mano de obra. Sin embargo, todavía el modelado de objetos paramétricos presenta cierta complejidad a la hora de utilizar las nubes de puntos, ya que las herramientas *software* aún no están lo suficientemente desarrolladas para reconocer y/o convertir automáticamente las superficies irregulares capturadas por las nubes de puntos en objetos BIM.

Por lo tanto, la segmentación y el reconocimiento de las nubes de puntos representan los pasos fundamentales para identificar las superficies correctas para el trazado y/o modelado de los objetos paramétricos. Estos pasos se pueden realizar de forma manual, semiautomática o automática a través de los avances adheridos a las plataformas BIM, así como también de los nuevos algoritmos de reconocimientos de objetos y segmentación de nube de puntos (Volk et al., 2014).

Los investigadores han experimentado con diversos métodos manuales, semiautomáticos o automáticos para lograr la extracción de las geometrías, el modelado 3D directo y la parametrización

BIM de las nubes de puntos capturadas. El tema de modelado manual y semiautomático se tratará con más detalle en el apartado 2.6.1 y el de modelado automático en el apartado 2.6.2.

### 2.6.1. Aproximación al modelado manual y semiautomático

Generalmente, el modelado digital se lleva a cabo para simular o representar un monumento que puede no existir en la actualidad o para intentar modelar los edificios existentes con su aspecto real. El término *manual* se utiliza para indicar que existe intervención humana en el modelado 3D. Sin embargo, desde el punto de vista práctico el proceso en sí es una semiautomatización guiada por el usuario en forma de primitivas de ajustes, secciones y reconocimiento de caras realizadas sobre la nube de puntos, en un programa de diseño.

Algunos de los enfoques de métodos manuales más consolidados y aproximados para modelar con precisión los objetos arquitectónicos capturados con la nube de puntos, se detallan a continuación.

En (Guidi et al., 2014) se propone integrar las nubes de puntos con los programas Cyclone<sup>®15</sup>, Geomagic<sup>®16</sup> y Polyworks<sup>®</sup>, para abordar el modelado digital en 3D del edificio escaneado. El tema principal es desarrollar una metodología que pueda conducir a la generación de modelos virtuales 3D de arquitecturas que ya no existen. Los elementos particulares se crean manualmente utilizando una malla poligonal fácil y controlable que une los diferentes puntos de la nube. Los modelos resultantes podrán ser utilizados por los interesados en la conservación y la reconstrucción, para medir las dimensiones o analizar los materiales faltantes.

Los autores de (Macher et al., 2014) proponen convertir las superficies complejas que detallan las nubes de puntos, en mallas poligonales. Estas mallas poligonales obtenidas han permitido a los autores extraer los datos geométricos y las texturas que permitirán modelar cada elemento dentro de los programas de modelado sólido.

Por otro lado, en (Macher et al., 2017) se desarrolla un proceso que se compone de dos partes principales para modelar un edificio con características y formas planas. La primera parte consiste en realizar con el programa MATLAB<sup>®17</sup> múltiples segmentaciones de las nubes de puntos obtenidas. Posteriormente las segmentaciones se clasifican en categorías y se agrupan por volumen o superficies.

---

<sup>15</sup> Cyclone. URL: <https://leica-geosystems.com/es-es/products/laser-scanners/software/leica-cyclone>. [En línea] Acceso: 14/11/2017.

<sup>16</sup> Geomagic. URL: <https://es.3dsystems.com/software/geomagic-design-x>. [En línea] Acceso: 14/11/2017.

<sup>17</sup> MATLAB. URL: [https://es.mathworks.com/academia/student\\_version.html](https://es.mathworks.com/academia/student_version.html). [En línea] Acceso: 14/11/2017.

En la segunda parte, las categorías o grupos representados por las segmentaciones se exportan al modelador CAD 3D de código abierto FreeCAD<sup>®18</sup> para crear objetos volumétricos con propiedades paramétricas. Finalmente, a través de la capacidad de interoperabilidad de FreeCAD<sup>®</sup>, todos los modelos creados se importan al programa BIM Autodesk Revit<sup>®19</sup> con la finalidad de enriquecerse semánticamente.

Los enfoques analizados para este apartado son valiosos para documentar y diseminar información relacionada a los edificios existentes. Sin embargo, lograr su implementación para la reconstrucción de geometrías BIM es un proceso lento y costoso que requiere de trabajadores calificados. Estos problemas se deben principalmente a las restricciones ortogonales que están presentes en una gran parte de los programas de diseño y al gran número de pasos necesarios para modelar paramétricamente las geometrías complejas e irregulares que reflejan las nubes de puntos y/o las mallas tridimensionales (Tang et al., 2010; Larsen et al., 2011).

#### 2.6.2. Aproximación al modelado automático

La reconstrucción digital de los edificios a partir de la utilización de nubes de puntos es un tema de activa investigación. Durante los últimos veinte años, varios trabajos de investigación académica y comercial han investigado sobre la reconstrucción automatizada de la geometría a partir de las nubes de puntos, especialmente desde que las plataformas BIM han ganado prominencia con sus modelos paramétrico. Desde el punto de vista académico los métodos más consolidados, en términos de la reconstrucción automatizada de los edificios existentes, se encuentra en las investigaciones de (Xiong et al., 2013; Jung et al., 2014; Hong et al., 2015; Wang et al., 2015; Zheliazkova et al., 2015; Thomson, 2016). En estos trabajos se ha experimentado con algoritmos para extraer automáticamente las características geométricas de los elementos a través de la segmentación de las nubes de puntos. En (Dimitrovn & Golparvar-Fard, 2015) se describe que la segmentación de la nube es un método establecido para clasificar y detectar automáticamente las formas planas o geoméricamente más complejas de los edificios existentes. Las tres formas más populares de detección de formas son los mínimos cuadrados, Principle Component Analysis (PCA) y Random Sample Consensus (RANSAC).

---

<sup>18</sup>FreeCAD. URL: [https://www.freecadweb.org/?lang=es\\_ES](https://www.freecadweb.org/?lang=es_ES). [En línea] Acceso: 14/11/2017.

<sup>19</sup> Programa Revit. Autodesk. URL: <https://www.autodesk.es/products/revit/overview>. [En línea] Acceso 21/12/2017.

La propuesta de (Xiong et al., 2013) implica el modelado basado en contexto para limitar el espacio. El método comienza extrayendo parches planos de una versión voxelizada de la nube. Luego presenta un algoritmo de crecimiento de región que se utiliza para ajustar un plano al conjunto de puntos dentro del radio especificado, proporcionando de este modo una estimación de la superficie normal. Finalmente emplean un algoritmo de aprendizaje para estimar de manera automática la forma, el tamaño y la posición de las superficies reconocidas, generando de este modo polígonos de contorno para cada característica detectada. Este trabajo de reconstrucción automatizada se utilizó para reconstruir los límites 3D CAD y no la geometría paramétrica BIM. El proceso de reducción de datos presentado, que consiste en reemplazar un número de puntos verdaderos por estimados, puede causar errores y dar como resultado una precisión reducida de las geometrías obtenidas.

Los autores de (Jung et al., 2014; Hong et al., 2015) implican dos pasos, el dibujo geométrico 3D automatizado y la creación manual de la geometría paramétrica BIM. En el paso de dibujo geométrico 3D utilizan el algoritmo RANSAC para optimizar la segmentación de planos de pared en la nube de puntos y disminuir los componentes de cada superficie. Posteriormente, se llevan a cabo procesos de refinamiento y rastreo de límites. El primero se hace para filtrar puntos que no pertenecen a los planos de interés, mientras que el segundo se usa para modelar los límites de un segmento plano. Luego, las características simplificadas de cada plano y los puntos encontrados se importan como un conjunto de líneas 3D al *software* comercial BIM y se utiliza como guía para el modelado manual de las geometrías paramétricas.

Por otro lado, en (Wang et al., 2015) se propone un método para la extracción automática de las geometrías del edificio a partir de nubes de puntos no organizadas. El método comienza con la aplicación de un algoritmo de segmentación de planos de la región para dividir los datos brutos en segmentos de nubes de puntos, que se encuentran en el mismo plano. Luego introducen un algoritmo de detección de límites que reconoce automáticamente la forma, el tamaño y la posición de las superficies, generando así polígonos de contorno para cada característica detectada. Este trabajo al igual que el propuesto en (Xiong et al., 2013), enfatizan la construcción automática de las superficies como límites 3D CAD y no como geometrías paramétricas. Sin embargo, en (Wang et al., 2015) se propone convertir los datos extraídos a formato *green building XML* (gbXML), un formato interoperable con BIM y que se considera como un esquema orientado a almacenar datos de geometría y desempeño ambiental para el análisis de la eficiencia de los edificios.

El tema principal de (Zheliaskova et al., 2015) es desarrollar una metodología que mejore el flujo de trabajo actual para la creación de un edificio existente, utilizando algoritmos y programas de código

abierto (OSS) capaces de calcular y modelar automáticamente enormes cantidades de datos geométricos 3D. Los datos obtenidos como nubes de puntos se introducen en el *software* OSS Meshlab<sup>®20</sup>. En Meshlab<sup>®</sup> se crean mallas y polígonos cerrados sobre las superficies de la nube de puntos utilizando el algoritmo Ball-Pivoting (BPA). Luego, el programa comercial Rhinoceros<sup>®21</sup> y su complemento Grasshopper<sup>®22</sup> se utilizan como editor de algoritmos gráficos para reconstruir automáticamente las formas complejas e irregulares extraídas de las mallas poligonales en modelos 3D. Este documento presenta como resultados modelos NURBS con parámetros geométricos. Sin embargo, los modelos 3D obtenidos carecen de información semántica y no son representados en un entorno BIM.

La propuesta de (Thomson, 2016) presenta una metodología para la detección y reconstrucción automática de la nube de puntos en geometrías tridimensionales básicas, adecuadas para BIM. En este trabajo, se introduce la nube de puntos en el formato de archivo E57 y se utilizan objetos almacenados en el *Industry Foundation Class* (IFC) para crear las geometrías BIM, esta particularidad permite que el trabajo se mantenga sin formato, ya que se trata de formatos de intercambio abierto ampliamente aceptados. Además, este trabajo utiliza dos bibliotecas de código abierto como base para la metodología desarrollada. La primera es la biblioteca de nube de puntos (PCL), la cual proporciona una serie de algoritmos de procesamiento y manejo de datos, como el algoritmo RANSAC, utilizado para la detección automática de los planos horizontales y verticales más grandes como el piso, el techo y las paredes. La segunda biblioteca es la *eXtensible Building Information Modeling* (xBIM) y su kit de herramientas. La biblioteca xBIM proporciona la capacidad de leer, escribir y ver archivos compatibles con IFC; y se utiliza para crear contenido IFC a partir de las características detectadas. Este documento presenta uno de los ejemplos más importante sobre la reconstrucción automática de geometría volumétrica a partir del uso de nubes de puntos. Sin embargo, el trabajo solo trata con paredes planas o planos simples, ya que las superficies con mayos complejidad se encuentran fuera de su alcance.

Otros algoritmos, investigados recientemente para identificar y clasificar objetos dentro de las nubes de puntos se basan en el reconocimiento de colores con imágenes espectrales (Amano & Lou, 2016) y en el reconocimiento de características (Pu & Vosselman, 2009; Dore & Murphy, 2013).

---

<sup>20</sup> MeshLab. Descripción. URL: <http://www.meshlab.net/#description>. [En línea] Acceso: 21/10/2017.

<sup>21</sup> Rhinoceros 3D. URL: <https://www.rhino3d.com/es/>. [En línea] Acceso: 07/10/2016.

<sup>22</sup> Grasshopper. URL: <https://www.grasshopper3d.com/>. [En línea] Acceso: 11/12/2017.



A pesar de los avances logrados, la mayoría de estos enfoques analizados no automatizan el proceso completo de paso de nube de puntos a BIM (*Scan-to-BIM*). Por lo tanto, los resultados obtenidos serán modelos de superficie CAD 2D y 3D, que aun deberán convertirse manualmente en modelos paramétricos BIM. En este contexto, en (Volk et al., 2014) se considera que la transformación automática de elementos arquitectónicos complejos en entidades volumétricas y semánticamente ricas está aún en su infancia.

Desde otro punto de vista, las investigaciones realizadas por las empresas de *software* comerciales han llevado al desarrollo de nuevos complementos o soluciones para automatizar la generación de geometrías BIM a partir de nubes de puntos. EdgeWise<sup>®23</sup> se crea como un complemento de *software* independiente para Autodesk Revit<sup>®</sup>. Este complemento clasifica los datos de la nube de puntos, con el objetivo de separar a la nube en superficies uniformes que compartan los puntos coplanarios. Posteriormente, el usuario define los planos horizontales para restringir la búsqueda de extracción de muros. Finalmente, el programa busca automáticamente candidatos de pared entre pares de planos horizontales semejantes y crea el modelo paramétrico basándose en la geometría extraída (ClearEdge 3D, 2011). El modelo resultante puede ser exportado a Revit<sup>®</sup>, a través de una barra de herramientas personalizada de EdgeWise Revit, para la edición manual de las superficies logradas.

La otra solución comercial principal es *Scan-to-BIM*<sup>®24</sup> de IMAGINiT Technologies. *Scan-to-BIM*<sup>®</sup> es un complemento desarrollado para Autodesk Revit<sup>®</sup>, que proporciona algunos algoritmos de detección y ajustes, junto con algunas otras herramientas para el manejo de la nube de puntos (Logothetis et al., 2017). La función de este complemento comienza cuando el usuario selecciona tres puntos para definir el plano de la pared. A partir de estos puntos un algoritmo de crecimiento de regiones se expande y detecta la extensión de la nube de puntos, dentro del espacio definido por el usuario. Con este complemento el usuario tiene la opción de crear un elemento de tipo muro que siga las restricciones ortogonales del programa Revit, o bien instalar un muro de masa que puede deformarse para modelar aquellas superficies que no están perfectamente verticales. Este complemento solo maneja la definición de una superficie, es decir, el modelado de todo el volumen solo se basará en un lado del objeto. Además de los complementos mencionados anteriormente

---

<sup>23</sup> ClearEdge 3D (2011) EdgeWise Plant Suite | ClearEdge 3D. URL: <http://www.clearedge3d.com/products/edgewise-plant-suite/>. [En línea] Acceso 05/02/2018.

<sup>24</sup> Scan-to-BIM. IMAGINiT, Scan to BIM. URL: <http://www.imaginit.com/software/imaginit-software-other-products/scan-to-bim>. [En línea] Acceso: 12/02/2018.

existen otros que también ayudan con la segmentación, detección, proceso y modelado de elementos arquitectónicos sobre la nube de puntos. Un ejemplo de ellos son Kubit, PointSense Buildings y Pointfuse de Arithmetica.

Después de revisar algunos de los avances logrados por la investigación académica y comercial, consideramos que se ha dado un paso importante hacia el modelado automático de nubes de puntos. Sin embargo, el proceso automático de *Scan-to-BIM* tiene algunas limitaciones en la implementación para modelar un edificio “tal como está” (*as-is*).

Una de estas limitaciones se debe al hecho de que, actualmente, la lectura e interpretación de los datos cualitativos de un espacio u objeto es estrictamente natural para los humanos, pero muy difícil para las computadoras porque todavía no existen "algoritmos inteligentes" que sean capaces de realizar esta función (Bianchini, 2014; Bianchini et al., 2014).

Otras limitaciones identificadas se relacionan con la falta de herramientas de los programas BIM para reconstruir automáticamente una representación digital, precisa y eficiente de las superficies irregulares escaneadas. De esta manera, se necesita combinar métodos de varias etapas para lograr el modelado automático de las nubes de puntos en sólidos paramétricos 3D cuando se trata de superficies complejas. Además, las restricciones de los algoritmos y los complementos de *software* también se consideran una limitación. Esto se debe a que dichos algoritmos o complementos solo son factibles para la segmentación y el modelado automático de nubes de puntos que representan superficies planas o geometrías primitivas, ya que generan resultados erróneos e inexactos, de geometrías superpuestas o faltantes al tratar de representar geometrías complejas e irregulares de los edificios históricos.

En este contexto, cabe señalar que ningún algoritmo o complemento que automatice el flujo de trabajo *Scan-to-BIM* ha ganado una gran aceptación en la comunidad AEC/FM (Giel & Issa, 2011). Por lo tanto, a pesar de que el proceso semiautomático es una tarea difícil y que requiere mucho tiempo, actualmente se considera que es el proceso más eficaz para los proyectos de documentación y modelado paramétrico del patrimonio arquitectónico.

## **2.7. Conclusiones**

En este capítulo se ha presentado un marco teórico sobre las tecnologías de captura de datos, haciendo hincapié en el escáner laser terrestre y su resultado, las nubes de puntos. Además, se ha tratado el preprocesamiento de los datos capturados y el modelado geométrico 3D. El capítulo también proporciona una revisión de la literatura existente sobre el estado actual de la técnica y los diferentes

métodos para registrar y modelar geoméricamente en 3D las nubes de puntos adquiridas.

Las innovaciones en los sistemas de escaneado láser han permitido una mentalidad de *rápida captura* gracias a las nubes de puntos generadas. Dichas nubes proveen la descripción precisa del modelo de superficie escaneado; considerándose esto como un proceso en gran medida automático. Desafortunadamente, las nubes de puntos capturadas no contienen información adicional sobre los objetos cuya geometría representan. Por lo tanto, para obtener atributos geoméricos, topológicos y semánticos será necesario producir modelos geoméricos 3D u objetos paraméricos. Actualmente, lograr dicho modelado 3D a partir de la nube de puntos es una tarea difícil que consume mucho tiempo. Este problema se debe principalmente a que los *software* comerciales actuales están enfocados principalmente a edificios de nueva construcción o de superficies planas, por lo que poseen herramientas muy limitadas o poco flexibles para modelar las geometrías complejas o irregulares presentes en las nubes de puntos.

La segmentación y el reconocimiento de las nubes de puntos representan los pasos fundamentales para identificar las superficies correctas para el trazado y/o modelado de los objetos paraméricos. La literatura científica indica, desde diferentes enfoques, que se han realizado grandes progresos con relación a la automatización del proceso de segmentación y modelado e identificación de objetos a partir de la nube de puntos. Sin embargo, los resultados demuestran que en la actualidad la automatización solo es realmente efectiva con las geometrías primitivas, y que los algoritmos utilizados no están dedicados al enriquecimiento semántico y espacial de los componentes reconocidos. Es decir, se han mostrado desarrollos prometedores, pero actualmente no son lo suficientemente precisos ni detallados para aplicaciones al sector AEC/FM.

Por lo tanto, se considera que el modelado semiautomático, a pesar de ser un proceso que consume mucho tiempo, es hoy en día el flujo de trabajo más eficaz y preciso para optimizar el modelado paramérico de las superficies complejas capturadas por el escaneado laser, por lo que será el ámbito en el que se desarrolla la metodología propuesta en el cuarto capítulo de la presente tesis.

# Capítulo 3

Modelado Paramétrico

### **3.1. Introducción**

En este capítulo se presenta una descripción preliminar sobre el modelado paramétrico. El capítulo refuerza los antecedentes, analizando los conceptos necesarios para comprender las plataformas BIM. Inicialmente se describen la evolución y las características de BIM, para posteriormente detallar la incorporación de las nubes de puntos a dichas plataformas. Además, se describe la utilidad de BIM para los proyectos de preservación, documentación y gestión del patrimonio arquitectónico, y también el concepto y utilidad de la biblioteca paramétrica HBIM. Por último, se desarrolla una revisión sobre las investigaciones científicas más representativas que describen los diferentes métodos creados para facilitar el modelado digital de los edificios existentes con BIM y HBIM.

### **3.2. Modelado paramétrico de los edificios existentes**

El concepto de modelado paramétrico no es un término nuevo; algunas de sus capacidades se integraron por primera vez en uno de los primeros sistemas CAD denominado Sketchpad (Sacks, 2004). El poder de la capacidad constructiva del modelado paramétrico ha evolucionado a medida que el conocimiento sobre el comportamiento de los sistemas CAD y la capacidad en informática iban creciendo. Sin embargo, el verdadero salto de importancia se da en la primera década del 2000, cuando BIM se introduce como proyecto piloto para apoyar al diseño constructivo de edificios, ya que, en consecuencia, las principales tendencias de investigación se centraron en la mejora de la planificación, el diseño, la visualización, la cuantificación, el coste, la gestión y la parametrización de los datos.

El primer paso para entender en profundidad el concepto de modelado paramétrico es describir los parámetros y los objetos paramétricos. Los parámetros son los datos asociados a cada objeto modelado. Estos datos asociados representan un valor establecido para que una determinada función pueda completar la acción designada. Además, los parámetros tienen dominio funcional específico, es decir incorporan atributos y relaciones topológicas y geométricas para abordar la información relativa al edificio como un todo. Estos atributos pueden ser las coordenadas geográficas, las fases de trabajo, el rendimiento energético, los datos históricos o aquellos relacionados con el ciclo de vida. Los parámetros pueden contener reglas que actúan como restricciones para expresar la lógica de las condiciones de diseño y guiar la regeneración integral del mismo dependiendo de las diferentes condiciones locales. Con el uso de los parámetros, se puede definir la forma en que las piezas interactúan entre sí como entidades lógicas, lo cual permitirá la revisión rápida y efectiva del conjunto.

De acuerdo con (Eastman et al., 2011), los objetos paramétricos son la representación digital de un determinado componente definido por reglas y parámetros que determinan las formas geométricas, así como las propiedades y características no geométricas. Generalmente, los objetos paramétricos son reproducciones digitales volumétricas de sólidos editables que no poseen información redundante en su consistencia. El uso de los parámetros provee a los objetos un comportamiento de diseño dinámico; es decir, proporciona la capacidad de mantener la consistencia topológica y geométrica del diseño a medida que se realizan cambios dentro de las limitaciones impuestas por las diferentes naturalezas del cambio paramétrico frente al topológico. Además, estos objetos presentan la oportunidad de desarrollar diferentes niveles de detalle y tienen la capacidad de vincular, recibir y exportar el conjunto de atributos adquiridos. En (Barazzetti et al., 2016) se describe que los objetos paramétricos pueden agruparse en clases, donde una clase se define como un conjunto de objetos destinados a representar las geometrías, propiedades y comportamientos de un tipo específico de cosa o *familia*. A su vez, estas *familias* se organizan por categorías dentro una biblioteca paramétrica.

En este contexto, el modelado paramétrico se refiere a la capacidad de construir modelos virtuales 3D, combinando y vinculando objetos paramétricos que representen los aspectos físicos del modelo y sus propiedades semánticas asociadas (Barazzetti, 2016). Además, el modelado paramétrico representa la oportunidad de definir toda la información del diseño y fabricación de un modelo físico como una sola fuente integrada y no como dibujos volumétricos individuales. Esta particularidad permite a los modelos 3D ser editados fácilmente. Otra cualidad que reivindica el valor del modelado paramétrico es que los modelos digitales resultantes representan el aspecto real de un edificio también real, y estos pueden ser utilizados para redactar la documentación explicativa del proyecto, incluidos los planos, alzados, secciones, detalles e informes. En (Eastman et al., 2011) se menciona que los modelos 3D también pueden utilizarse para crear fácilmente visualizaciones de diseño en varios formatos y para varios propósitos. Además, el modelado paramétrico permite construir y representar modelos complejos e irregulares, ajustándose a la estructura de éstos lo más cerca posible. Por tal motivo y gracias a sus otras cualidades, el modelado paramétrico es el esquema de modelado más utilizado para representar a los edificios existentes.

En particular, los edificios son un conjunto de elementos complejos y distintos, organizados por relaciones espaciales determinadas por un lenguaje constructivo. Hoy en día, el conjunto de nubes densas de puntos es el principio básico para lograr capturar e identificar la complejidad geométrica de los edificios existentes. Por lo tanto, un sistema de modelado paramétrico como el descrito hasta ahora proporcionará toda la funcionalidad necesaria para definir el diseño del edificio como una representación detallada de la estructura real. Principalmente, el modelado paramétrico 3D a partir de

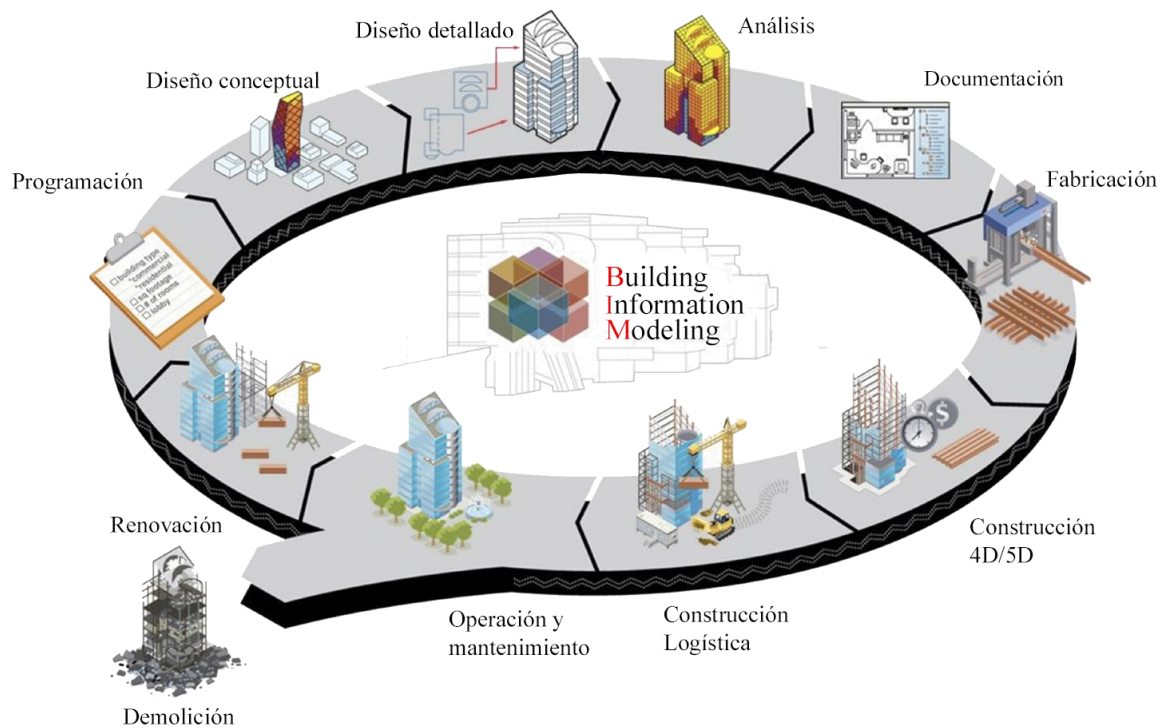
la utilización de la nube de puntos será un proceso semiautomático capaz de simplificar la generación de los objetos paramétricos que representarán las superficies complejas.

En los últimos años se han utilizado los programas paramétricos tales como las plataformas BIM para los proyectos de reconstrucción de los edificios existentes (Bryde et al., 2013). Estas plataformas se basan en bibliotecas de objetos 3D con un amplio conjunto de atributos almacenados. Sin embargo, debido a la complejidad e irregularidad presente en las superficies que se encuentran en la mayoría de los edificios existentes, las bibliotecas BIM necesitaran reconstruirse o modificarse para lograr representar cada objeto sólido analizado. En el cuarto capítulo de la presente tesis se describe el desarrollo de una metodología capaz de superar las carencias de los programas comerciales BIM para lograr modelar los objetos paramétricos, preservando el nivel de detalle encapsulado en las nubes de puntos escaneadas.

### **3.3. Building Information Modeling (BIM)**

Las plataformas BIM han sido identificadas en los últimos años por el sector AEC/FM como el medio más eficaz para integrar el diseño de los edificios, ya que pueden proporcionar una representación digital 3D de las características físicas, funcionales y semánticas de un entorno, estructura o edificio en todas las etapas de su ciclo de vida (Pezeshki & Ivvari, 2016, Park et al., 2018). En la figura 4 se ilustran las fases de las plataformas BIM. A pesar de que estas plataformas sean multidisciplinarias, la coordinación y el flujo de trabajo a implementar varían de acuerdo con cada profesión interesada. Esta tesis se interesa por la reconstrucción tridimensional del patrimonio arquitectónico mediante la manipulación de nubes de puntos y datos históricos en los sistemas BIM. Por lo tanto, el flujo de trabajo que se tendrá en cuenta en este capítulo se centrará en el proceso de modelado de los datos adquiridos.

Es fundamental comprender que las tecnologías BIM permiten, a través de un modelo paramétrico tridimensional único, administrar toda la información y programación que en otros entornos se encuentra dividida en varias capas, archivos o carpetas. La plataforma BIM no es solo una tecnología de diseño de arquitectura, ingeniería o construcción que representa a los edificios como un modelo paramétrico 3D, sino que su alcance aborda la capacidad de integrar todas las disciplinas involucradas en el diseño y la gestión del mismo, desde su concepción hasta el final de su vida útil.



**Figura 4:** El círculo con el término Building Information Modeling en el centro, muestra todas las fases del ciclo de vida de un edificio.

Fuente: Adaptación al castellano de la versión original de <http://www.grupoditecsa.com/es/metodologia-bim-renovarse-o-morir/>.

BIM es una tecnología en constante evolución y crecimiento, que se basa en componentes u objetos almacenados en bibliotecas paramétricas. Cada componente del entorno BIM tiene una representación paramétrica particular, por lo que las plataformas BIM tienen la capacidad de importar, manipular y gestionar información geométrica y no geométrica, así como los datos semánticos y topológicos que describen cada elemento del modelo (Watson, 2011; Bozoglu, 2016). Estos componentes se pueden utilizar para producir documentación técnica como planos, elevaciones, cortes, secciones, detalles y perspectivas de manera semiautomática. Además, el concepto de BIM promueve mejoras en la comunicación interdisciplinaria y en la coordinación del proyecto a través de la capacidad de interoperabilidad y el acceso simultáneo a información relevante en tiempo real (De Masi, 2015). Estas particularidades amplían la metodología de diseño tradicional y proporcionan documentaciones, modificaciones y transferencias rápidas de toda la información del modelo, generando así un proyecto compresible para todas las personas involucradas en el proceso de construcción (Logothetis & Stylianidis, 2016).



### 3.3.1. Evolución de BIM

Para entender el estado actual de BIM, así como lograr una explicación clara del significado de dicho acrónimo, se requiere la historia y el contexto de su evolución.

Los grandes avances tecnológicos con relación a la informática logrados a partir de la década de 1960 han permitido el desarrollo de CAD, que fue considerado como el sistema de diseño óptimo para ser utilizado por los sectores de la industria y la fabricación. Posteriormente el concepto de modelado geométrico asistido por computador, junto con sus técnicas de modelado sólidos B-rep y CSG, ha sido adoptado por el sector de la construcción, abriendo camino hacia una nueva era de representación de la geometría digital para propósitos de diseños en 2D y 3D. Sin embargo, las limitaciones de las técnicas CAD, en general, y la necesidad de representar a los edificios como entidades reales, hicieron que el nacimiento del programa paramétrico fuera esencial.

Paralelamente a estos avances, la industria de la fabricación ha desarrollado un sistema denominado *modelado de producto*. Este sistema, surge como reacción a la demanda de objetos de gran calidad en el menor tiempo posible (Tomiyama et al., 2009). El modelado de producto adoptó características capaces de procesar análisis integrados, reducir los errores de fabricación y almacenar los datos adquiridos, dando un salto importante hacia el desarrollo de los nuevos procesos de diseño. Con el fin de lograr el correcto funcionamiento de estos sistemas se crea a inicios de la década de los ochenta un formato de datos denominado *Estándar para el Intercambio de Datos del modelo De Producto* (STEP). STEP se ha convertido en un componente clave, debido a su capacidad de almacenamiento de datos orientados a objetos. Dicha capacidad de almacenamiento ha permitido que los modelos diseñados no quedaran compuestos únicamente por geometrías CAD, sino también por objetos con información semántica y espacial. De esta manera, STEP se considera como el antecesor del concepto BIM.

La idea de aplicar este flujo de trabajo en el modelado de edificios cautivó la atención de la industria de la construcción rápidamente. Sin embargo, no es hasta 1987 que Graphisoft a través de su entorno ArchiCAD<sup>25</sup> crea la primera herramienta capaz de representar los proyectos arquitectónicos como modelos digitales tridimensionales, y además almacenar en su base de datos la información geométrica, las propiedades y la cantidad de elementos utilizados. Las características revolucionarias

---

<sup>25</sup> Programa ArchiCAD. Graphisoft. URL: <https://www.graphisoft.es/archicad/>. [En línea] Acceso 21/12/2017.

y las innovaciones tecnológicas logradas a partir de la implantación de dicho programa son consideradas como el primer paso hacia el nacimiento de la metodología BIM.

Es importante señalar que, paralelamente a estos avances, existieron varios intentos para facilitar la comunicación entre los distintos profesionales. Prueba de ello se da durante los años 1994 y 1997, cuando surge en los Estados Unidos un grupo denominado *Industry Alliance for Interoperability* (IAI). Este grupo nace con el fin de desarrollar un formato interoperable de estructura abierta capaz de complementar, mejorar y estandarizar el intercambio de información geométrica y semántica entre los programas existentes. El formato se denominó *Industry Foundation Class* (IFC) y todavía se está desarrollando activamente. Los avances alcanzados por el grupo IAI, bajo el nombre de *BuildinSMART* desde el 2005, fueron seguidos rápidamente por todo el mundo.

A pesar de los avances interactivos promovidos, el cambio de sistemas de modelado fue un proceso lento, debido a la costumbre por parte del sector de arquitectura, ingeniería y construcción (AEC) de utilizar los programas gráficos CAD (Gray et al., 2013). El interés por las plataformas de modelado integrado o paramétrico orientado a objetos fue creciendo a medida que el concepto BIM se difundía (Becerik-Gerber & Rice, 2010). En 2002, Autodesk a través de la adquisición del programa de modelado paramétrico Revit, empezó a popularizar el término BIM. Sin embargo, no fue hasta el 2003 que el término BIM logra su gran salto hacia los demás proveedores de programas de diseño. Este despegue se da gracias al debate organizado por el analista de la industria del diseño Jerry Laiserin, el cual demostraba a los demás expertos que era posible con las nuevas tecnologías BIM lograr un proceso y diseño integral, eficaz y colaborativo entre los diferentes programas de diseño, capaz de facilitar los cambios necesarios en la industria de la construcción (Underwood, 2009). El mismo año, tres de los principales proveedores de herramientas de diseño, Autodesk, Bentley y Graphisoft, habían empezado a utilizar el concepto de BIM en sus nuevas herramientas. En la actualidad alguno de los programas BIM más representativos, que han logrado crear su propia base de datos y que además son capaces de diseñar modelos digitales tridimensionales con aspecto y características reales, son Autodesk Revit®, Graphisoft Archicad®, Bentley Architecture<sup>26</sup>, Tekla<sup>27</sup>.

---

<sup>26</sup> Programa Bentley Architecture. URL: <https://www.bentley.com/en/products/brands/microstation>. [En línea] Acceso 02/02/2018.

<sup>27</sup> Programa Tekla. URL: <https://www.tekla.com/>. [En línea] Acceso 02/02/2018.

### 3.3.2. Actualidad y características de BIM

La idea del concepto BIM surge a partir del desarrollo del proceso tecnológico de modelado de producto, que posteriormente se vinculó al proceso comercial de modelado paramétrico integral. Por tal motivo, la definición del acrónimo BIM no puede referirse solo a cómo se modela un objeto en 3D, sino que también debe relacionarse con cómo se estructura, combina y organiza la información durante el flujo de trabajo del proceso constructivo.

En (Thomson, 2016) se conoce a BIM como un término ambiguo que al descomponerse en letras individuales puede corresponder con diferentes significados. La letra “B” se puede interpretar como edificio, construcción o Big Data. Sin embargo, estos términos no deben engañarnos o restringirnos a pensar que se refieren únicamente a la construcción de un edificio, ya que BIM en sí es relevante para todos los sectores incluyendo los de instalaciones e infraestructuras (Eadie et al., 2013; ICE BIM, 2014). La “I” generalmente se refiere a la información o a la integración, y es el término más constante entre los interesados, ya que transmite los datos funcionales, topológicos y semánticos al proceso. La definición de “M” se puede interpretar como modelado, extracción, administración o gestión. El modelado es la palabra principal y la más utilizada. Sin embargo, en los casos que el enfoque del trabajo es la organización, la letra “M” se relaciona a la gestión y la administración de los datos más que al proceso de modelado (BIM Industry Working Group, 2011).

Desde este punto de vista, se estima que la concepción del significado del acrónimo BIM ha ido variando y evolucionando, interpretándose de diferentes maneras según la perspectiva de los distintos grupos de investigaciones. BIM es definido como “un proceso inteligente basado en un modelo 3D que brinda las herramientas necesarias para construir y administrar edificios e infraestructuras de manera más eficiente” (AUTODESK, 2018); como “una forma digital que respalda la renovación, el mantenimiento, la construcción y las operaciones de activos, durante todo el ciclo de vida del edificio” (EUBIM taskgroup, 2017) y como “la recolección y gestión de información a través del ciclo de vida de un activo” (ICE BIM, 2014).

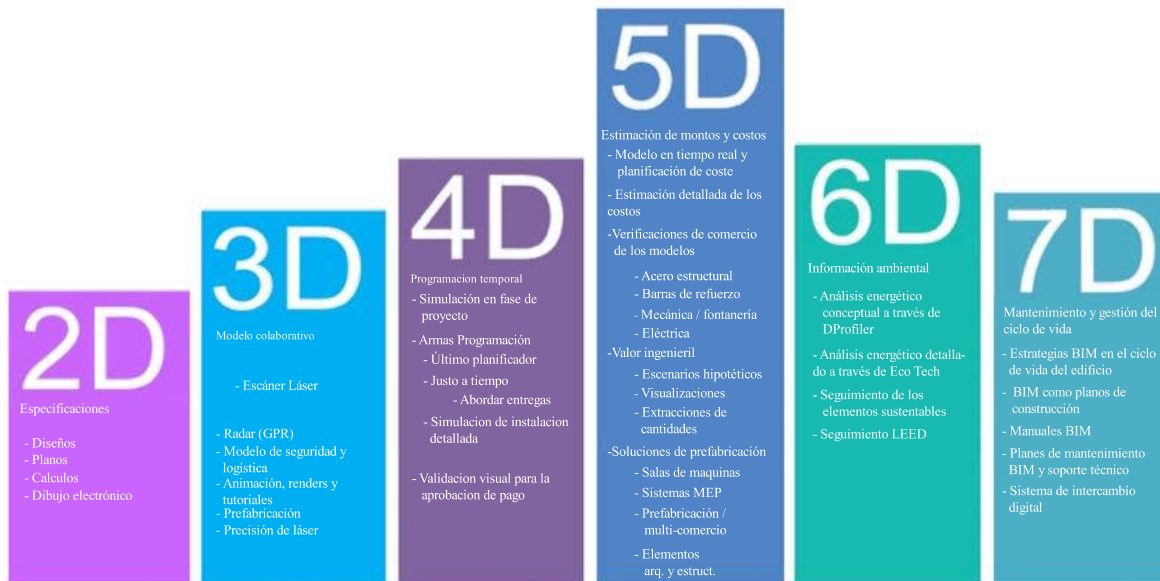
Junto a estas definiciones de BIM, existen otras concebidas por investigadores académicos que comparten el ideal de vincular el proceso de edificación y la gestión del ciclo de vida del edificio en una misma herramienta digital de forma colaborativa. Además, es importante señalar que existen definiciones de BIM estandarizadas y regularizadas. Estas definiciones fueron desarrolladas por los principales patrocinadores de BIM para ayudar a proporcionar un conocimiento claro sobre el concepto del mismo.

Según el Comité Nacional de Estándares BIM de EE. UU el acrónimo BIM “es una representación digital de las características físicas y funcionales de una instalación. Un BIM es un recurso de conocimiento compartido para la información sobre una instalación que forma una base confiable para las decisiones durante su ciclo de vida; definido como existente desde la concepción más temprana hasta la demolición” (NBIMS, 2018).

Por otro lado, el gobierno de Reino Unido desarrolló los estándares de Especificaciones de Acceso Publico 1192-2/5 (PAS 1192-2 y PAS 1192-5) con el fin normalizar y asegurar que los proyectos de construcción se realicen con BIM. Por tal motivo, los PAS 1192-2 / 5 para acelerar el entendimiento de esta tecnología, definen a BIM como “el proceso de diseño, creación y administración de información digital sobre un activo de construcción o infraestructura, utilizando información electrónica orientada a objetos” (PAS 1192-2: 2013; PAS 1192-5: 2015).

Dadas las definiciones existentes sobre BIM, para esta tesis formulamos una explicación general en base los conocimientos estándar de esta plataforma. Por lo tanto, BIM se puede definir como una plataforma multidisciplinar de trabajo colaborativo, donde los procesos de modelado, gestión y comunicación son compartidos entre los participantes involucrados, en distintos niveles e integrados en el mismo entorno digital, utilizando los objetos paramétricos ya existentes y los modelados como componentes constructivos reales para garantizar y representar la calidad, eficiencia y ciclo de vida de un edificio completo.

De acuerdo con (Pauwels et al., 2008; Logothetis et al., 2015), es posible considerar a BIM como un paradigma completamente nuevo, ya que supone la evolución de los sistemas de diseño tradicionales basados en el plano de trabajo, al incorporar información paramétrica como especificaciones y dibujos técnicos (2D), propiedades geométrica en un modelo colaborativo (3D), información sobre la programación temporal constructiva (4D), sobre los montos y costos (5D), información ambiental del proyecto (6D) e información sobre el mantenimiento y gestión del ciclo de vida (7D) (figura 5). Esta información adquirida se almacena en la base de datos de BIM y permite conseguir un modelo paramétrico digital, capaz de simular las características y las condiciones de cada elemento como si fueran reales (Azhar, 2011, Osello et al., 2012). Además, a partir de los modelos digitales diseñados, se podrán obtener de forma semiautomática la documentación específica relacionada con cualquier momento del ciclo de vida del producto: etapa preliminar, de diseño, de ejecución, de administración y/o de su posible demolición.



**Figura 5:** Explicación de las distintas dimensiones de BIM.

Al ser BIM una plataforma multidisciplinar y colaborativa, facilita la cooperación integrada de varios profesionales, donde las modificaciones realizadas por cada uno de ellos se informan en tiempo real a los demás miembros involucrados en la ejecución del modelo, permitiendo de esta manera recuperar en cualquier momento los datos útiles y reducir la posibilidad de errores. Adicionalmente, esta forma de trabajo colaborativo establece pautas distintas con relación a la capacidad de decisión y modificación del proyecto. Por lo tanto, en la configuración de los modelos paramétricos de edificios es necesario que los datos estén organizados de acuerdo con el uso y las propiedades que le dará cada individuo que participe en el proceso de construcción. Esto significa que los componentes arquitectónicos modelados pueden representar niveles de desarrollo (LOD)<sup>28</sup> diferentes, dependiendo del propósito al que estén destinados y de los requisitos de las partes interesadas.

A lo largo de esta tesis se utiliza la terminología LOD en referencia al nivel de desarrollo. Esta terminología fue desarrollada por el *American Institute of Architecture* (AIA) como un protocolo de nivel estandarizado, que además de ser un indicador, permite definir los diferentes niveles de desarrollo existentes a través de una clasificación numeral (LOD 100, LOD 200... LOD 500) (AIA,

<sup>28</sup> En los textos actuales, el acrónimo LOD se corresponde a dos definiciones distintas que pueden generar confusiones. LOD como Nivel de Detalle (*Level Of Detail*) puede entenderse como la cantidad y riqueza de información gráfica incluida en los componentes de un modelo BIM. El LOD como Nivel de Desarrollo (*Level Of Development*) es un indicador que permite a cada investigador involucrado, determinar el grado de certeza de la información contenida en el elemento modelado y valorar el uso específico para el que está destinada dicha información (Soust-Verdaguer et al., 2017).

2008; BIM FORUM, 2016).

Gracias a las posibilidades que ofrecen las plataformas BIM, en un mismo modelo pueden encontrarse varios LOD. Se deduce que en las representaciones conceptuales o volumétricas existe un nivel de desarrollo bajo (LOD 100); sin embargo, en los elementos paramétricos modelados para proyectos de conservación, restauración, mantenimiento o como modelo de información, el nivel de desarrollo deberá ser mucho más alto (LOD 500) ya que estos modelos BIM deben representar una condición real de como está construido el elemento (*as-built*). En el caso específico de esta tesis, el rango del nivel de desarrollo (LOD) alcanzado en el modelo BIM se encuentra relacionado con el tipo de documentación semántica y espacial adquirida.

En la actualidad el trabajo multidisciplinario y colaborativo entre los diferentes profesionales involucrados en el proceso de construcción se logra a través de la interoperabilidad de las plataformas BIM. La interoperabilidad se define como la capacidad de comunicación entre distintas aplicaciones, lo cual nos permite intercambiar información y utilizarla para contribuir conjuntamente al trabajo en cuestión (Eastman et al., 2011). La interoperabilidad entre los programas de autoría BIM se logra mediante el formato estandarizado (estándar: ISO 16739:2013)<sup>29</sup> IFC (BuildingSMART International, 2013; Ochmann et al, 2014). La integración de BIM con otras aplicaciones gracias al formato de intercambio IFC permiten superar las limitaciones que puedan presentar los programas al momento de realizar un proyecto arquitectónico. Además, IFC por su capacidad de lectura e intercambio de datos entre las mayorías de *software* utilizados, garantiza la distribución de la información hacia todos los autores involucrados en el proyecto, evitando pérdida de tiempo y costos.

Otro estándar importante de BIM, utilizado para la gestión, intercambio y administración de toda aquella información necesaria para el mantenimiento operacional del edificio y la optimización del trabajo relacionado, es el *Facility Management*. En los últimos años, los esfuerzos que investigan la integración completa de BIM con FM han logrado desarrollar un estándar denominado *Construction Operations Building Information Exchange* (COBie). El estándar COBie es considerado como una definición de *vista de modelo* (MVD) o definición de vista de IFC predominante, que proporciona una estructura para el almacenamiento, captura e intercambio universal de todos los parámetros e informaciones relacionados a FM. Sin embargo, sus capacidades de identificación, filtro y proporción

---

<sup>29</sup> ISO Standard. ISO 16739:2013 Industry Foundation Classes (IFC) for Data Sharing in the Construction and Facility Management Industries. International Standard. 2013. URL: <https://www.iso.org/standard/51622.html>. [En línea] Acceso 04/05/2017.

de los datos relevantes para un edificio con requisitos específicos todavía son limitadas (Pärn & Edwards, 2017). Si bien COBie tiene algunas limitaciones, hoy en día su capacidad de soportar el formato IFC lo convierte en la aplicación de BIM con mayor interoperabilidad relacionada a la administración y gestión de instalaciones (East & Carrasquillo-Mangual, 2013; Kassem et al., 2015). En esta tesis las aplicaciones para la gestión FM y COBie no serán utilizadas y tampoco analizadas con mayor profundidad.

Desde el punto de vista del trabajo multidisciplinar, el concepto de interoperabilidad logrado por el formato IFC ha jugado un papel fundamental para terminar de convencer al sector AEC/FM de que BIM es la herramienta más eficaz y precisa para ser utilizada en los proyectos de construcción, restauración, mantenimiento o conservación, así como para la optimización de la gestión de datos. Prueba de ello son las numerosas organizaciones privadas y entidades gubernamentales que se han interesado en promover iniciativas asociadas al desarrollo y mejora de la industria de la construcción, a partir de la estandarización y regularización del uso de BIM.

En Estados Unidos, esta tarea fue liderada por la Administración de Servicios Generales (GSA). La GSA es una agencia independiente del gobierno de EE. UU, que exige desde el año 2007 el uso de BIM para gestionar y modelar todos los bienes no relacionados con la defensa del gobierno federal. Por otro lado, cabe mencionar que los EE. UU a través de BuildingSMART han impulsado la creación de estándares propios para los entregables BIM en sus proyectos, estableciendo un mismo lenguaje para el intercambio de información. Este patrón se repitió en otros países donde BIM se está investigando activamente, más precisamente en los países Escandinavos, Canadá, Reino Unido, Singapur, China y Australia.

En Finlandia, inversiones públicas vienen costeadando la investigación de nuevas tecnologías desde los años 70. Además, aquí la adopción de BIM se ha llevado a cabo muy rápidamente, ya que su uso es una realidad desde que en 2007 se exigieran archivos IFC a cualquier profesional que entregase proyectos de ejecución. En Noruega y Suecia, desde el año 2011 todos los proyectos públicos encargados deben ser presentados con programas BIM. Gracias a esta iniciativa, el conocimiento de BIM en la industria de la construcción noruega se ha expandido al tal punto que actualmente la dirección de obras públicas y de propiedad del gobierno exige su uso en todos los proyectos de ejecución razonablemente complejos. El caso de Dinamarca es un tanto particular, ya que desde el 2007 exige que todos los proyectos públicos de envergadura superior a 750.000 € deben realizarse en BIM.

Por otro lado, en el año 2011 se crea en Reino Unido la National Building Specification (NBS). Esta se considera como una Biblioteca Nacional BIM para la industria de la construcción, con objetos gratuitos y de fácil acceso para los profesionales de la construcción. Además, desde el año 2016 es obligatorio el uso de BIM en todos los proyectos financiados por el gobierno. Con esta modalidad se estima reducir un 20% el costo de construcción, y además incentivar al sector privado utilizar estas herramientas (PAS 1192-2: 2013; PAS 1192-5: 2015).

En Asia, Singapur es el Estado más activo en términos de BIM. Desde el 2008 el gobierno, junto con la Autoridad de Construcción y Edificación (BCA), aportan estímulos a las empresas, profesionales y estudiantes, para el uso y aprendizaje de esta tecnología. Además, a partir del año 2015, es obligatorio entregar todos los proyectos del sector público en BIM.

En Latinoamérica la falta de información necesaria, el desinterés y la no involucración de las empresas públicas, privadas y entidades gubernamentales, generan que la adopción del BIM aún no sea una realidad concreta. Sin embargo, en países como Argentina, Brasil, Chile, Colombia y México su uso ya es habitual, y se espera que estos países representen el inicio de su difusión por el resto del continente.

En definitiva, como observamos a lo largo de este apartado, durante la última década la tecnología BIM se ha implantado de forma progresiva en diferentes países. No obstante, la integración total de BIM en la planificación diaria todavía se encuentra en desarrollo.

### 3.3.3. Librerías Paramétricas

Las librerías o bibliotecas paramétricas se consideran una base de datos constructiva que complementa a los paquetes de autoría BIM. Estas bibliotecas se caracterizan por almacenar, organizar, agrupar y combinar de manera ordenada los objetos paramétricos predefinidos que se utilizan en todos los aspectos del edificio, desde el diseño hasta la construcción 3D y más allá (Nawari et al. 2014). Además, debido a las cualidades y a los datos informáticos clasificados de los objetos almacenados, se puede decir que estas bibliotecas garantizan a los diseñadores la posibilidad de modelar sus proyectos completos de forma cohesiva, eficiente, fluida y precisa.

Existen diversas bibliotecas de objetos constructivos en el entorno BIM; por lo tanto, no se pierde tiempo buscando formas, partes o elementos, a través de diferentes recursos arquitectónicos, como libros y sitios web (Almaimani & Nawari, 2017). Por tal motivo, se considera que las bibliotecas reducen el tiempo requerido para desarrollar y modelar un edificio y dan como resultado una solución



rentable para la preparación de documentos arquitectónicos y constructivos. Además, aumentan significativamente la eficacia del uso de BIM, ya que almacenan y proporcionan objetos integrales ricos en información que los diseñadores podrían usar directamente para los cálculos estructurales, energéticos, económicos y temporales.

Por otro lado, las bibliotecas son un recurso práctico en el dominio del diseño y sirven de ayuda a los diseñadores, ya que permiten que los objetos paramétricos tridimensionales se configuren y adapten a la diversas formas y dimensiones de un proyecto. Además, estos objetos paramétricos se podrán volver a utilizar en otras propuestas, enriqueciendo de esta manera el concepto de biblioteca paramétrica y satisfaciendo las necesidades cambiantes de la industria.

A pesar de la promoción entusiasta y la euforia en torno a la aceptación y utilización de las plataformas BIM, todavía deben superarse varios obstáculos. Uno de los más importantes es la falta de una biblioteca de objetos BIM estandarizada que permita el modelado paramétrico de los elementos arquitectónicos que representan a los edificios existentes e históricos. Generalmente las bibliotecas nativas de las plataformas BIM, almacenan y gestionan geometrías paramétricas primitivas y objetos simples, donde las restricciones y las formas ya están establecidas. Sin embargo, los elementos arquitectónicos de las bibliotecas de entorno BIM necesitan reconstruirse o modificarse para lograr representar las características de los objetos sólidos presentes en las superficies heterogéneas, complejas e irregulares que cubren a la mayoría de los edificios históricos existentes. Esto representará un aspecto problemático con relación al enfoque basado en BIM, ya que la creación desde cero de los nuevos elementos será un proceso manual largo, laborioso y costoso.

Actualmente varios investigadores han desarrollado bibliotecas paramétricas adecuadas para representar virtualmente los edificios existentes de un determinado estilo o periodo histórico arquitectónico. Estas bibliotecas de carácter histórico se han propuesto para abordar la falta de datos de diseño digital, reducir el tiempo de modelado y gestionar los recursos de las estructuras históricas. En la sección 3.5. se profundizará el concepto de las bibliotecas de carácter histórico.

#### 3.3.4. Modelado de componentes BIM a partir del uso de la nube de puntos

Otro componente clave para el auge y aceptación de BIM es que el modelo de aspecto real resultante se almacena en un único archivo integral de datos accesibles, que pueden ser utilizados como herramientas de gestión e intercambio inmediato de información útil sobre el activo para diversos fines.

En la actualidad la mayoría de las plataformas BIM tienen incorporado una herramienta capaz de convertir los archivos de nubes de puntos a sus propios formatos de archivo, ayudando a los investigadores a acelerar el proceso de diseño y modelado 3D de los edificios y estructuras existentes (Jung et al., 2014). Sin embargo, a pesar de que las nubes de puntos proporcionan las formas y dimensiones de los objetos, estas pueden ser utilizadas únicamente como guías de referencia en los programas BIM, debido a que se encuentran vinculadas a datos que no pueden editarse por sí mismos, sino que existen como una abstracción subyacente al entorno del modelo. Por lo tanto, para lograr crear un modelo paramétrico BIM, el investigador o los interesados deberán seguir una serie de pasos secuenciales.

Principalmente deben organizarse todos los datos adquiridos con relación a las nubes de puntos capturadas, al conocimiento arquitectónico y geométrico, al nivel de desarrollo (LOD) necesario y al sector de la construcción al que está dirigido el proyecto. Posteriormente, esta información se insertará en la plataforma BIM que el usuario utilice. Tras ello, los datos 3D de la nube de puntos serán segmentados de manera semiautomática con el fin de identificar y describir las superficies correctas alrededor de cada punto 3D y así crear los modelos paramétricos (Dimitrov & Golparvar-Fard, 2015). Generalmente, el proceso de modelado es semiautomático debido a la falta de herramientas BIM que automaticen la conversión de nubes de puntos a modelos paramétricos BIM.

En la práctica, el modelado paramétrico a partir de las nubes de puntos se realiza de forma interactiva con los programas de modelado BIM principales, tales como Autodesk Revit®, Bentley Architecture®, Graphisoft ArchiCAD®, Tekla® o Nemetschek Allplan®<sup>30</sup>. La mayoría de estos programas, permiten la generación rápida de planos de edificios y la semiautomatización del modelado BIM de edificios existentes (Wang et al., 2015).

Es importante señalar que el proceso para generar modelos BIM a partir de datos de nubes de puntos es factible para las superficies regulares e irregulares de los monumentos patrimoniales. Sin embargo, esta será una tarea complicada, que requerirá aumentar los conocimientos previos sobre el edificio analizado ya que, la mayoría de las veces será necesario comenzar su modelado desde cero. En el cuarto capítulo se describirá en profundidad el proceso de modelado paramétrico a partir del uso de la nube de puntos y en el quinto capítulo se validará la metodología de modelado propuesta con dos casos de estudios.

---

<sup>30</sup> Programa Allplan Architecture. Nemetschek. URL: <https://www.allplan.com/es/>. [En línea] Acceso 02/02/2018.

### **3.4. BIM para la preservación y documentación del patrimonio**

La mayoría de las herramientas de tecnología BIM se han desarrollado para el diseño de nuevos edificios y nuevas construcciones (Eastman et al., 2011). Sin embargo, durante la última década se han llevado a cabo múltiples proyectos de protección, conservación y restauración del patrimonio cultural debido a su creciente interés socioeconómico. Por lo tanto, hoy en día la tecnología BIM no se limita a construcciones nuevas, sino que también ha evolucionado significativamente en el campo de la gestión y la documentación del conocimiento integral e incremental del patrimonio histórico cultural, actividades fundamentales para una evaluación precisa del monumento a intervenir (Puerto et al., 2016). Ahora, es posible representar en un entorno virtual el estado de conservación real de los edificios analizados.

Anteriormente se ha mencionado que el procedimiento de reconstrucción digital del patrimonio histórico cultural no es una tarea fácil, ya que los objetos a modelar consisten en componentes cuyas características y morfologías heterogéneas, complejas e irregulares no están representadas en las bibliotecas de las plataformas BIM. Por lo tanto, consideramos que es necesario llevar a cabo una investigación profunda sobre el uso, las reglas y los patrones históricos arquitectónicos, para lograr recrear el pasado, o para restaurar o conservar el estado actual de un determinado monumento históricos. Los enfoques y conocimientos históricos arquitectónicos adquiridos en conjunto con las nubes de puntos ya introducidas al entorno BIM, serán utilizados para modelar los diferentes componentes paramétricos digitales y lograr un modelo BIM *as-built* del patrimonio arquitectónico analizado (Hichri et al., 2013; López et al., 2017). Además, los niveles de desarrollo y precisión de los componentes resultantes permitirán producir la documentación de conservación y los dibujos de ingeniería necesarios para el mantenimiento y la gestión del patrimonio analizado.

Si bien estos procedimientos pueden representar un nuevo enfoque de modelado, cabe repetir que el diseño paramétrico de los elementos de construcción de las nubes de puntos es un proceso semiautomático lento (Chevrier et al., 2010; Anil et al., 2013). Por lo tanto, una vez que se hayan creado los modelos digitales 3D, las bibliotecas de los elementos paramétricos se deben generar bajo el concepto de modelado de estructuras históricas, el cual se expresó inicialmente como HBIM. HBIM es diferente a otros enfoques, ya que el producto es la creación de modelos 3D completos que contienen información tanto tangible como inmaterial inherente a los edificios analizados (Rivera et al., 2018).

### **3.5. Heritage Building Information Modeling (HBIM)**

El concepto HBIM se utilizó por primera vez en el trabajo (Murphy et al., 2009), realizado para el Dublin Institute of Technology. Según los autores de (Murphy et al., 2009;2011; Dore et al., 2012), HBIM persigue el modelado y la documentación de los elementos arquitectónicos según tipologías artísticas, históricas y constructivas. Además, se considera a HBIM como una biblioteca especial de objetos paramétricos BIM que ha sido diseñada como un sistema multidisciplinar y en constante evolución, que se utiliza para administrar, documentar y reconstruir digitalmente el patrimonio cultural dentro del marco general del *patrimonio inteligente*. Generalmente, la biblioteca HBIM se construye utilizando los manuscritos y la documentación histórica arquitectónica, el escaneo láser, las técnicas fotogramétricas, así como cualquier otro dato obtenido del análisis físico del edificio en cuestión (Dore & Murphy, 2014). Los nuevos componentes obtenidos para la biblioteca HBIM permiten transformaciones y cambios rápidos en sus formas, logrando de este modo generar modelos digitales 3D de cualquier proyecto con carácter y estilo arquitectónico similar, acercándose así a una solución para el modelado de ingeniería inversa.

En las investigaciones de (Quattrini & Baleani, 2015; Quattrini et al., 2017) se describe que el uso de datos históricos y técnicos para modelar los componentes de la biblioteca HBIM introduce la oportunidad de desarrollar los detalles detrás de la superficie de los objetos paramétricos con respecto a sus materiales y componentes de construcción, sus técnicas constructivas, sus recuerdos culturales e históricos, así como su patologías, su intervenciones, su estado de conservación y programa de mantenimiento. Además, también es posible introducir datos paramétricos temporales para representar los eventos que ocurrieron a lo largo del ciclo de vida del edificio, pudiendo albergar en un mismo sitio toda la información disponible sobre la historia del monumento y su evolución a lo largo del tiempo (Fai et al., 2011). Por lo tanto, los componentes paramétricos resultantes para esta nueva biblioteca proporcionan una lectura real del monumento patrimonial analizado y podrán utilizarse para producir la documentación técnica de conservación (planos de planta, vistas, alzados, cortes de sección, detalles, perspectivas, etc.) y los modelos virtuales 3D completos (modelos de visualización), de forma semiautomática (Merchán et al., 2018).

La biblioteca HBIM sirve como base para la gestión e interconexión de la información con otras fuentes de datos gracias a la capacidad de interoperabilidad entre las plataformas BIM. Por tal motivo, los componentes de la biblioteca HBIM pueden facilitar la programación y el análisis histórico de la estructura (secuencia constructiva), los cálculos de tiempo y costo, las simulaciones de energía, así como otras funciones que mejorarán la forma de gestionar los procesos de conservación, restauración, reconstrucción o difusión de los edificios analizados, de los edificios patrimoniales que ya no existen o de los que no están documentados.

### 3.5.1. Revisión de la investigación HBIM

El análisis de la literatura actual sobre BIM o HBIM para edificios existentes demuestra un número creciente de publicaciones que han combinado nubes de puntos y programas BIM para cumplir con el modelado paramétrico y tridimensional del patrimonio arquitectónico. Las investigaciones de (Tang et al., 2010; Volk et al., 2014; Bruno et al., 2018; López et al., 2018) brindan revisiones integrales sobre los documentos más representativos que pretenden resumir y describir el panorama actual de los diferentes métodos y tecnologías creados para facilitar el modelado digital de los edificios existentes con BIM y, también, el desarrollo de las bibliotecas paramétricas HBIM.

Los autores de (Murphy et al., 2011; Dore & Murphy, 2012) proponen un conjunto de instrucciones, reglas y algoritmos que están restringidos al uso de una metodología para realizar cortes y secciones en la nube de puntos. Además, varios programas relacionados con BIM se utilizan para construir modelos 3D que pueden ser parte de la futura biblioteca de HBIM.

Otros trabajos, como (Oreni et al, 2013, 2014; Baik et al., 2014) proponen una serie de pasos para realizar la reconstrucción de una biblioteca histórica de edificios enteros a partir del uso de nubes de puntos. Se señala la incapacidad de los programas BIM para modelar superficies irregulares y complejas y se propone el uso del programa específico Rhinoceros® 3D para modelar superficies complejas a partir de las nubes de puntos. Luego, los objetos sólidos obtenidos se exportan al programa BIM, donde cada elemento puede obtener información paramétrica sobre los materiales y estado de conservación, añadidos, creando así la biblioteca HBIM.

En (Quattrini et al., 2015) se definen los componentes que se modelarán según su tipología, jerarquía y material. Cada elemento se modela directamente en la nube de puntos sin usar cortes o secciones. Las líneas de referencia se utilizan para marcar las distancias en las nubes de puntos. Las superficies regulares se modelan con las herramientas del programa Revit. Las superficies complejas se crean en B-Rep y los resultados obtenidos se exportan a Revit. Los detalles sobre los parámetros constructivos usados para modelar los diferentes elementos no se dan. Las superficies simples se modelan en (Barazzetti et al., 2015) usando herramientas y objetos sólidos del programa Revit, como columnas, paredes, ventanas, etc. Luego, el complemento "NURBS" se utiliza para representar y convertir las superficies complejas u orgánicas en elementos sólidos.

Por otro lado, en (Garagnani, 2013) se desarrolla un Complemento llamado GreenSpider en la *interfaz de programación de aplicaciones* (API) del programa Autodesk Revit®. Este complemento puede

reconocer y seleccionar los puntos más determinantes de una nube de puntos y traducirlos a puntos de referencia nativos en el entorno de modelado de Revit. Además, GreenSpider tiene la capacidad de conectar los puntos e interpolar los vértices a través de *splines*, permitiendo de esta manera generar representaciones paramétricas explícitas de las superficies capturadas. Después de su modelado, los componentes a través de IFC se alimentan con los metadatos semánticos y topológicos almacenados en un archivo BIM.

Finalmente, otro enfoque que describe el uso de la parametrización como un proceso para contribuir al marco general del *patrimonio inteligente* se presenta en (Rua et al., 2014). Se propone una metodología que consta de cinco fases principales: recopilación de datos, estudio de arquitectura, procesamiento de datos, modelado digital y modelado virtual. Autodesk AutoCAD<sup>31</sup> se utiliza para procesar datos técnicos y geográficos. Por otro lado, las herramientas de Autodesk Revit<sup>®</sup> se usan para modelar, manipular y adaptar familias ubicadas en la biblioteca BIM al proyecto y Blender<sup>32</sup> es el programa utilizado para la visualización y la interacción entre el modelo virtual y el público en general. El modelo resultante es una base de datos capaz de ser utilizada para la gestión del patrimonio analizado.

Las metodologías presentadas y analizadas en las literaturas indicadas como (Garagnani, 2013; Oreni et al, 2013, 2014; Baik et al, 2014; Rua et al., 2014; Quattrini et al., 2015; Barazzetti et al., 2015) son valiosas para documentar y diseminar información relacionada con la historia y transformación cronológica de los edificios existentes, sin embargo, presentan algunas desventajas. Cuando el modelado de componentes arquitectónicos se propone sobre una nube de puntos mediante programas de diseño intermedios, no se garantiza al exportar estos elementos, que se mantenga la información completa extraída de la nube de puntos. Esto genera inconvenientes como la imposibilidad de tener una perspectiva global o integral entre los objetos parametrizados y la nube de puntos, y el hecho de modelar cada objeto de forma independiente genera una pérdida de información en la concepción de la perspectiva general del edificio. Adicionalmente, el hecho de modelar cada objeto de forma separada requiere una importación de los archivos convertidos en diversos productos de *software*, resultando tarea poco interactiva cuando se trata de programas que no son interoperables con BIM.

Otro inconveniente es que varios autores, no especifican el marco temporal para describir sus fuentes de datos históricos y tampoco especifican las técnicas de modelado utilizado. Además, GreenSpider

---

<sup>31</sup> Programa AutoCAD. Autodesk. URL: <https://www.autodesk.es/products/autocad/overview>. [En línea] Acceso 02/02/2018.

<sup>32</sup> Programa Blender. URL: <https://www.blender.org/>. [En línea] Acceso 02/02/2018.

puede utilizarse como guía para el modelado del patrimonio arquitectónico, siempre y cuando el nivel de desarrollo (LOD) necesario sea bajo y los componentes puedan ser representados gráficamente como volúmenes primitivos, debido a que no contempla una gran cantidad de posibles características que refleja la nube de puntos.

Por esta razón, en el capítulo 4 hemos desarrollado una metodología integral basada en el uso de nubes de puntos y los patrones constructivos correspondientes a los periodos arquitectónicos históricos, que permitirá modelar las formas simples y complejas encontradas en el edificio patrimonial analizado. Además, esta metodología se considera una solución muy eficiente para superar las limitaciones de los programas BIM, lo que demuestra que es posible modelar un patrimonio completo.

### **3.6. Conclusiones**

En este capítulo, se ha realizado una revisión crítica del trabajo existente sobre el modelado paramétrico BIM y su implicación en el área del patrimonio arquitectónico. Se ha comenzado explicando qué es el modelado paramétrico y su conexión con las plataformas BIM. Posteriormente se ha descrito en profundidad el significado del acrónimo BIM, su evolución, características y envergadura. Además, en conjunto con la revisión bibliográfica se han realizado algunas observaciones sobre el estado actual de la técnica y las limitaciones de los diferentes enfoques analizados.

Aunque se ha visto que existen diversas definiciones para BIM, esta plataforma puede interpretarse como un espacio digital que combina el trabajo colaborativo, el almacenamiento e intercambio de datos estructurados, el diseño integral, la interoperabilidad con el desarrollo de IFC y la gestión del ciclo de vida del edificio, en un formato estándar abierto. En esencia, esta fusión o combinación de tareas permite que los modelos resultantes puedan suministrar información complementaria, a partir de la adquisición, actualización o combinación de nuevos datos.

Sin embargo, la utilización de BIM para el modelado paramétrico de edificios existentes posee algunas dificultades. El principal inconveniente identificado en esta revisión es la falta de automatización para modelar con BIM los edificios existentes. Otro vacío o problemática es que los programas de origen están casi completamente destinados a edificios nuevos, con formas geométricas simples, regulares o estandarizadas. Por tal motivo, sus herramientas y bibliotecas predefinidas están

muy limitadas para modelar las geometrías complejas que se ponen de manifiesto al representar con nubes de puntos las superficies irregulares del patrimonio arquitectónico.

Si bien existen numerosas investigaciones que continúan o expanden el concepto de bibliotecas HBIM, hoy en día éstas no son suficientes debido a que no representan y tampoco estandarizan todos los estilos y periodos arquitectónicos históricos existentes. No obstante, las contribuciones de nuevas bibliotecas y métodos que agilicen su construcción son un beneficio para los investigadores y el sector AEC/FM.

Como resultado de esto se requiere, en los siguientes capítulos, el desarrollo e implementación del flujo de trabajo necesario para lograr la reconstrucción digital de los componentes arquitectónicos ya existentes, a partir de la combinación de las nubes de puntos, los datos históricos y las plataformas BIM. Los componentes arquitectónicos resultantes, al implementar la metodología diseñada, se agruparán en una biblioteca paramétrica histórica detallada, capaz de ser utilizada en los procesos de mantenimiento, gestión o reconstrucción del patrimonio arquitectónico.



# Capítulo 4

Metodología para la creación de objetos  
paramétricos históricos bajo el concepto de  
HBIM

## 4.1. Introducción

Este capítulo presenta una metodología de modelado semiautomático, diseñada para crear objetos paramétricos históricos bajo el concepto de HBIM. La metodología propuesta, consta de tres etapas principales. La primera etapa de la metodología abarca la recopilación de información relacionada con datos geométricos, semánticos y tipológicos. Los datos geométricos se obtienen a partir de los métodos de escaneado láser 3D y fotogrametría. Estos métodos pueden proporcionar un conjunto de nubes de puntos que demuestren espacialmente las partes visibles de las superficies de un edificio u objeto arquitectónico. En cuanto a los datos semánticos y tipológicos, se obtiene a partir del análisis técnico del edificio y también de los manuscritos y la documentación histórica. Esta información permite descubrir los materiales y las reglas constructivas tradicionales, así como las transformaciones pasadas que podrían haber afectado al edificio.

La segunda etapa de la metodología describe la organización de los datos adquiridos, a través de un proceso ontológico, el cual se utiliza como una base de conocimiento de toda la información semántica recopilada. La ontología se puede integrar en la representación de objetos tridimensionales a través de plantillas IFC, o directamente en la plataforma BIM. Por otro lado, las nubes de puntos obtenidas, a través del preprocesamiento se alinean, limpian y filtran para facilitar su gestión. El preprocesamiento de la información se considera vital, ya que la alineación y depuración de la nube de puntos es lo que permite referenciar con precisión la información capturada.

Finalmente, en la tercera etapa las nubes de puntos y los datos semánticos filtrados se integran directamente al entorno BIM. Para esta etapa, la nube de puntos integrada se segmenta y delimita manualmente (siguiendo reglas y patrones históricos) para reconocer los objetos que se modelarán. Posteriormente, la biblioteca BIM existente y los objetos construidos externamente se usan para modelar paramétricamente el objeto o edificio estudiado. Los modelos resultantes se agrupan en una biblioteca HBIM que servirá como base para la gestión e interconexión de la información con otras fuentes de datos gracias a la capacidad de interoperabilidad entre las plataformas BIM.

En la figura 6 se ve reflejado un diagrama de bloques que representa la estructura de las tres etapas, de la metodología desarrollada. Cada paso de las etapas se analiza en profundidad en las siguientes subsecciones.

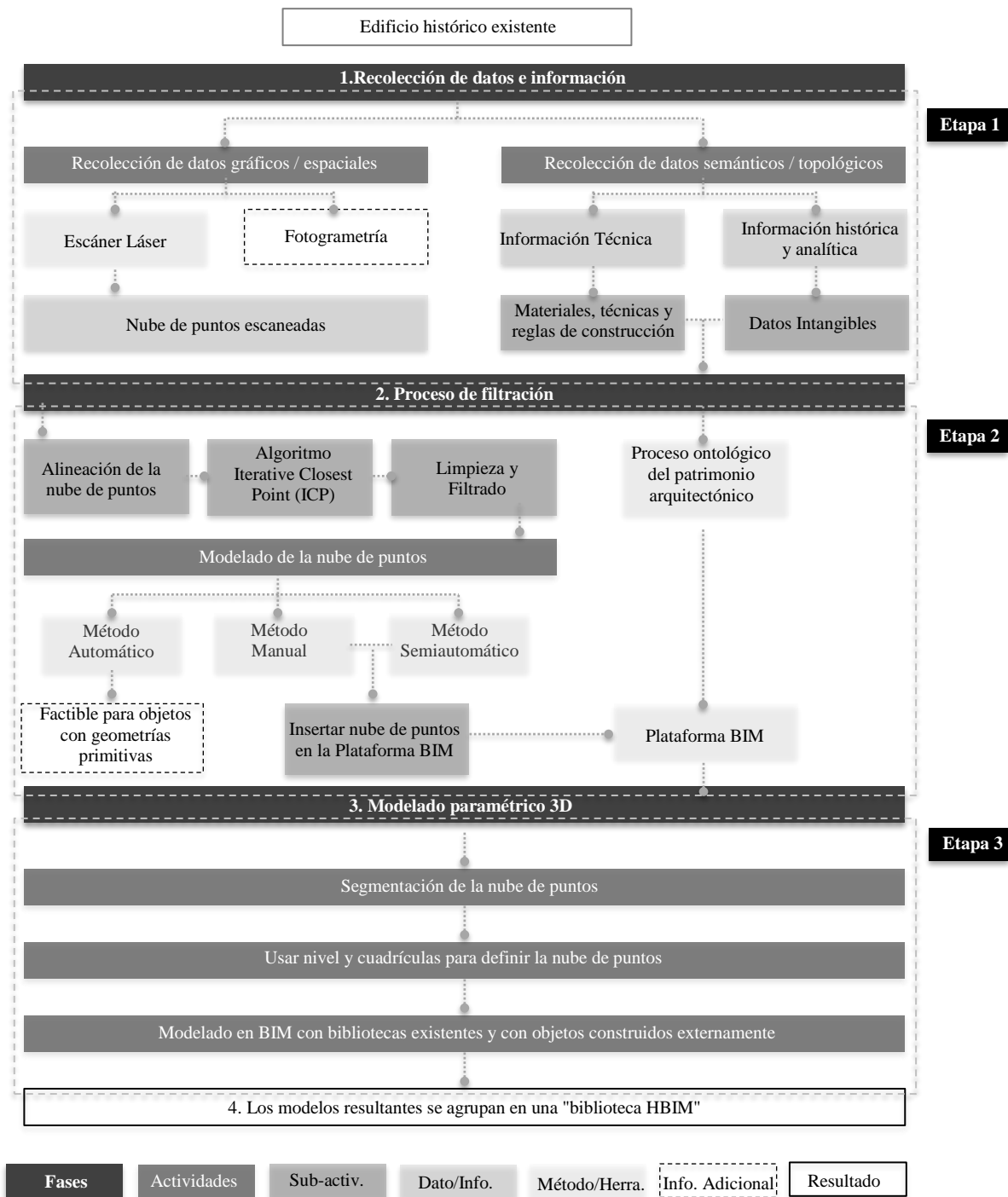


Figura 6: Diagrama de bloques sobre el método de construcción de la biblioteca HBIM.

## 4.2. Primera etapa

La etapa inicial de la metodología consiste en la recolección de datos sobre la articulación cultural y

el contexto histórico, y también implica la captura y recolección de los datos geométricos. La recopilación de información no geométrica o semántica depende del periodo considerado. Para la exposición contenida en este capítulo se han tomado como ejemplos edificios del siglo XII y XV, sin pérdida de generalidad dado que la misma metodología sería aplicable a cualquier otro estilo arquitectónico.

#### 4.2.1. Recolección de datos históricos (información semántica)

Particularmente, en nuestro caso cubrimos una iglesia románica del (siglo XII) y una fortificación tardo gótica del (siglo XV). Por lo tanto, ha sido necesario realizar un estudio bibliográfico que describa las normas, reglas, patrones y proporciones arquitectónicas del período de construcción al que pertenece el edificio. Además, se ha revisado el Inventario del Patrimonio Arquitectónico<sup>33</sup> del IPCE y el Portal de Archivos Españoles (PARES)<sup>34</sup> para conocer el estado de conservación, los usos, tipologías y características de cada monumento.

Cabe aclarar que, durante la Edad Media, específicamente entre los siglos (IX-XV), desaparece el sistema de proporciones de la arquitectura clásica. Por lo tanto, los edificios eran construidos según la unidad de medida o escala regulada por la autoridad supervisora (arquitectos, constructores, maestros, artesanos, monjes, etc.) en el momento y lugar que se llevaba a cabo la construcción. Generalmente, estas unidades de medidas o escalas no se repetían en los sistemas proporcionales de los distintos monumentos (Cohen, 2014). De esta manera, se crearon una serie de relaciones modulares constructivas para simplificar, facilitar y racionalizar la organización y comprensión de las formas, plantas y alzados de los monumentos históricos. Estos módulos constructivos proporcionaban información suficientemente precisa para permitir posibles linajes de sistemas proporcionales de un edificio a otro (Tarrío Carrodegas, 2012)

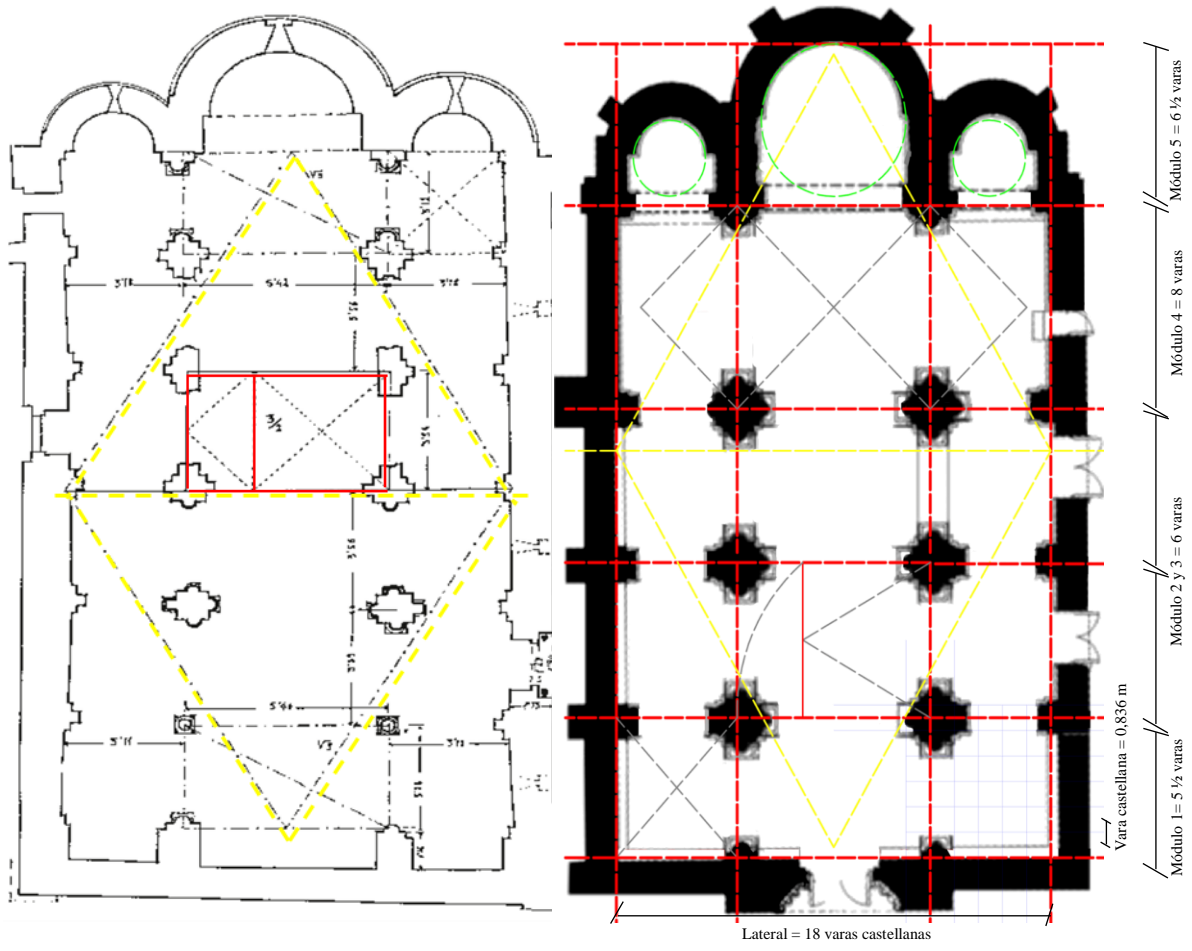
En este contexto, las obras de (Lorente & Francis, 2007; Arias, 2008) nos ayudan a entender como los diseñadores románicos, a través de la utilización de geometrías simples como triángulos equiláteros, cuadrados, rectángulos áureos o círculos, lograban crear los módulos y patrones característicos de los monumentos pertenecientes a dicho periodo. En la figura 7 se muestra una comparación entre la planta figurativa con respecto a los módulos y patrones obtenidas de (Lorente y Francis, 2007) y la proyección utilizada en la iglesia románica estudiada. El trabajo de (Cohen, 2014)

---

<sup>33</sup> Inventario del Patrimonio Arquitectónico. URL: <http://www.mcu.es/comun/bases/ipce/IPAA.html>. [En línea] Acceso 10/04/2018.

<sup>34</sup> Portal de Archivos Españoles (PARES). URL: <http://pares.mcu.es/ParesBusquedas20/catalogo/search>. [En línea] Acceso 10/04/2018.

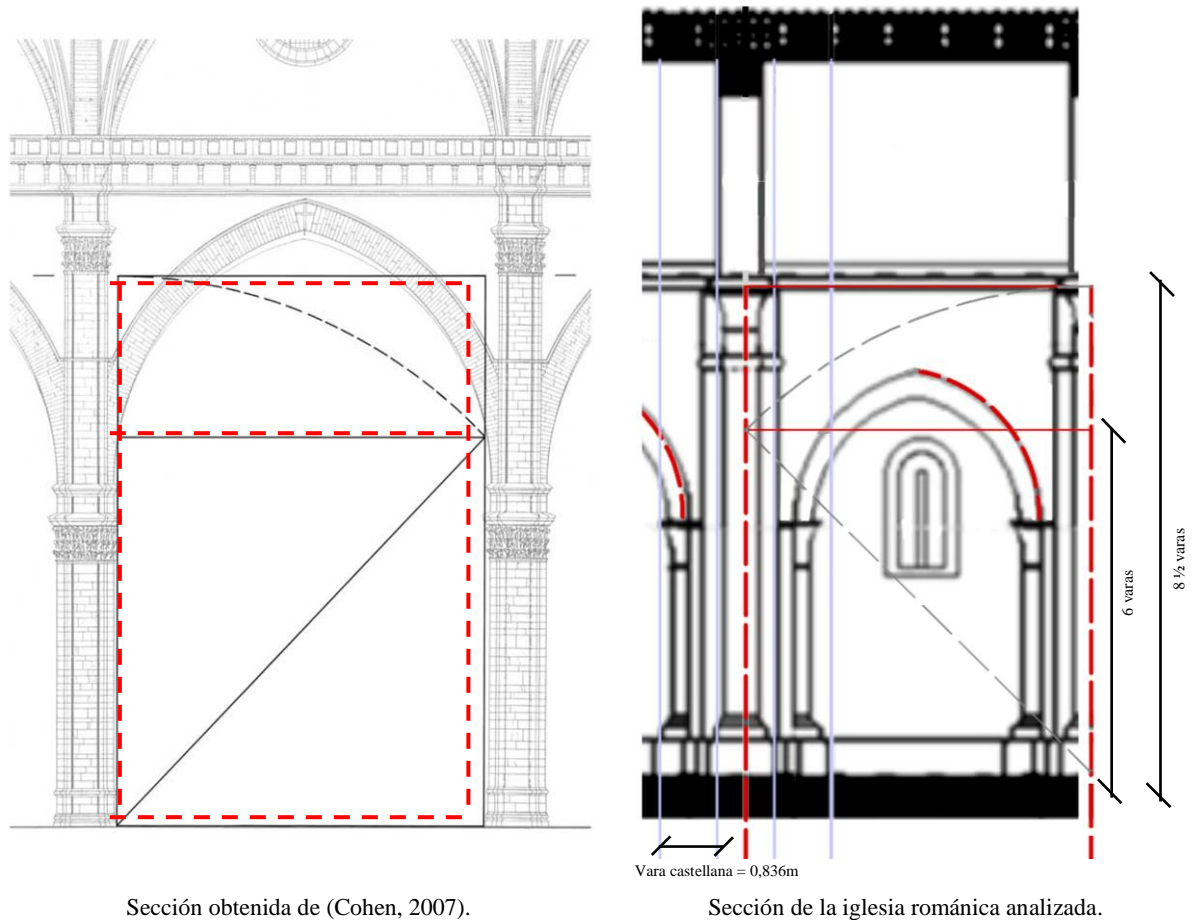
también nos ha ayudado a comprender los módulos repetitivos que determinan los patrones de medición, las distancias entre secciones, el número de secciones, etc. En la figura 8 es posible observar una comparación entre la sección de un sistema de módulos repetitivos obtenidos de (Cohen, 2014) y la proyección realizada para este trabajo.



Planta obtenida de (Lorente & Francis, 2007).

Planta de la iglesia románica analizada.

**Figura 7:** Planta figurativa sobre módulos y proporciones.  
Fuente: Izquierda: adaptado desde (Lorente & Francis, 2007). Derecha: figura propia.

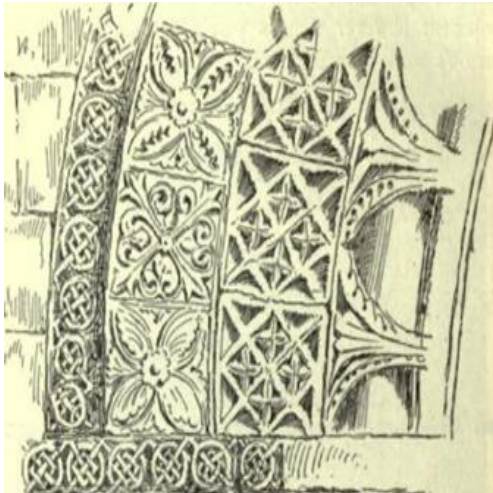


Sección obtenida de (Cohen, 2007).

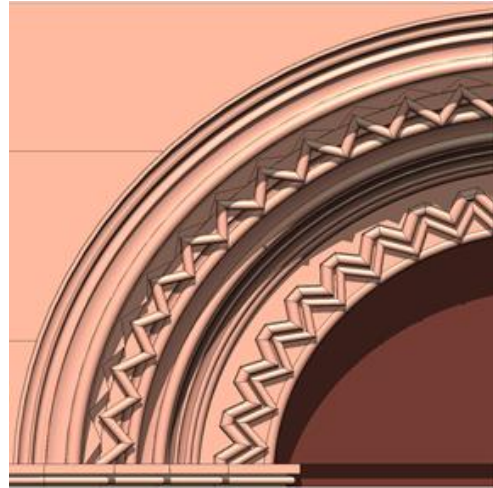
Sección de la iglesia románica analizada.

**Figura 8:** Sección sobre un sistema de módulos repetitivos.  
 Fuente: Izquierda: adaptado desde (Cohen, 2014). Derecha: figura propia.

Además, en los trabajos como (Miller, 1895; Kimball & Edgell, 1918; Jackson, 1920), se ilustran las influencias arquitectónicas del periodo Románico y sus principales características. En particular, varios de los elementos estructurales y decorativos nacen como una nueva interpretación al estilo clásico Romano y al periodo Bizantino, sin embargo, sus proporciones y formas varían según la región y el artesano a cargo. Durante el periodo románico se aprecia que la ornamentación ha evolucionado hacia una representación más natural, donde se combinaban la fauna, flora, los acontecimientos bíblicos y algunas figuras geométricas. En la figura 9 se observa cómo utilizamos el trabajo de (Jackson, 1920) para hacer una comparación entre un prototipo de un arco ricamente decorado con formas orgánicas y figurativas, y los arcos de la arquivolta modelada en el trabajo actual.



Arco obtenido de (Jackson, 1920).



Arcos de la arquivolta del acceso principal de la iglesia románica analizada.

**Figura 9:** Prototipo de un arco ricamente decorado, típico de las entradas románicas.  
Fuente: Izquierda: adaptado desde (Jackson, 1920). Derecha: figura propia.

El ámbito temporal de la investigación también abarca el periodo comprendido entre los siglos XIII y XV, específicamente el periodo de las fortificaciones bajomedievales españolas. Según los autores de (Cobos Guerra & Retuerce Velasco, 2011), en la historiografía castellológica es más fácil encontrar a los castillos o fortificaciones medievales agrupados por demarcaciones geopolíticas modernas, provincias o regiones que por épocas, estilos o tipologías. En este trabajo se ha mencionado que, a pesar de las diferencias y características particulares de los edificios, estos pueden estudiarse como un conjunto. En este contexto, los castillos señoriales mejores conservados, que se encuentran entre las provincias castellanas de Valladolid, Palencia, León y Segovia, se conocen como castillos de la Escuela de Valladolid.

Los autores de (Gil Crespo, 2013; Jiménez, 2018) describen, que estos castillos señoriales presentan, como elemento distintivo, una importante torre del homenaje<sup>35</sup> situada en una esquina de la fortificación, cortando tangencialmente la muralla del castillo. Generalmente, dichas torres se caracterizan por su planta geométrica rectangular y sus muros de gran espesor. Además, las torres homenaje se refuerzan por multitud de elementos defensivos singulares como adarve<sup>36</sup>, almenas<sup>37</sup>,

---

<sup>35</sup> Torre del homenaje: es la torre más destacada de una fortificación. Se construía para ser el reducto más inaccesible para los atacantes y por lo general contenía las salas nobles.

<sup>36</sup> Adarve: camino de ronda utilizado para la defensa y el desplazamiento de los soldados.

<sup>37</sup> Almenas: remates dentados en los muros de las fortificaciones., utilizados como escudo de protección por los defensores.

cadalsos<sup>38</sup>, foso<sup>39</sup>, garitas<sup>40</sup>, matacanes<sup>41</sup>, saeteras<sup>42</sup>, troneras y un lienzo amurallado, flanqueado por torres cubos<sup>43</sup> que suelen rodear y proteger el recinto y el patio de armas<sup>44</sup>. Particularmente, los castillos y elementos de este grupo o estilo arquitectónico presentan características tardo-góticas o del principio del renacimiento, donde se observan concepciones arquitectónicas racionalistas y proporcionales.

Al igual que en el periodo Románico, con la desaparición del sistema de proporciones de la época clásica, los elementos constructivos no tienen unidades de medición aplicables genéricamente, por lo tanto, siguen un sistema de relaciones que se basan en la consistencia de las fórmulas geométricas (Cohen, 2014).

#### 4.2.2. Recolección de datos geométricos (información espacial)

El otro aspecto clave en este paso implica la forma en que se capturan y recopilan los datos de información geométrica o espacial. Principalmente, se analiza el estado de conservación del monumento y se rastrea la existencia y disponibilidad de documentación geométrica previa. Cuanto mejor se conozca sobre el flujo de trabajo específico utilizado para el diseño de un edificio, mejor se podrán relacionar los datos con los modelos creados. Sin embargo, es evidente que la documentación y la práctica constructiva de los siglos (XI-XV) han sido abandonadas, olvidadas e incluso perdidas a través de las generaciones. Por lo tanto, la información geométrica de los monumentos construidos en estos siglos es escasa o nula. En este contexto, se utilizan las técnicas de levantamiento como escáneres láser o fotogrametría para proporcionar una nube de puntos que demuestre espacialmente las partes visibles de las superficies (internas y externas) del edificio.

Específicamente, el proceso de trabajar con un escáner láser se divide en tres etapas principales. Primero, se identifica el procedimiento óptimo y eficiente de reconocimiento del sitio de escaneado. Este proceso concibe el plan de trabajo general (figura 10A); donde las ubicaciones y disposiciones del escáner se seleccionan y definen. Se requiere una planificación óptima para permitir la captura de datos dentro de un marco temporal razonable. A continuación, se lleva a cabo el trabajo de campo, es decir, la recopilación de datos de escáner y/o topográficos (figura 10B) y (figura 10C). Finalmente,

---

<sup>38</sup> Cadalso: estructura de madera que adelantan la línea de defensa por delante del adarve, utilizada para el hostigamiento vertical.

<sup>39</sup> Foso: canal natural o artificial que rodea la fortaleza y sirve como defensa de esta.

<sup>40</sup> Garita: recinto cilíndrico de escasa dimensión que sobresale del muro, utilizado para la vigilancia.

<sup>41</sup> Matacanes: Parapeto en voladizo generalmente situado sobre el acceso, Se utilizaba como recinto defensivo.

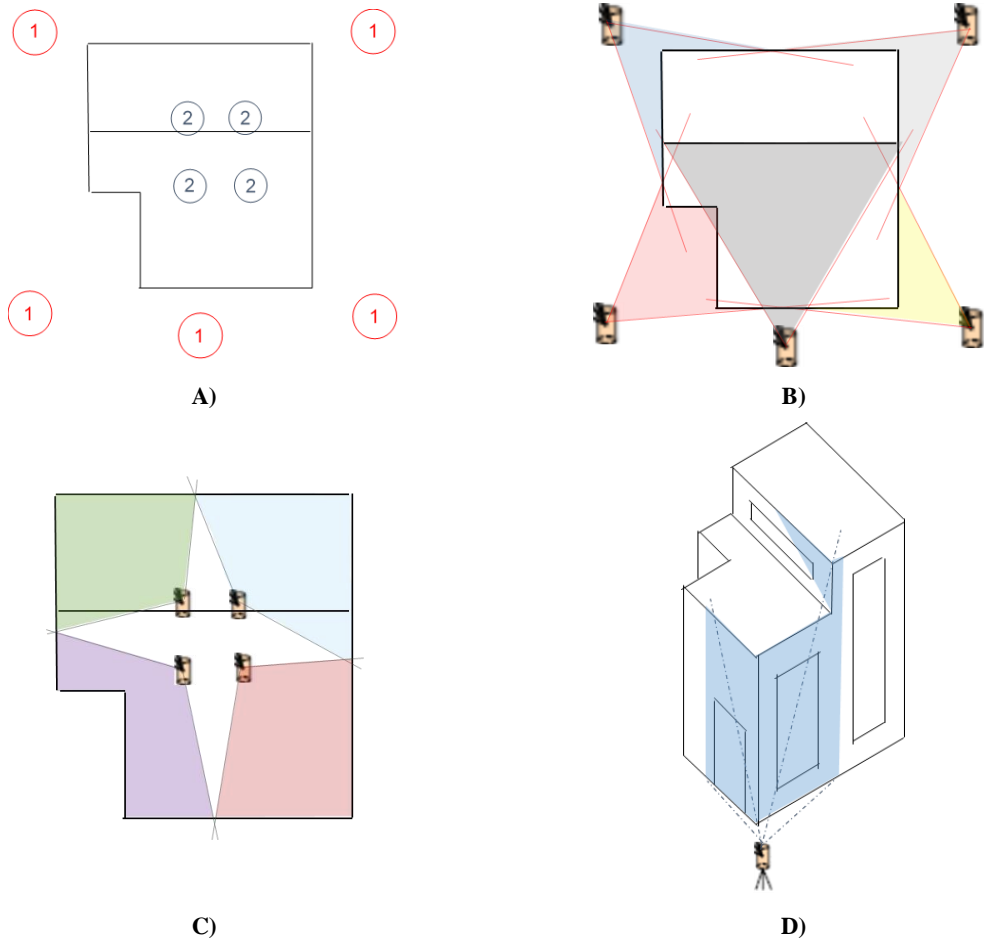
<sup>42</sup> Saetera: pequeñas aberturas realizadas en los muros o almenas, a través de las cuales se puede disparar con arco o ballesta.

<sup>43</sup> Torre cubo: torre de sección circular que reforzaba la defensa de la fortificación.

<sup>44</sup> Patio de armas: espacio despejado de una fortaleza, donde generalmente concentraban los soldados.



el escáner se coloca en las ubicaciones definidas, de acuerdo con el plan, para evitar áreas ocultas o sombras en las nubes de puntos (figura 10D), y luego se recopilan los datos.



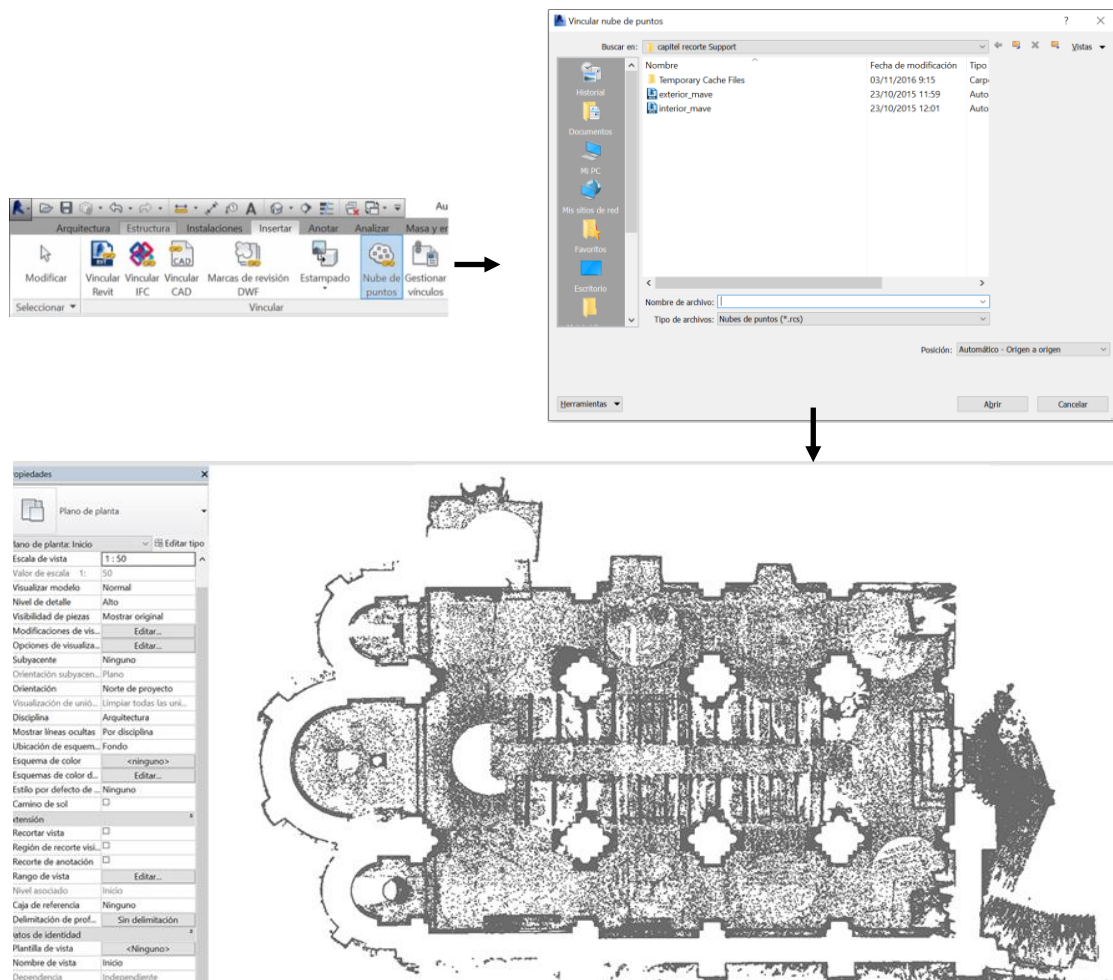
**Figura 10:** A) Plan de trabajo de escaneo general. B) y C) Posicionamiento del escáner. D) Simulación de áreas ocultas.

Como observamos, la compresión y registro geométrico/semántico del patrimonio no es una tarea sencilla, requiere de los medios tecnológicos adecuados para transmitir la información adquirida. Lo cual lleva aparejado la investigación, estudio y análisis como elemento básico a tener en cuenta. Además, se considera que solo a través del conocimiento de la evidencia arquitectónica patrimonial, es posible lograr el modelado paramétrico 3D detallado y objetivo de un elemento o monumento histórico.

### 4.3. Segunda etapa: análisis, organización y procesamiento de datos

En esta etapa, los datos adquiridos anteriormente se analizan, organizan y procesan, con el fin de ser utilizados como guías para crear modelos paramétricos 3D con las plataformas BIM.

En particular, los datos extraídos con las diferentes capturas constituyen nubes de puntos parciales que deben ser adecuadamente preprocesadas, alineadas y fusionadas (tal como se ha descrito en el capítulo 2) para dar lugar a una nube global que refleje las dimensiones y proporciones del sitio, fije numéricamente las coordenadas y dé a conocer la posición del monumento en el espacio y su relación con el entorno. Tal y como se muestra en la figura 11, la nube de puntos resultante se indexará en el entorno BIM para facilitar el modelado 3D.



**Figura 11:** Inserción de la nube de puntos procesada a la plataforma BIM (Autodesk Revit®).

Además, en este segundo capítulo se analiza y organiza toda la información semántica y tipológica obtenida del análisis del edificio, de los manuscritos y documentos históricos, de las imágenes y de los métodos constructivos tradicionales. El conjunto completo de datos se compara con los detalles constructivos técnicos e históricos de los diferentes períodos arquitectónicos, con el fin de complementar los registros específicos de la nube de puntos procesada. Los datos obtenidos pueden

integrarse en la representación de objetos tridimensionales directamente con la plataforma BIM. Esta retroalimentación entre los datos semánticos y espaciales permite reducir la complejidad del proceso de modelado requerido por la biblioteca HBIM.

#### **4.4. Tercera etapa: modelado de los componentes arquitectónicos**

Finalmente, con los datos adquiridos ya procesados y almacenados en el entorno BIM se aborda la tercera etapa de la metodología propuesta. Esta etapa conduce a una solución adecuada para el modelado preciso y eficiente de los diferentes componentes arquitectónicos. Los componentes resultantes son almacenados como objetos paramétricos en una biblioteca HBIM y representan el modelo 3D del edificio analizado.

Además, hay que tener en cuenta que, generalmente, los edificios o monumentos analizados a menudo sufren diferentes patologías o deformaciones derivadas del paso del tiempo, problemas naturales o problemas estructurales, como paredes inclinadas, grietas, elementos faltantes, etc. Por lo tanto, la utilización de las nubes de puntos que proporcionan el registro objetivo de algunos aspectos tales como volumen, detalles, texturas, formas, dimensiones y espacios reales de los monumentos a proteger, permiten acelerar el modelado preciso de cada componente.

El primer paso para abordar el modelado preciso de los objetos arquitectónicos implica la clasificación de los elementos en superficies regulares e irregulares. El criterio de clasificación viene dado por la complejidad de la forma, evaluada según la cantidad y el tipo de detalles. Por un lado, elementos tales como capiteles, arquivoltas, cornisas, adornos, etc., que tienen muchos detalles, se supondrán como superficies irregulares u orgánicas (figura 12A). Por otro lado, se estima que elementos tan simples o uniformes como columnas, muros de bloques de sillería (sin deformaciones), ventanas y puertas son superficies regulares (figura 12B).



Arquivolta (Iglesia Santa María la real de Mave)



Capitel (Iglesia Santa María la real de Mave)



Muro (Castillo de Torrelobatón)

A)

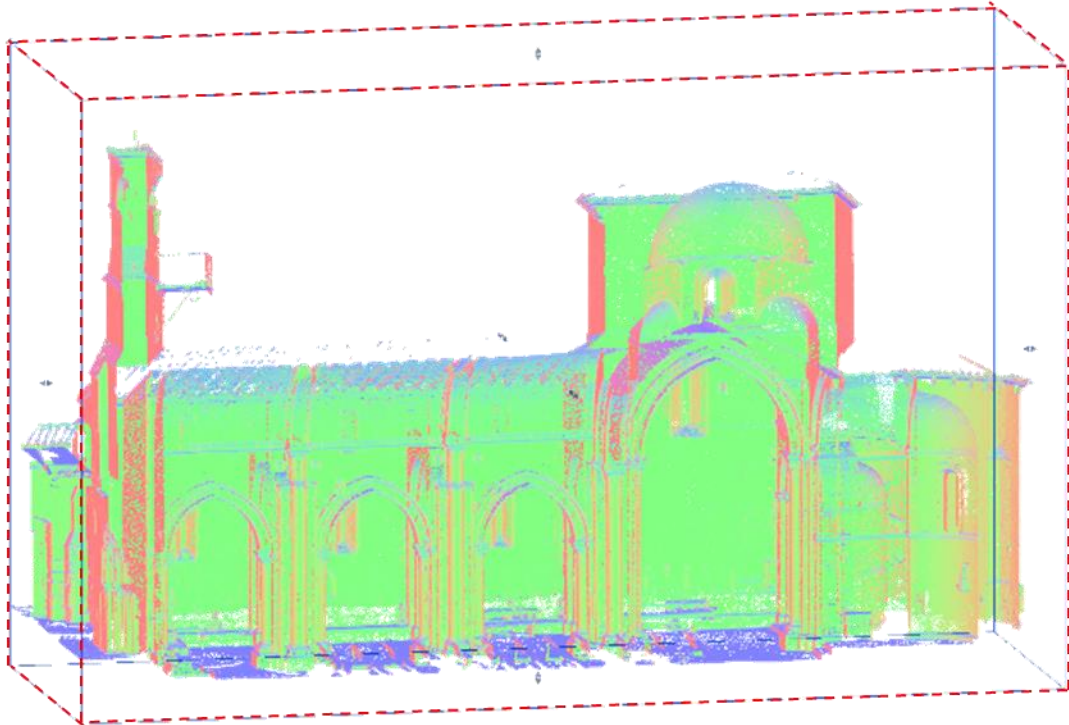
B)

**Figura 12:** A) Formas irregulares. B) Formas regulares.

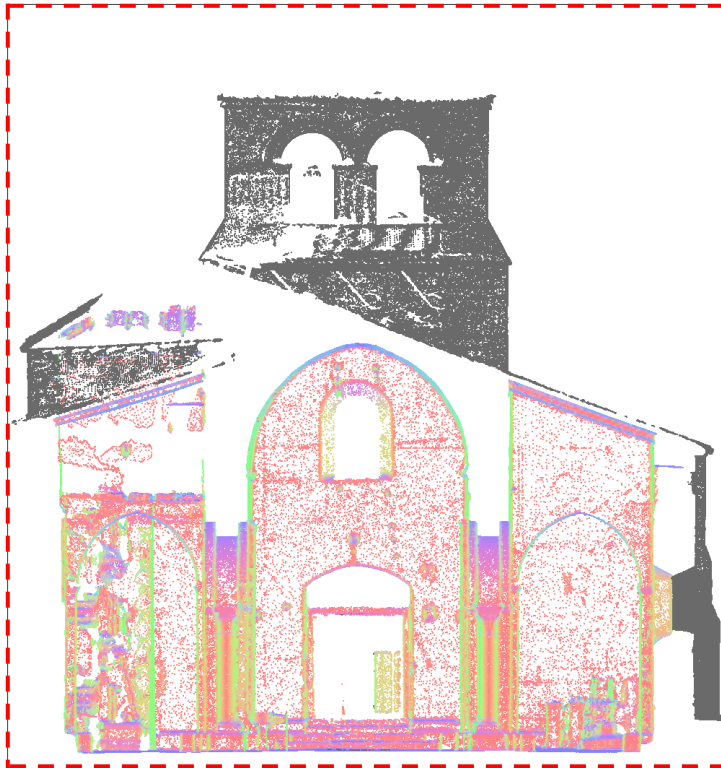
**Fuente:** Arquivolta: <http://dentrodemochila.blogspot.com.es/2015/03/>. Capitel: <http://www.arquivoltas.com/8-palencia/Mave%20G05.jpg>. Muro: [https://i0.wp.com/castillosdelolvido.com/wp-content/uploads/2015/09/Castillo-de-Torrelobato%CC%81n\\_3156.jpg](https://i0.wp.com/castillosdelolvido.com/wp-content/uploads/2015/09/Castillo-de-Torrelobato%CC%81n_3156.jpg).

Gracias a la información geométrica que representan las nubes de puntos y al conocimiento de las reglas, patrones y proporciones constructivas del período arquitectónico al que pertenecen el o los edificios (románico y tardo gótico español, en nuestro caso), se crea un diseño de múltiples vistas, cortes, secciones y rejillas hechas sobre la nube de puntos. La información obtenida de estas acciones se utiliza como guía para comenzar el proceso de modelado digital de los componentes arquitectónicos pertenecientes al monumento escaneado.

En un principio, la nube de puntos que representa el monumento está inscrita automáticamente en una caja de sección (figura 13A), es decir, en una herramienta conceptual que delimita el modelo 3D utilizado para llevar a cabo los diferentes cortes. Para ser precisos, los cortes se realizan en la nube de puntos en direcciones longitudinales y transversales, siguiendo el concepto divisivo del período arquitectónico estudiado. Estos cortes son la cabeza, el cuerpo y el pie de los monumentos eclesiásticos y fortificaciones, y sirven para facilitar la interpretación de la composición y el diseño interno del edificio, así como para generar una estimación de las dimensiones de los diversos elementos y superficies (figura 13B).



A)



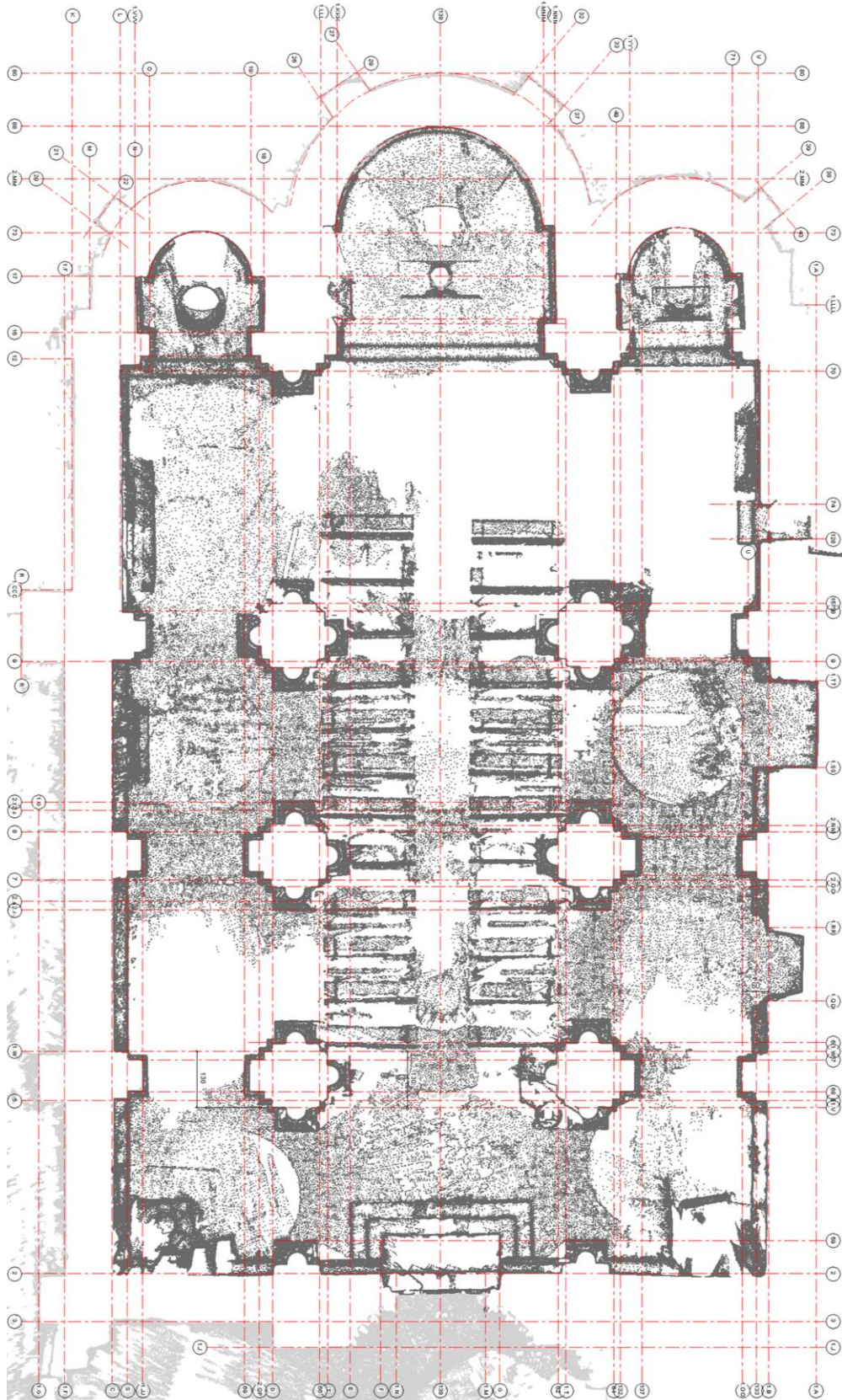
B)

**Figura 13:** A) Sección longitudinal de la nube de puntos. El recuadro de sección se resalta con una línea discontinua roja. B) Sección transversal de la portada (Pie) de la iglesia analizada.

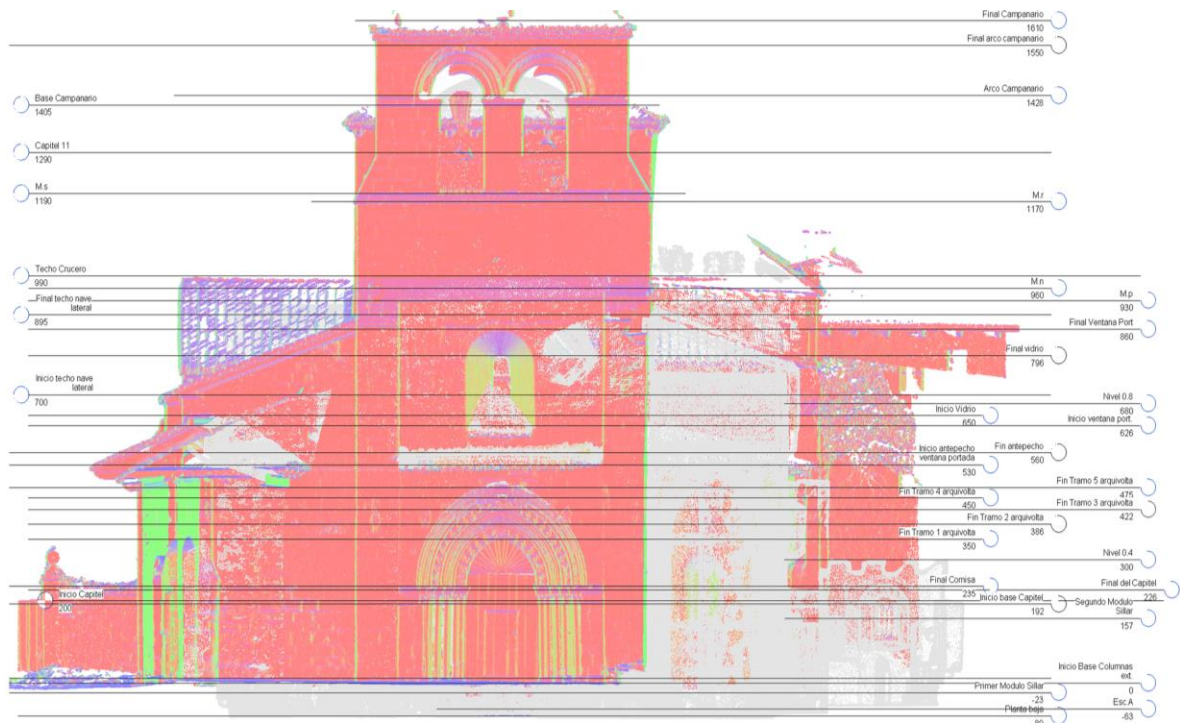
Posteriormente, se crea un conjunto de rejillas en la planimetría (figura 14). Estas rejillas son superficies finitas vistas como líneas rectas, arcos o multisegmentos en un nivel dado. Estas rejillas, que cruzan a través del punto medio del borde de la región, se utilizan para delimitar el contorno de las superficies de la nube. Además, cada línea sirve como referencia para extraer las distancias existentes entre cada geometría representada (delimitada).

Las vistas resultantes de las nubes de puntos, que las plataformas BIM normalmente dividen en Norte, Sur, Este y Oeste, se utilizan como perfil para definir el uso de niveles a diferentes alturas del modelo (figura 15A). Estos niveles son planos horizontales finitos que pueden actuar como referencia de modelado para determinar las distancias verticales entre un punto de inicio y otro de terminación.

Siguiendo la lógica constructiva de los períodos arquitectónicos antes mencionados, y de acuerdo con (Schueremans et al., 2007; Muñoz & Poza, 2011), generalmente los niveles se trazan sobre la base de los materiales que se utilizaron para la construcción. En nuestros casos de estudio, la piedra de sillar representada como bloques paralelepípedos representa al material de construcción. Según los autores de (García Ortega & Ruíz de la Rosa, 2009; 2010), los tamaños aproximados de las piedras de sillar utilizadas en España durante los siglos X y XV, derivan del submúltiplo de las varas españolas (76,8 cm – 155,9 cm) y de los codos *rassai* (58,93 cm), dando como resultado aproximado, medidas que pueden variar de 60 a 120 cm de largo (soga), de 30 a 60 cm de alto y de 20 a 35 cm de espesor (tizón) (figura 15B). Además, gracias al uso de los niveles se obtienen automáticamente planos de planta bidimensionales donde las estructuras verticales (paredes, columnas u otros elementos) aparecen claramente como vacíos en la nube de puntos. Por lo tanto, las rejillas previamente creadas (o nuevas) sirven para delimitar con claridad el perfil interno y externo de dicha nube.



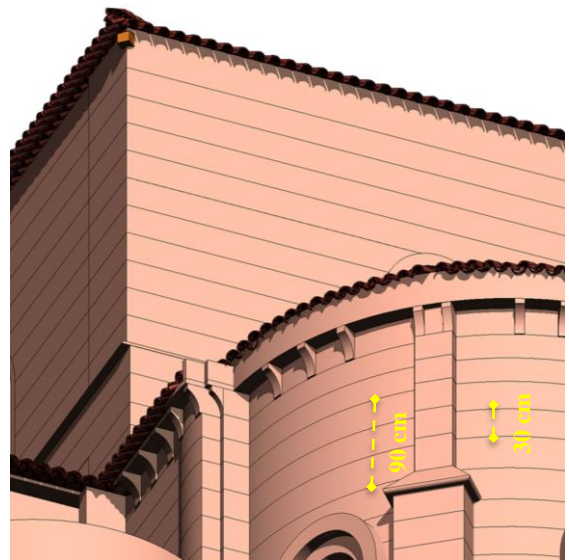
**Figura 14:** Conjunto de rejillas creadas sobre la planimetría de la nube de puntos.



A)



Imagen real de la Iglesia Santa María la real de Mave



Modelo virtual de la Iglesia Santa María la real de Mave

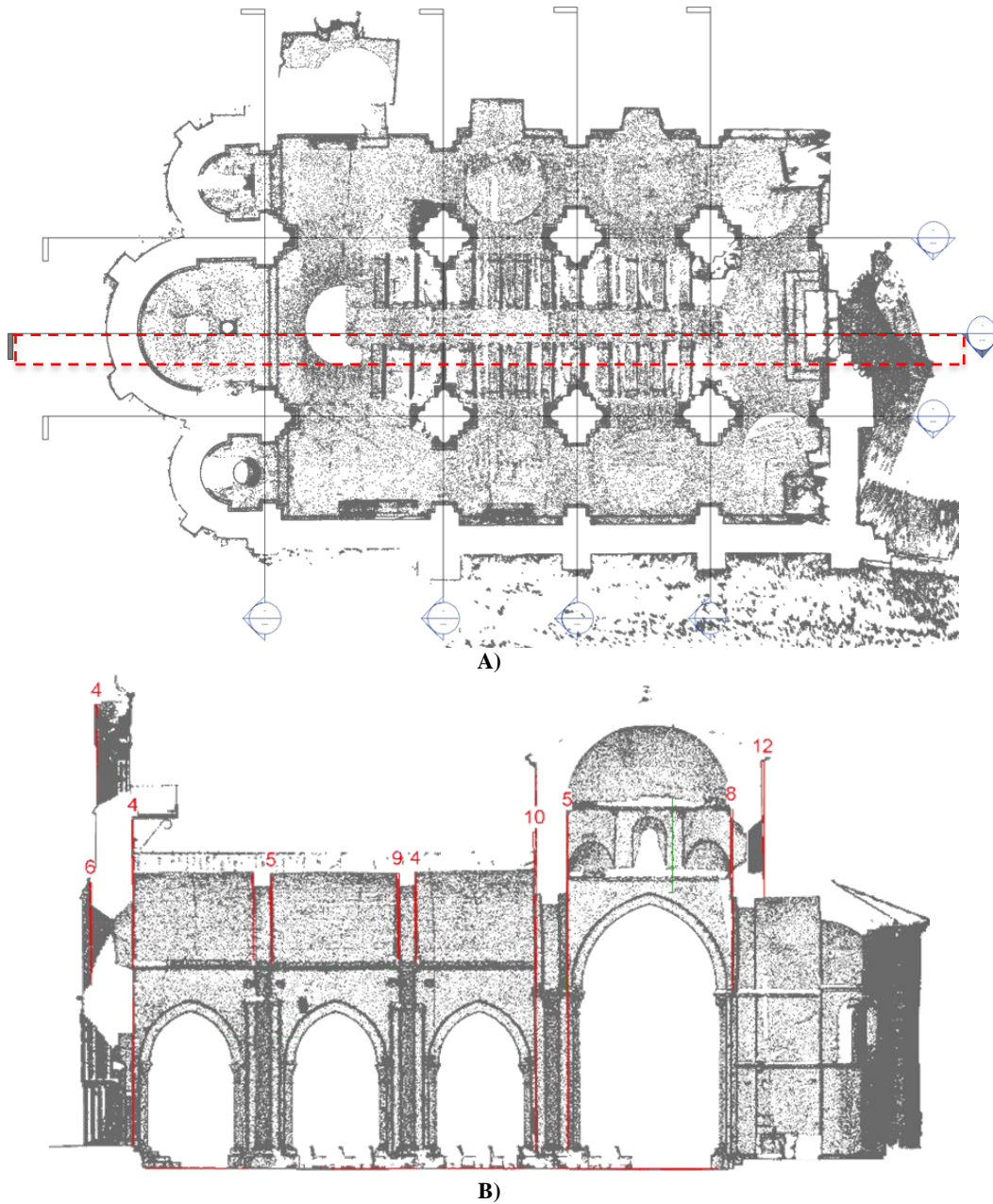
B)

**Figura 15:** A) Vista Este de la nube de puntos con los niveles como límites de referencia. B) Tamaño de piedra aproximado.

Una vez que se han completado dichas acciones, los planos de sección se trazan manualmente en la planta principal proporcionada por la nube de puntos (figura 16A). Los planos cruzan el centro de los elementos estructurales o de soporte que componen al edificio (muros, pilares, columnas, arcos y



bóvedas en el caso de la lógica constructiva de los monumentos analizados). Esta estrategia permite que las variaciones de la superficie, las deformaciones que afectan a los elementos o los perfiles morfológicos se reflejen de forma precisa y clara (figura 16B). Luego, en cada plano de sección obtenido automáticamente se trazan las rejillas verticales, con el fin de realizar la misma función descrita anteriormente. También se pueden usar nuevos niveles en alturas adicionales, si es necesario, para verificar cada componente con mayor precisión.

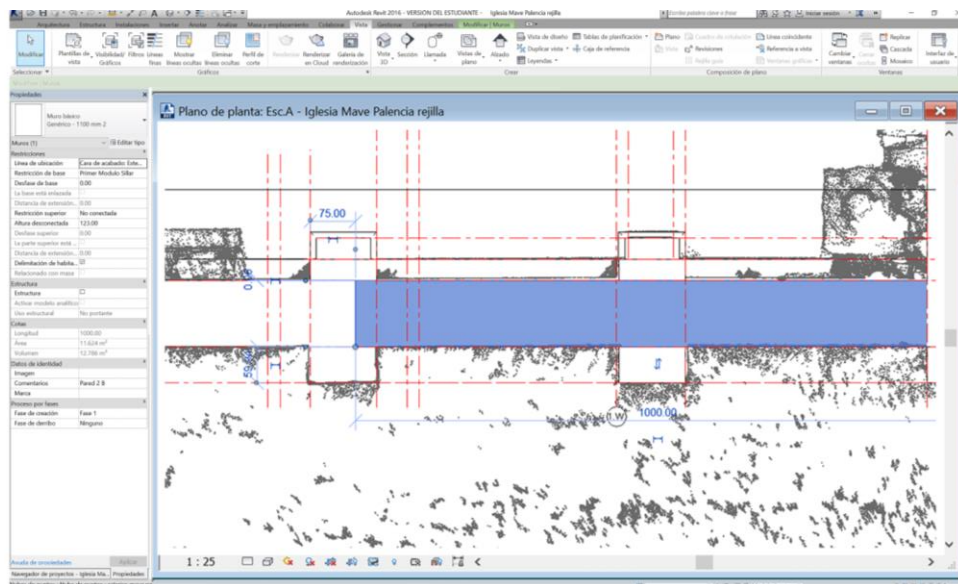


**Figura 16:** A) Planos de sección trazados sobre la planta principal proporcionada por la nube de puntos. B) Sección longitudinal con las inclinaciones de las paredes marcadas en rojo. La inclinación es inferior al 1% en todos los casos, por lo tanto, no hay peligro de colapso.

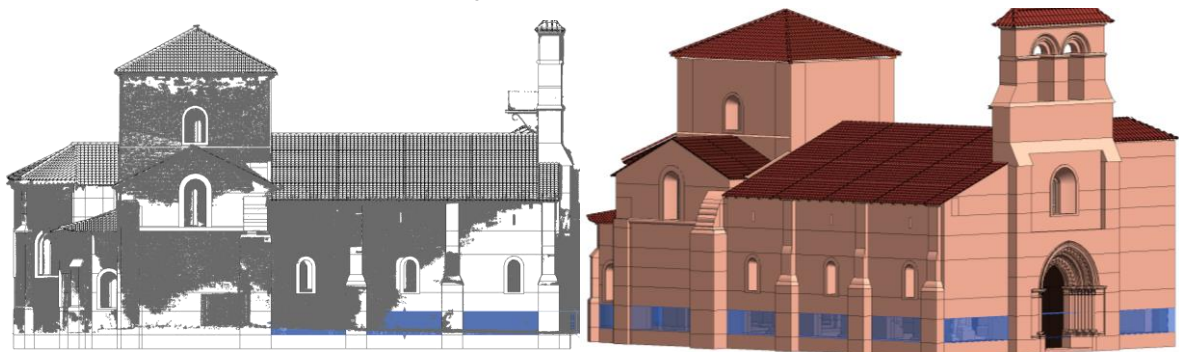
Después de completar este procedimiento, gracias a los niveles, las dimensiones y las rejillas, la nube de puntos se encuentra representada por polígonos cerrados, lo que permite que la nube se utilice como guía para modelar los diferentes componentes arquitectónicos.

#### 4.4.1. Superficies regulares

Cuando la geometría de una superficie determinada es uniforme y simple de acuerdo con su apariencia en vista, sección o elevación, el modelado se realiza utilizando las herramientas básicas del entorno BIM, así como los elementos paramétricos que son parte de su biblioteca estándar. Cada elemento paramétrico perteneciente a dicha biblioteca BIM (paredes, ventanas, puertas, columnas, etc.) se puede seleccionar, trazar y agregar fácilmente al proyecto siguiendo las líneas de las rejillas, los niveles y las secciones de la nube de puntos (figura 17).



Muro Norte de la Iglesia Santa María la Real de Mave (Planta)

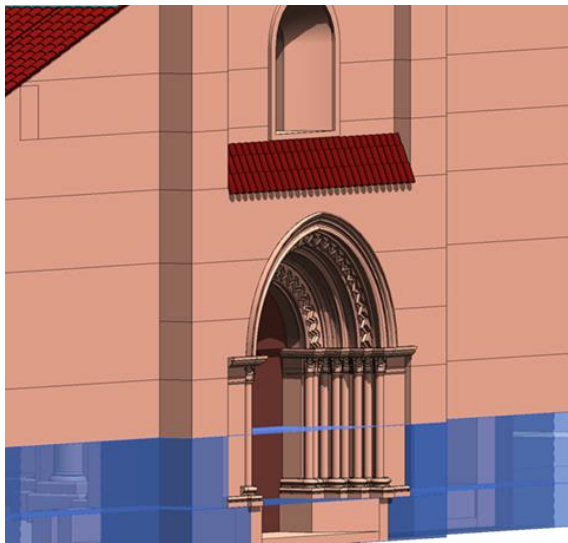


Vista

Modelo 3D

**Figura 17:** Proyección y elevación del muro Norte, siguiendo el límite de las rejillas y niveles.

En este contexto, cabe mencionar que los elementos contienen una lista de parámetros modificables, (figura 18) que se pueden configurar para controlar los atributos espaciales y no espaciales, como las dimensiones, ángulos, números, materiales, texturas, patrones de relleno, etiquetas, textos históricos, etc. Esto significa, que la forma y posición de los elementos se puede modificar, ajustar y personalizar interactivamente para refinar con precisión los objetos actuales, y que de este modo logren coincidir con los datos de la nube de puntos.



Propiedades

Muro básico  
Genérico - 1100 mm 2

Muros (1) Editar tipo

Restricciones

Línea de ubicación	Cara de acabado: Exterior
Restricción de base	Inicio
Desfase de base	197.00
La base está enlazada	<input type="checkbox"/>
Distancia de extensión de base	0.00
Restricción superior	No conectada
Altura desconectada	100.00
Desfase superior	0.00
La parte superior está enlazada	<input type="checkbox"/>
Distancia de extensión superior	0.00
Delimitación de habitación	<input checked="" type="checkbox"/>
Relacionado con masa	<input type="checkbox"/>

Muro de portal principal

Propiedades

Propiedades de tipo

Familia: Familia de sistema: Muro básico Cargar...

Tipo: Genérico - 1100 mm 2 Duplicar... Cambiar nombre...

Parámetros de tipo

Parámetro	Valor
<b>Construcción</b>	
Estructura	Editar...
Envoltente en inserciones	Sin envoltente
Envoltente en extremos	Ninguno
Anchura	110.00
Función	Exterior
<b>Gráficos</b>	
Patrón de relleno de detalle bajo	
Color de relleno de detalle bajo	RGB 239-169-146
<b>Materiales y acabados</b>	
Material estructural	Piedra Arenisca Roja
<b>Propiedades analíticas</b>	
Coefficiente de transferencia de calor (U)	2.7273 W/(m <sup>2</sup> ·K)
Resistencia térmica (R)	0.3667 (m <sup>2</sup> ·K)/W
Masa térmica	220.55 kJ/K
Absortancia	0.700000
Aspereza	3
<b>Datos de identidad</b>	
Imagen de tipo	monasteriodemave.jpg

Editar montaje

Familia: Muro básico

Tipo: Genérico - 1100 mm 2

Grosor total: 110.00 Altura de muestra: 600.00 cm

Resistencia (R): 0.3667 (m<sup>2</sup>·K)/W

Masa térmica: 220.55 kJ/K

Capas

CARA EXTERIOR

	Función	Material	Grosor	Envoltentes	Material estructural
1	Contorno del nú	Capas por encim	0.00		
2	Estructura [1]	Piedra Arenisca	110.00	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
3	Contorno del nú	Capas por debaj	0.00		

Especificaciones de materialidad

Imagen ráster	Nombre	Recuent	Ruta
	monasteriodemave.jpg	1	C:\Users\Facuno José López\Desktop\Mave\monasteriodemave

Parámetros

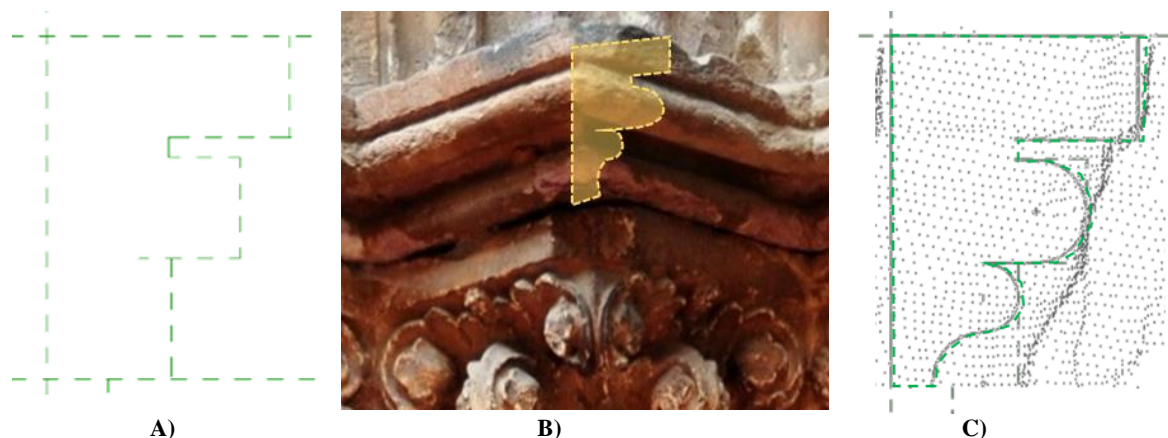
Información Semántica

Figura 18: Modelo paramétrico de una pared asociada a los diferentes elementos de los objetos: las propiedades pueden modificarse al realizar cambios en los valores numéricos del cuadro de diálogo.

#### 4.4.2. Superficies irregulares

Por otro lado, cuando la geometría de una superficie es irregular requiere un desarrollo más complejo basado en otras herramientas relacionadas con el perfilado y modelado tridimensional de los objetos.

En primer lugar, el modelado de superficies irregulares comienza con el boceto de planos de referencia verticales y horizontales en un plano de trabajo 2D (figura 19A). Estos planos de referencia son líneas utilizadas para definir y restringir los puntos donde se construirá el perfil geométrico de los componentes arquitectónicos. Con el fin de modelar con precisión cada perfil, se insertan las imágenes (figura 19B) que representan los marcos y las proporciones del elemento actual, y el perímetro de la forma se dibuja en estas imágenes a partir de un contorno de polígono 2D (arcos, círculos, cuadrados, rectángulos, triángulos, etc.) creado con una herramienta de delineación (figura 19C).



**Figura 19:** A) Planos de referencia verticales y horizontales. B) Imagen del perfil dibujado. C) Perfil trazado sobre las nubes de puntos del elemento.

Sobre las líneas del modelo se crean cotas de dimensiones para controlar la ubicación del perfil en el entorno de trabajo. Posteriormente, se crean parámetros y fórmulas modificables que determinan que las dimensiones y proporciones relativas del perfil dibujado tengan sentido. Además, las cotas de dimensión se asignan a los parámetros creados, y de esa forma se logra que el perfil tenga flexibilidad en sus transformaciones (figura 20). De este modo, al configurar el valor de los parámetros, el perfil se modifica y puede ser reutilizado en el desarrollo de otros componentes.



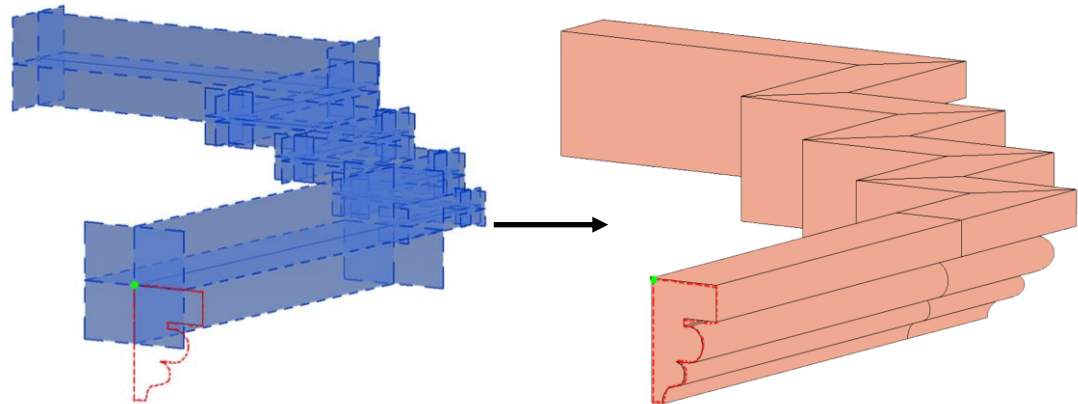
**Figura 20:** Cotas dimensionales creadas para el perfil de la cornisa (izquierda). Parámetros configurables del perfil (derecha).

Posteriormente, ahora en un entorno de trabajo 3D, el uso de las líneas de bocetos es la clave para generar el modelo virtual 3D (figura 21A). Las líneas de boceto son líneas continuas utilizadas para crear el perfil alámbrico de un modelo sólido y también para controlar la geometría de los modelos resultantes. Estas líneas son realmente útiles para dibujar el perfil de cualquier elemento, ya que poseen la cualidad de tener cuatro planos de trabajo que se convierten en el posadero para puntos u otras líneas. Por lo tanto, a lo largo de estas líneas de bocetos se enlazan (asocian) los puntos de referencia, los cuales son responsables de vincular los perfiles 2D, antes modelados, al entorno de trabajo 3D. Tras crear los puntos de referencias, se procede a la carga del perfil 2D en el entorno 3D. Cabe mencionar también que, para asociar este perfil al punto de referencias, previamente se requiere establecer el plano de trabajo del punto seleccionado.

Una vez vinculados los perfiles 2D, se utilizan las herramientas de modelado de geometrías sólidas o vacías para crear el modelo sólido 3D de cada componente diseñado (figura 21B). Al final de esta acción, se crean los parámetros de restricciones, así como aquellos parámetros relativos al tamaño, los materiales, las texturas, las imágenes reales y los datos históricos de cada elemento obtenido (figura 21C).

Los elementos modelados gracias a la metodología diseñada simulan el edificio en 3D. Estos elementos se incorporan al diseño de una biblioteca HBIM. Esta biblioteca se conectará a la base de

datos de cada elemento y se vinculará a la oportunidad de cambiar la forma de los componentes arquitectónicos al hacer modificaciones en sus parámetros, resultando así en una solución 3D recurrente para modelar una amplia gama de edificios con el mismo estilo sin tener que empezar desde cero.



A) B) C)

Tipos de familia

Nombre: Familia Corn.

Parámetro	Valor	Fórmula	Bloquear
<b>Restricciones</b>			
Cornice height	17.00 cm	=Base Diam. * PROYEC.	<input type="checkbox"/>
X1	20.30 cm	=Base Diam. * 20.3	<input type="checkbox"/>
X2	29.19 cm	=Base Diam. * 29.19	<input type="checkbox"/>
X3	26.76 cm	=Base Diam. * 26.76	<input type="checkbox"/>
X4	21.00 cm	=Base Diam. * 21	<input type="checkbox"/>
Y1	69.55 cm	=Base Diam. * 69.55	<input type="checkbox"/>
Y2	20.58 cm	=Base Diam. * 20.58	<input type="checkbox"/>
Y3	25.69 cm	=Base Diam. * 25.69	<input type="checkbox"/>
Y4	27.15 cm	=Base Diam. * 27.15	<input type="checkbox"/>
Y5	33.38 cm	=Base Diam. * 33.38	<input type="checkbox"/>
<b>Materiales y acabados</b>			
Capital cornice Materi	Piedra Arenisca Roja	=	<input type="checkbox"/>
<b>Cotas</b>			
Base Diam.	1.00 cm	=	<input type="checkbox"/>
PROYEC.	17.000000	=	<input type="checkbox"/>
<b>Parámetros IFC</b>			
IFC classification	Iglesia Romanica	=	<input type="checkbox"/>
Historical image	mavecapiteles.jpg	=	<input type="checkbox"/>
Material	Piedra Arenisca Roja	=	<input type="checkbox"/>
<b>General</b>			
Family	Portada	=	<input type="checkbox"/>
Institution	Santa Maria la Real de	=	<input type="checkbox"/>
Country	España	=	<input type="checkbox"/>

Tipos de familia

Nuevo...

Cambiar nombre...

Suprimir

Parámetros

Añadir...

Modificar...

Eliminar

Subir

Bajar

Clasificación

Ascendente

Descendente

Tablas de consulta

Gestionar...

Aceptar Cancelar Aplicar Ayuda

**Figura 21:** A) Línea de referencia diagramada y perfil 2D vinculado. B) Modelo solido 3D generado. C) Parámetros del objeto.

La implementación de esta nueva biblioteca HBIM requiere pensar en el nivel de detalle y

simplificación de los objetos que la componen, para que cada elemento paramétrico sea adecuado para un proyecto de conservación o restauración o pueda ser utilizado como modelo de construcción de información. En este sentido, se aplica el protocolo estandarizado de Nivel de Desarrollo (LOD) descrito en el capítulo 3. Además, el concepto de esta biblioteca se utiliza como complemento de las plataformas BIM existentes dentro de un marco general de *patrimonio inteligente*.

#### 4.5. Conclusiones

En este capítulo se ha llevado a cabo la descripción de la metodología propuesta para convertir la nube de puntos, en un modelo paramétrico 3D propio de las plataformas BIM. Como se explicó en un principio, la metodología de modelado puede dividirse en tres etapas principales: recopilación de datos, procesamiento y modelado.

En primer lugar, el conocimiento, la compresión y el registro geométrico/semántico del patrimonio arquitectónico ayudarán con el proceso de modelado paramétrico 3D, ya que proporcionan la estimación inicial del tamaño y la forma del elemento o monumento histórico a modelar. En segundo lugar, se ejecuta la etapa de preprocesamiento de los datos semánticos y gráficos adquiridos. El tercer paso de la metodología es el proceso de modelado propiamente dicho. Para este paso se ha desarrollado un proceso semiautomático que permite el modelado paramétrico, preciso, detallado y objetivo de cualquier geometría presente en los edificios históricos.

Particularmente la metodología se ha implementado para:

- Generar modelos paramétricos a partir del uso de nubes puntos y características históricas estudiadas.
- Acelerar el modelado paramétrico de las superficies irregulares presentes en el patrimonio arquitectónico
- Crear una biblioteca paramétrica histórica actualizable, que pueda ser utilizada para el intercambio de información entre los distintos interesados en la documentación y gestión del patrimonio cultural.

Cabe remarcar por último que la metodología de modelado semiautomático propuesta es general y puede implementarse en cualquier *software* de modelado BIM que disponga de herramientas estándar de modelado. Los ejemplos mostrados han sido desarrollados utilizando el programa Autodesk Revit® por su eficiencia para modelar nativamente con precisión superficies regulares e irregulares, así como

anomalías geométricas de los diferentes elementos y también por su carácter abierto que permite a los usuarios agregar nuevas funciones o complementos desde la *interfaz de programación de aplicaciones* (API), pero esto no representa ninguna pérdida de generalidad. En el siguiente capítulo se describen dos casos de estudios.



# Capítulo 5

Evaluación del HBIM en casos de estudio

## 5.1. Introducción

En este capítulo se describen dos casos de estudio reales, desarrollados en la presente tesis con el fin de validar la metodología de modelado descrita en el capítulo anterior. El primer caso de estudio presenta el análisis y el modelado de la iglesia Santa María la Real de Mave, un monumento del periodo Románico norte español. El segundo caso de estudio es un proyecto de modelado paramétrico que se aplica al Castillo Torrelobatón, un monumento del periodo tardo gótico del norte español. Para este segundo caso, también se ha propuesto la vinculación de las familias de elementos modelados con la taxonomía Getty (AAT), siempre que sea posible. Además, los elementos modelados en ambos casos de estudio representan el desarrollo de una biblioteca paramétrica de HBIM.

## 5.2. Caso de estudio: Iglesia Santa María la Real de Mave

El edificio seleccionado en este primer caso de estudio es la iglesia Santa María la Real de Mave, un monumento románico del norte de España (figura 22A). Esta iglesia se encuentra dentro del monasterio de Santa María, en el pueblo de Santa María de Mave (Aguilar de Campoo, Palencia, España) (figura 22B).



A)

B)

**Figura 22:** A) Fachada sur de la iglesia románica Santa María la Real de Mave. B) Emplazamiento del monumento.

Fuente: A) adaptado de <http://www.flickrriver.com/photos/rabiespierre/tags/klaster/>. B) adaptado de <http://www.bing.com/maps/>.

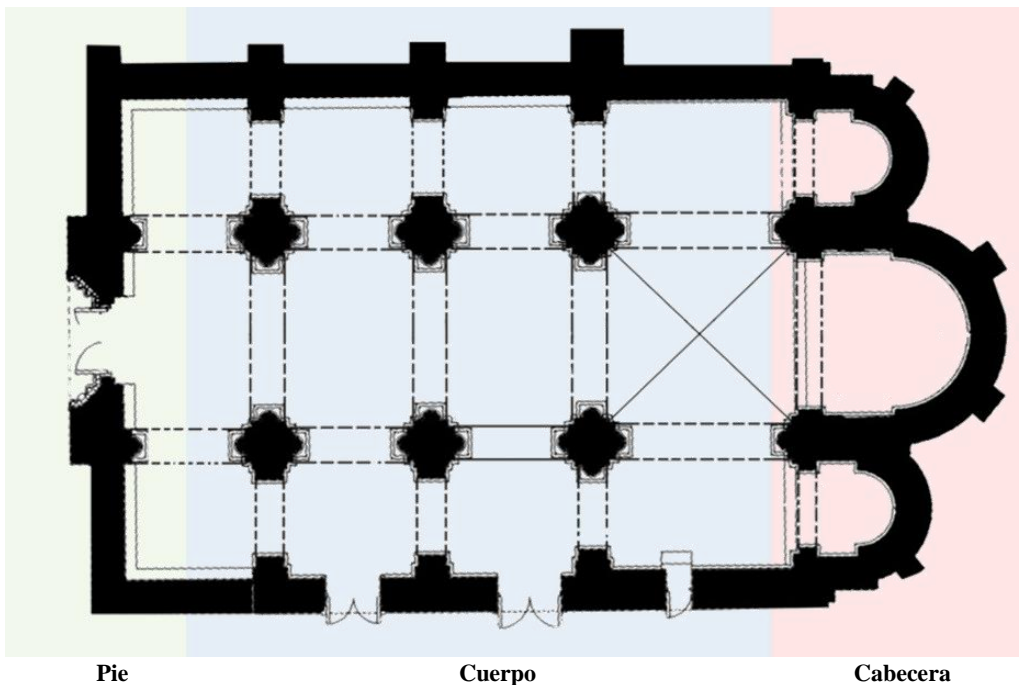
Según los archivos de PARES<sup>45</sup>, este monumento data de finales del siglo XII y principio del siglo

---

<sup>45</sup> Archivo PARES. URL: <http://pares.mcu.es/ParesBusquedas20/catalogo/autoridad/19683>. [En línea] Acceso 22/06/2016.

XIII. Su aspecto actual es la combinación de su historia constructiva y las reformas llevadas a cabo en los siglos XVI y XVII (Arquivoltas, 2015; 2015; Románico norte, 2015). El actual claustro neoclásico fue construido durante este último período. La iglesia tiene una planta de basílica, dividida en tres naves, con tres pasillos articulados coronados por una triple cabecera de ábsides semicirculares. La torre de la linterna está coronada con pechinas y una cúpula poligonal. La planta de la basílica y su distribución se pueden ver en la figura 23. Tres pares de pilares cruciformes con semicolumnas contiguas en cada frente, a excepción de los arcos laterales, delimitan las tres secciones longitudinales de las naves y brazos del crucero. La nave central está cubierta por una bóveda de cañón y está dividida en tres secciones por arcos apuntados.

La obtención de información geométrica sobre las dimensiones, proporciones, forma y estado de la iglesia de Santa María la Real de Mave puede ser un proceso abrumador, debido a la escasez de datos públicos sobre este monumento. Para resolver este problema se ha seguido el flujo de trabajo de la metodología propuesta en el documento actual, combinando nubes de puntos y fuentes históricas.



**Figura 23:** Planta basilical dividida en tres naves. La entrada principal y el campanario se desarrollan en el pie. La sección de las tres naves articuladas y la torre-linterna se desarrollan en el cuerpo. Finalmente, se encuentra un ábside semicircular triple en la cabecera.

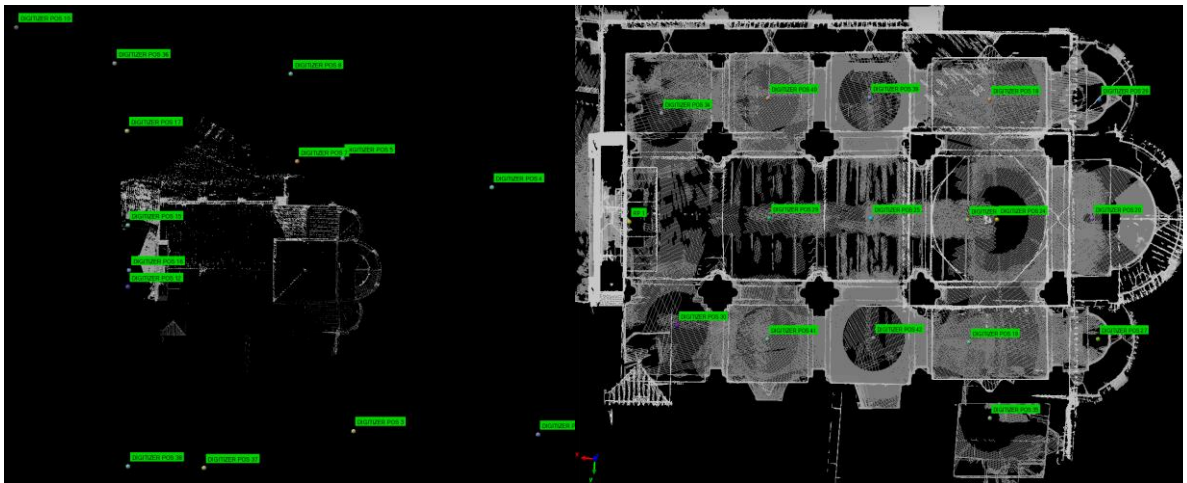
#### 5.2.1. Datos de captura

Los instrumentos utilizados en este caso de estudio han sido un escáner láser "Time-of-flight" (TOF) Leica HDS3000 3D, para el levantamiento gráfico de la iglesia; y una cámara digital Canon PowerShot G6 (7,1 megapíxeles) para representar el color y la apariencia real de la misma. Este

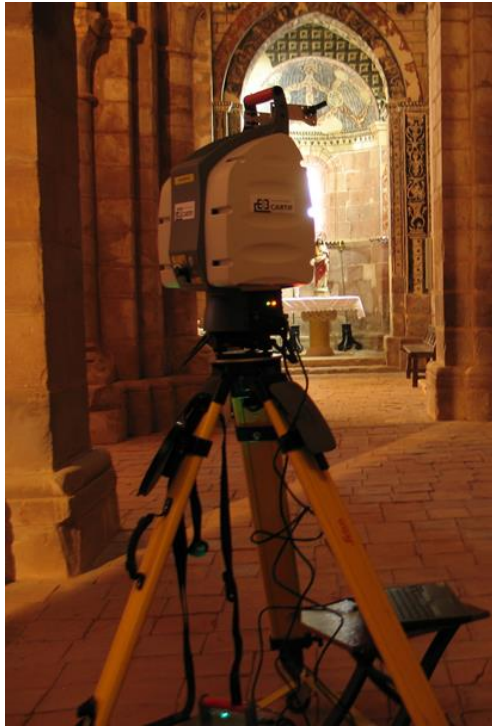
escáner es un dispositivo confiable y sirve perfectamente a nuestro propósito, sin embargo, en la actualidad es posible encontrar modelos que superen ampliamente su velocidad de captura de datos.

En total, se han realizado 31 escaneos capturados desde una distancia promedio de 20 m a una precisión de desviación estándar de  $\pm 4$  mm (figura 24A). Específicamente, se han realizado 18 escaneos desde el interior (figura 24B) (7,5 millones de puntos), uno en cada espacio con el fin de minimizar las oclusiones de muebles y de las columnas centrales; y 13 escaneos desde el exterior (figura 24C) (3,5 millones de puntos) para garantizar resultados de registro precisos. Junto a ello se han recopilado un total de 135 fotografías.

Las nubes de puntos obtenidas se han importado y preprocesado en un *software* de ingeniería inversa (PolyWorks®) antes de ser utilizadas en el programa Autodesk Revit®. Los pasos de preproceso incluyeron el alineamiento y la depuración (limpieza, filtrado, reducción, etc.) de la nube de puntos. El resultado final obtenido ha sido una nube global precisa con un total de más de 11 millones de puntos. La figura 23D muestra partes de la nube de puntos final registrada para la iglesia bajo análisis.



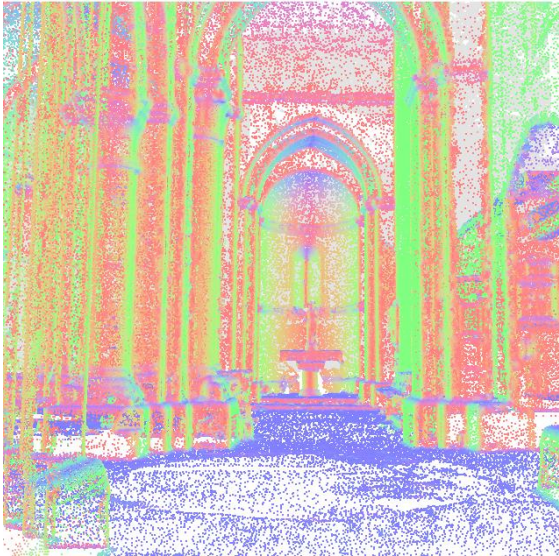
A)



B)



C)



Nave lateral Sur de la Iglesia



Perspectiva de la Iglesia

D)

**Figura 24:** A) Ubicación interna y externa del escáner láser durante el proceso de escaneo. B) Recopilación de datos internos. C) Recopilación de datos externos. D) Nube de puntos resultante.  
Fuente: A y D) Figuras propias. B-C) Adaptado de (Lerones et al.,2014).

### 5.2.2. Modelado geométrico en BIM con el procedimiento desarrollado

Una vez obtenida la nube de puntos final, esta se empleó como guía para el modelado paramétrico de

los elementos arquitectónicos pertenecientes a la iglesia analizada. En este contexto, el programa Autodesk Revit® 2015 ha sido utilizado como herramienta para modelar el edificio en cuestión. Este programa es una plataforma BIM eficiente, adecuada para modelar con precisión superficies regulares e irregulares, así como también las anomalías geométricas de los diferentes elementos. Además, tiene como ventaja la capacidad de acelerar la construcción o los cambios de un proyecto en un entorno 3D con vistas 2D. Por último, también permite generar documentos de construcción vinculados a datos no espaciales, con un alto nivel de calidad y flexibilidad. De hecho, Revit nos brinda todas las herramientas de diseño necesarias para implementar la metodología propuesta en la presente tesis.

La estructura del programa Revit está basada en el concepto de *familias*. Una familia es un grupo de elementos con un conjunto de parámetros comunes y una representación gráfica relacionada. Los diferentes elementos que pertenecen a una familia en particular y tienen variaciones en los valores de algunos o todos sus parámetros, se denominan dentro de la familia como *tipos de familia* o simplemente *tipos*. A su vez, las familias creadas a partir de una *Plantilla de familia*<sup>46</sup> con un conjunto de parámetros similares se incluyen en una entidad de nivel superior llamada "categoría".

Las familias se pueden clasificar de acuerdo con su origen en familias de sistema, familias cargables y familias *in situ*.

Las familias de sistema son elementos predefinidos e internos de cada proyecto (.rte) que se ha seleccionado para iniciar un nuevo proyecto (.rtv) en Revit. Las familias cargables se crean y modifican en archivos externos (.rfa) y se importan o se cargan en los proyectos (.rtv). Las familias *in situ* son elementos únicos que se usan para modelar un elemento particular que no se reutilizará, estos tipos de familias no pueden insertarse en otros proyectos.

El modelo digital de la iglesia se ha construido utilizando dos tipos de familias de Revit, familias de sistemas y familias cargables. La elección del primer tipo de familia se debe a que permite trabajar con componentes nativos ubicados en la biblioteca del programa para modelar superficies con geometrías simples. Por su parte, el segundo tipo de familia ha sido seleccionado porque permite exportar o importar los componentes exclusivos y específicos, modelados o personalizados, en un archivo externo.

---

<sup>46</sup> La plantilla de familia es el sitio donde se seleccionan las familias según su categoría, parámetros, configuración predeterminada, contenido, etc. Además, la plantilla de familias dicta como se utiliza cada familia y como se documenta.

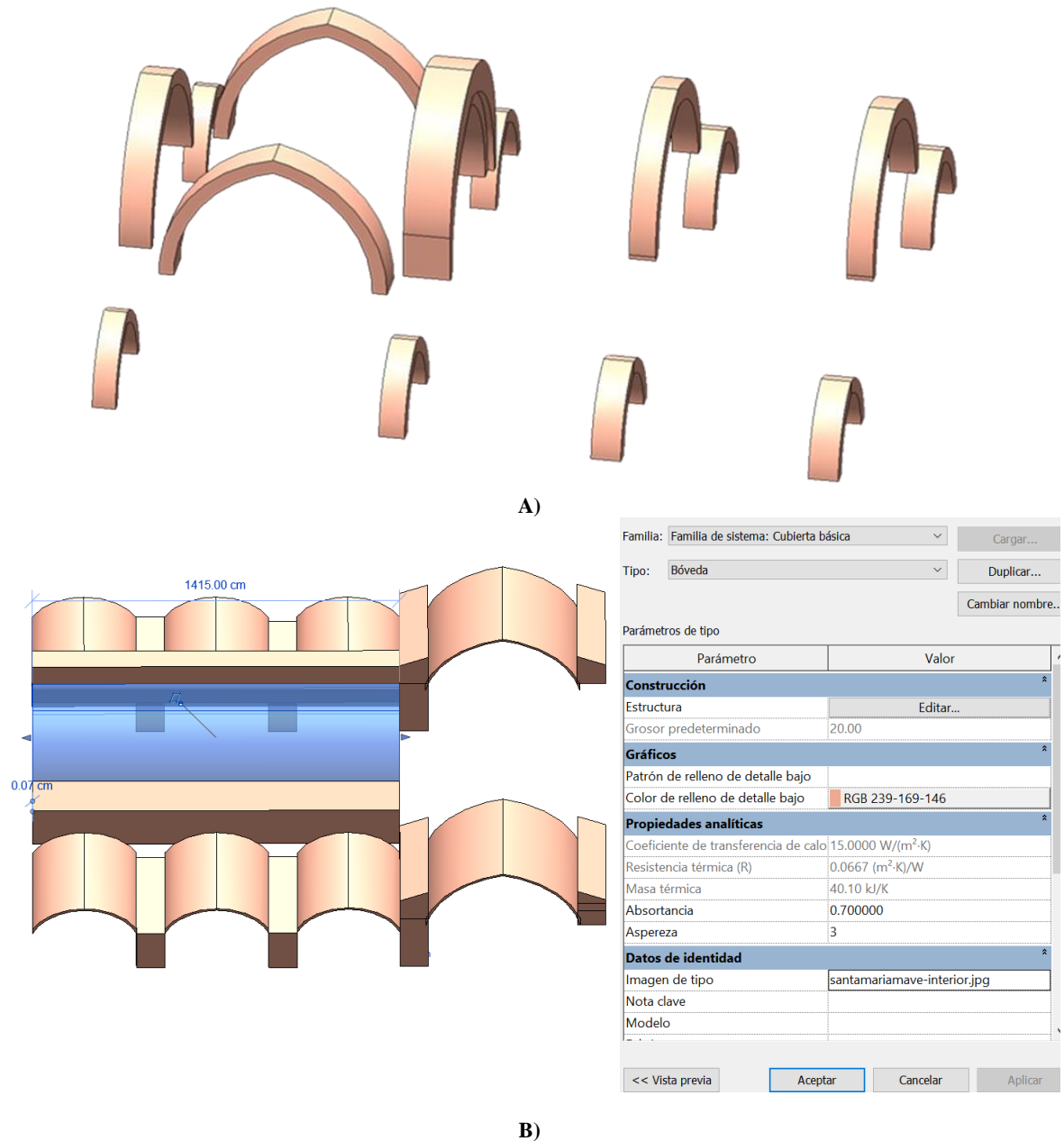
Siguiendo los pasos descritos en la sección 4.4., se han configurado una serie de niveles y secciones sobre la nube de puntos para crear planos de plantas y alzados que demuestren con precisión el perfil geométrico de los elementos. Con los niveles y las secciones ya configuradas, el modelado geométrico puede comenzar.

Se ha supuesto que las paredes son superficies regulares y se han modelado utilizando las herramientas al efecto. Concretamente se ha utilizado una *Familia de Muro*, existente en la biblioteca nativa de Revit, para representar la superficie solicitada. Dentro de la *Familia de Muro* se ha seleccionado el *Tipo Muro Básico*, el cual presenta de manera predeterminada una serie de parámetros estándar (construcción, gráficos, materiales y acabados, propiedades analíticas y datos de identidad). Estos muros se modelan definiendo una ruta dibujada sobre las rejillas de los planos de planta. Dicha ruta puede representar la línea central o una cara de la estructura. Posteriormente, la altura del objeto se combina con los datos de la nube de puntos y con los datos proporcionales del periodo románico. Además de esto, se han realizado varios ajustes y modificaciones sobre los parámetros del *Tipo Muro Básico* para que este pueda adaptarse al muro del proyecto actual.

Los parámetros configurados han sido los siguientes. El parámetro *Construcción*, en el cual se han modificado los valores de grosor y tipo de material para adaptar la superficie modelada a la capa de muro real. El parámetro *Gráficos*, donde se ha modificado el color de relleno de detalle. El parámetro predeterminado *Materiales y Acabados*, el cual se modifica al realizar cambios en la propiedad de Materiales del parámetro *Construcción*. El parámetro *Propiedades analíticas*, donde las propiedades y los coeficientes se cambian automáticamente cuando se realizan cambios en el espesor y el tipo de material. El parámetro *Datos de identidad*, en el cual se han agregado imágenes con vistas reales de la iglesia Santa María la Real de Mave. Un ejemplo representativo se puede ver en la figura 18.

Las bóvedas y los arcos, que son componentes estructurales importantes para la arquitectura de la iglesia, también se han asumido como superficies regulares. Los arcos se han modelado con la misma *Familia de Muro* utilizada para las paredes de la iglesia, pero con la diferencia de que en el parámetro *Construcción* el valor del espesor es menor. El conjunto de arcos se muestra en la figura 25A.

Para el modelado de las bóvedas se ha procedido a crear una *Familia de Cubierta*. Una vez que se selecciona el tipo de cubierta básica, los tipos de parámetros que se modifican son los mismos que los mencionados en *Familia de Muro*. El conjunto de bóvedas y sus parámetros modificados se muestran en la figura 25B. Cabe señalar que las paredes, arcos y bóvedas se han construido como familias del sistema.



**Figura 25:** **A)** Conjunto de arcos. **B)** Conjunto de bóvedas y sus parámetros modificados.

Paralelamente al modelado de los elementos arquitectónicos regulares, se ha desarrollado la rica ornamentación de la arquitectura románica que representa a la Iglesia Santa María la Real de Mave. Los ornamentos de la entrada principal y las columnas cruciformes, consideradas como superficies irregulares, han sido modeladas externamente mediante la creación de familias cargables, gracias al uso de la metodología asistida descrita en el capítulo 4. Los elementos resultantes se ubican dentro de una biblioteca HBIM y pueden reutilizarse (tras editar sus parámetros predeterminados) en futuros

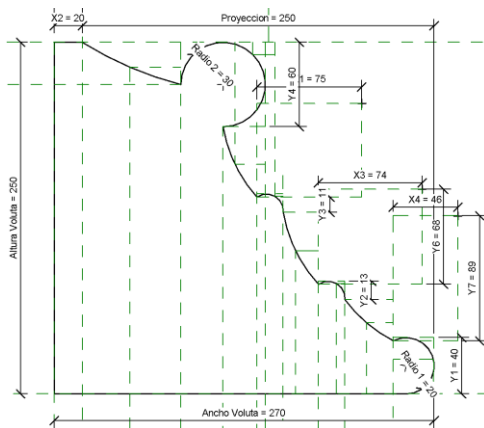


proyectos con una arquitectura similar.

El modelo *Familia de Entrada* se ha creado externamente y forma parte de la categoría *Modelo genérico* del modelo digital. Además, la *Familia de Entrada* contiene varios tipos, como Arquivolta, Base de Capitel, Base Principal, Capitel, Columna Frontal, Cornisa del Capitel Muro de Entrada y Ventana.

La arquivolta que realza el frente principal se ha dividido en un guardapolvo y en varios arcos individuales que se consideran como subtipos del tipo de Arco. La secuencia constructiva de un arco comienza principalmente en la creación de una nueva plantilla familiar llamada *Modelo genérico métrico basado en cara*, que permite trabajar en un plano de trabajo 2D. Tras esto, se esbozan los planos de referencia y en estos planos el perímetro de la forma se dibuja usando las líneas del modelo (figura 26A). Una vez que se diagrama el perfil del objeto, se crea una serie de parámetros para que la geometría de este perfil funcione correctamente en el siguiente paso.

Como se muestra en la figura 26B, los parámetros creados fueron, *Restricciones* donde sus propiedades representan las dimensiones geométricas del perfil diagramado, el parámetro *Cotas* y el *Parámetros IFC* donde el valor de su propiedad Módulo Longitud está a cargo de calcular, controlar, modificar o escalar, a partir de una serie de fórmulas (aritméticas y/ trigonométricas), el valor de las propiedades de los otros parámetros. Las fórmulas aplicadas se pueden observar en la columna *Formula* de la figura 26B.



A)

Parámetro	Valor	Fórmula
<b>Restricciones</b>		
Altura Voluta	250.0	=Módulo Longitud * 250
Ancho Voluta	270.0	=Módulo Longitud * 270
Elevación por defecto	400.0	=
Proyección	250.0	=Módulo Longitud * Proyección Longitud
Radio 1	20.0	=Módulo Longitud * Radio Long. 1
Radio 2	30.0	=Módulo Longitud * Radio Long. 2
X1	74.6	=Módulo Longitud * X1 Long.
Y1	40.0	=Módulo Longitud * Y1 Long.
<b>Cotas</b>		
Diametro base	1.0	=
Proyección Longitud	250.000000	=
Radio Long. 1	20.000000	=
Radio Long. 2	30.000000	=
X1 Long.	74.600000	=
Y1 Long.	40.000000	=
<b>Parámetros IFC</b>		
Módulo	0.500000	=0.5
Módulo Longitud	1.0	=Módulo * 2 mm

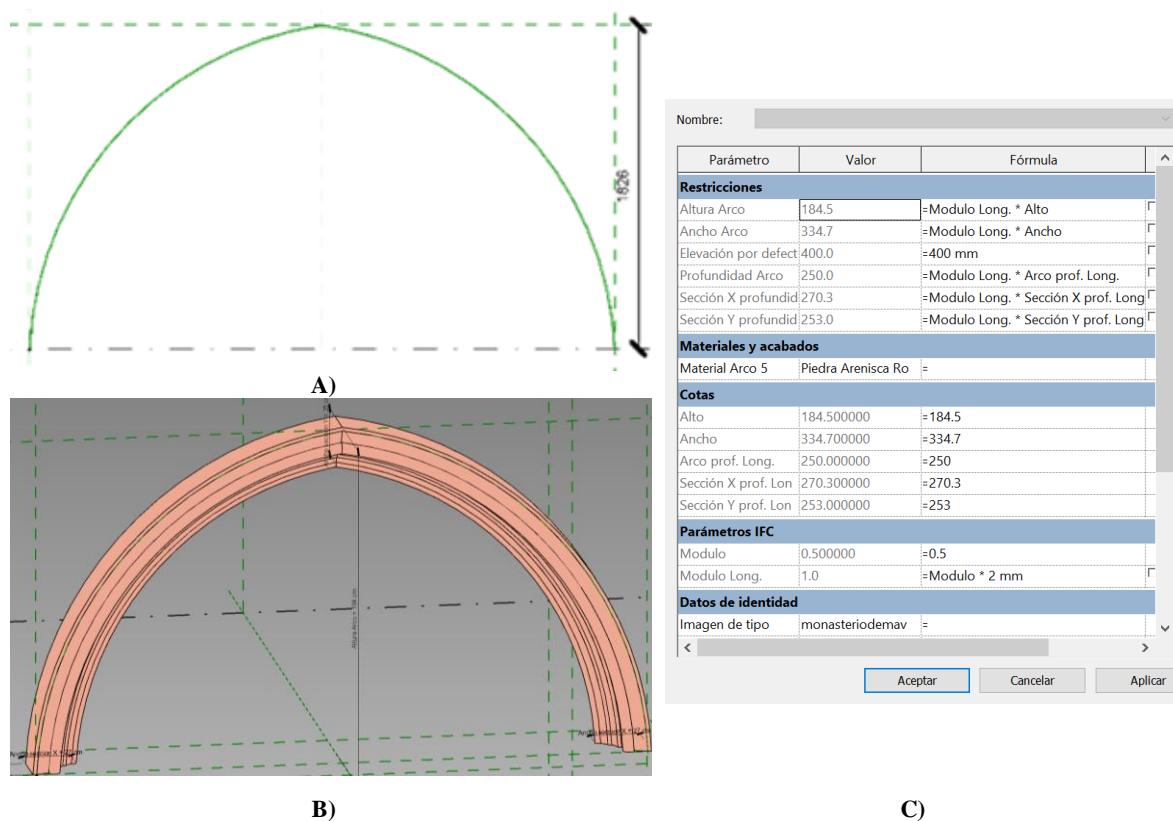
B)

**Figura 26:** A) Planos de referencia y perímetro de la forma (Familia Voluta). B) Parámetros del plano de trabajo 2D.

Posteriormente, en un entorno de trabajo en 3D denominado *Modelo genérico métrico adaptativo*, las líneas de referencia se utilizan para dibujar el perfil del arco (figura 27A). Luego, al final de esta línea

de referencia, se traza el punto de referencia responsable de vincular el perfil 2D con el entorno de trabajo actual. A continuación, se utilizan las herramientas de modelado para crear la geometría sólida de cada elemento diseñado figura 27B.

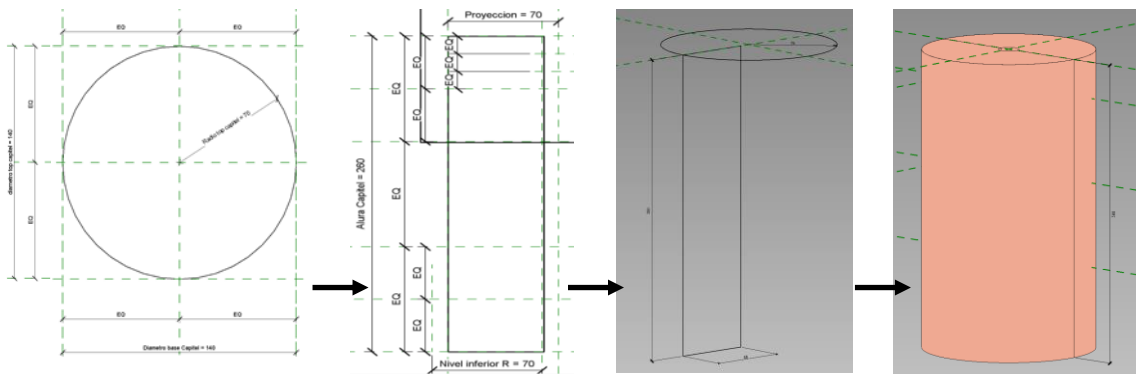
Para cada elemento diseñado se crearon los parámetros *Restricciones*, *Materiales y acabado*, *Cotas*, *Parámetros IFC* y *Datos de identidad*. Las propiedades y el funcionamiento de los parámetros *Restricciones*, *Cotas* y *Parámetros IFC* son similares a los descritos anteriormente. Las diferencias varían en el valor que se otorga a cada propiedad. Otras diferencias se manifiestan en la selección de un material que representa el objeto 3D a partir del uso del parámetro *Materiales y Acabado*, y en la designación de una imagen tipo a partir del uso de *Datos de identidad* (figura 27C). El material creado y seleccionado para el parámetro *Materiales y Acabado* ha sido la piedra arenisca roja. Esta piedra fue utilizada para la construcción de la iglesia analizada. Por otro lado, al parámetro *Datos de identidad* se le ha vinculado una imagen que representa a la arquivolta real.



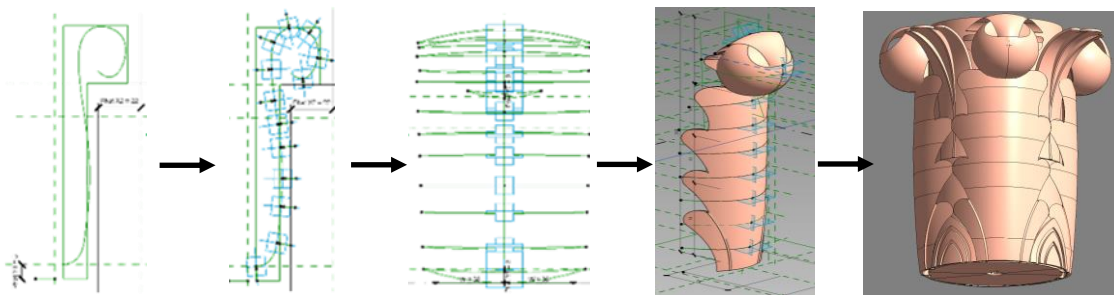
**Figura 27:** A) Línea de referencia. B) Geometría sólida del elemento (Arco 5). C) Parámetros del plano de trabajo 3D (Arco 5).

Los capiteles vegetales de inspiración andresina que coronan las columnas de la portada han sido modelados en tres secciones. Para la primera sección, que se refiere al subtipo *Base de Capitel*, se

probó una solución que implicó el uso de modelos cilíndricos (figura 28). Las otras dos secciones se refieren a los subtipos *hojas* que decoran la base de capital. Las hojas están constituidas por cinco tramos divididos a lo largo de su longitud. Se utilizaron líneas de referencia, bocetos de *spline* y varios puntos de referencia, para dar la forma curva a los diferentes tramos de la hoja y crear la curvatura de la hoja alrededor de la base cilíndrica del capitel. En la figura 29 se observa el proceso de modelado de la hoja en cuestión. Al igual que en el caso del arco, en estos subtipos se han creado una serie de parámetros como *Restricciones*, *Materiales y acabado*, *Cotas*, *Parámetros IFC* y *Datos de identidad*. Para el parámetro *Restricciones* se han creado propiedades con relación a las dimensiones de los componentes (altura, ancho y profundidad), y para el parámetro *Materiales y acabado* se ha seleccionado el material de la hoja modelada (piedra arenisca roja). Finalmente, la hoja resultante se repite tres veces para que coincida con el diámetro del capitel a través de la herramienta *copiar*. La figura 29 también muestra un ejemplo del modelo de capitel final que intenta reflejar las condiciones reales del capitel de la iglesia Santa María la Real de Mave.



**Figura 28:** Secuencia constructiva del cilindro que sirve como centro del Capitel que decora la portada de la Iglesia.



**Figura 29:** Secuencia constructiva de una de las hojas que decoran el capitel y el resultado obtenido.

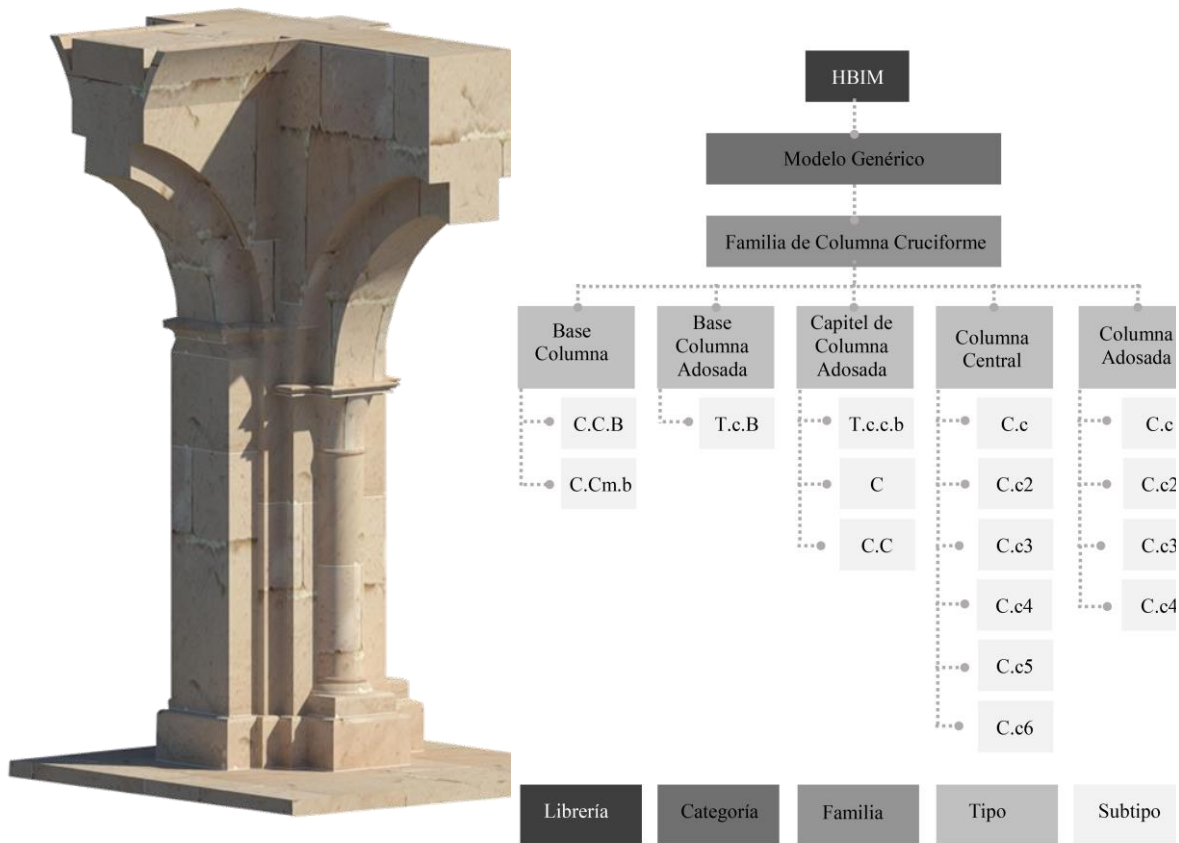
La entrada principal modelada en el proyecto, con todos sus componentes, se puede ver en la figura 30. Cada perfil de componente se ha diseñado de acuerdo con el tamaño y la forma extraídos de la nube de puntos.



**Figura 30:** Resultado final del modelado de *Familia de Entrada*.

Además, la *Familia columnas cruciformes* también se ha modelado externamente y forma parte de la categoría *Modelo genérico*. Los tipos de objetos dentro de esta familia se clasifican en Base de columna, Base de Columna Adosada, Capitel de Columna Adosada, Columna Central y Columna Adosada. El proceso constructivo de cada componente de esta familia es similar al empleado en la *Familia de Entrada*. La figura 31A muestra los componentes combinados de una de las columnas cruciformes creadas para la Iglesia. La clasificación de los tipos y subtipos que conforman a la *Familias columna cruciformes* se muestra en la figura 31B. Una sección longitudinal de la iglesia que muestra las columnas cruciformes se puede ver en figura 31C.

Los elementos paramétricos resultantes del modelado externo de la iglesia Santa María la Real de Mave, ubicados en la biblioteca HBIM, se posicionan asistidamente (como objetos 2D o 3D) en los planos de planta de la nube de puntos. A continuación, se ajusta su posicionamiento en los ejes X, Y, y Z de los planos, secciones y vistas arquitectónicas utilizando los datos segmentados de la nube y la herramienta *Mover*.



A)

B)

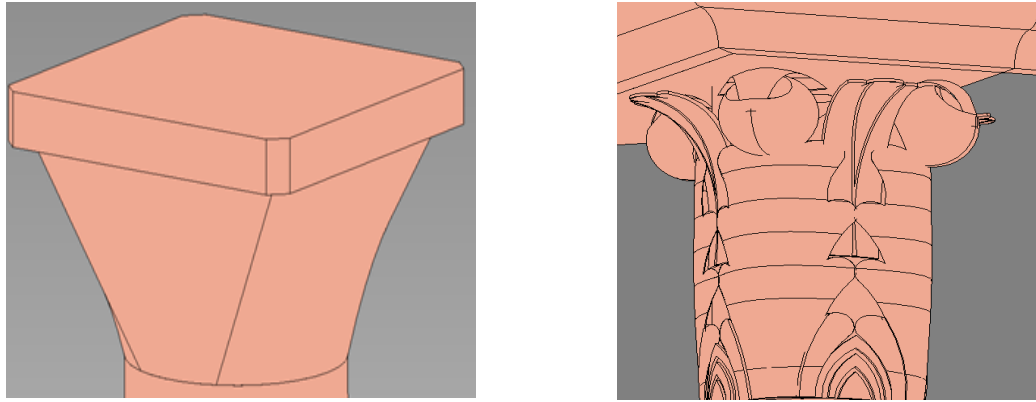


C)

**Figura 31:** A) Columna cruciforme. B) Tipos y subtipos que componen las familias modeladas. C) Sección longitudinal, donde los pilares cruciformes con semicolumnas y la bóveda de cañón son separados por arcos que cubren la nave central.

Por otro lado, de acuerdo con los resultados obtenidos, debe aclararse que el capitel ha sido modelado

específicamente para demostrar dos tipos de (LOD) utilizados en los proyectos de rehabilitación y mantenimiento del patrimonio. Estos (LOD) son: LOD 200 (modelos genéricos) y LOD 350 (planificación ejecutiva). Los niveles se mostrarán en Revit como "Bajo, Medio y Fino". Cada uno de ellos es adecuado para el uso designado, como se puede ver en la figura 32.



Nivel "bajo" = (LOD) 200

Nivel "Fino" = (LOD) 350

**Figura 32:** Ejemplo de los diferentes niveles de desarrollo.

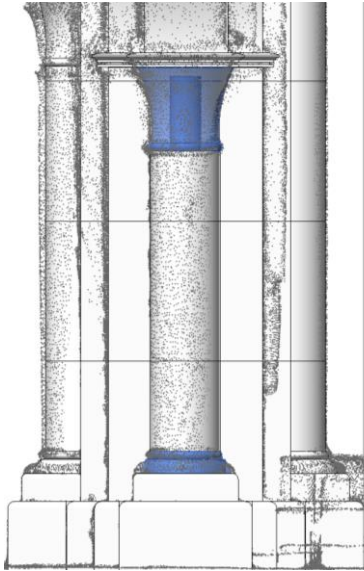
### 5.2.3. Resultado del modelado paramétrico de la Iglesia Santa María la Real de Mave

Los componentes resultantes se utilizan como objetos de comparación con información sobre su tamaño real, derivado de la nube de puntos. Además, estos componentes que representan la composición real de cada elemento modelado forman parte de una biblioteca HBIM. La figura 33 muestra las similitudes entre algunos de los elementos históricos creados y la nube de punto existente. Los componentes de la biblioteca HBIM final pueden ser implementados para la generación automática de documentos técnicos en 2D y 3D, como planos, elevaciones, cortes de sección, detalles y perspectivas.

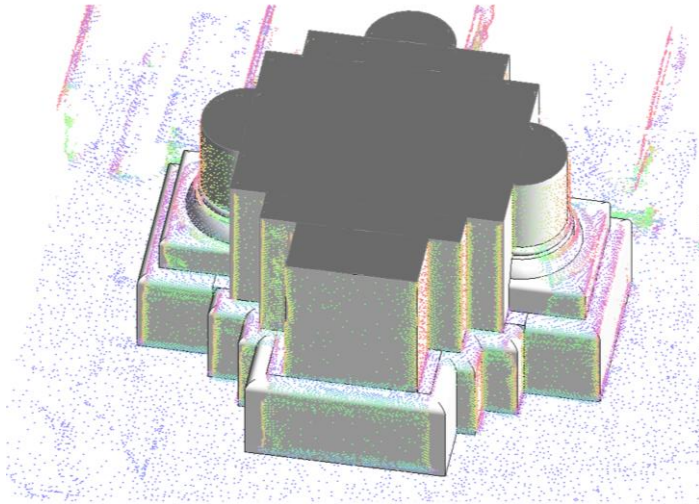
La figura 34A muestra un corte longitudinal realizado automáticamente a partir del modelo 3D final. Desde este corte es posible identificar los diferentes elementos estructurales (muros, columnas, arcos, bóvedas y cúpulas) que componen a la Iglesia en cuestión. La figura 34B muestra un ejemplo de la sección transversal vista desde el ábside central hacia la portada de la iglesia. Esta figura muestra la otra cara de las columnas cruciformes, así como el tamaño del radio de la bóveda de la nave central. Finalmente, la figura 34C muestra a través de un plano de planta, la extensión y la distancia existente entre los elementos estructurales del modelo. Las medidas de las cotas están representadas en centímetros, sin embargo, es importante señalar que originalmente la iglesia fue diseñada y construida a partir del uso de módulos dimensionales compuestos por varas castellanas (0,836 cm). Estos

módulos se representan en la figura 4.

El análisis del modelo 3D creado ha permitido comprobar que la parte estructural de la iglesia se encuentra en óptimas condiciones de conservación.

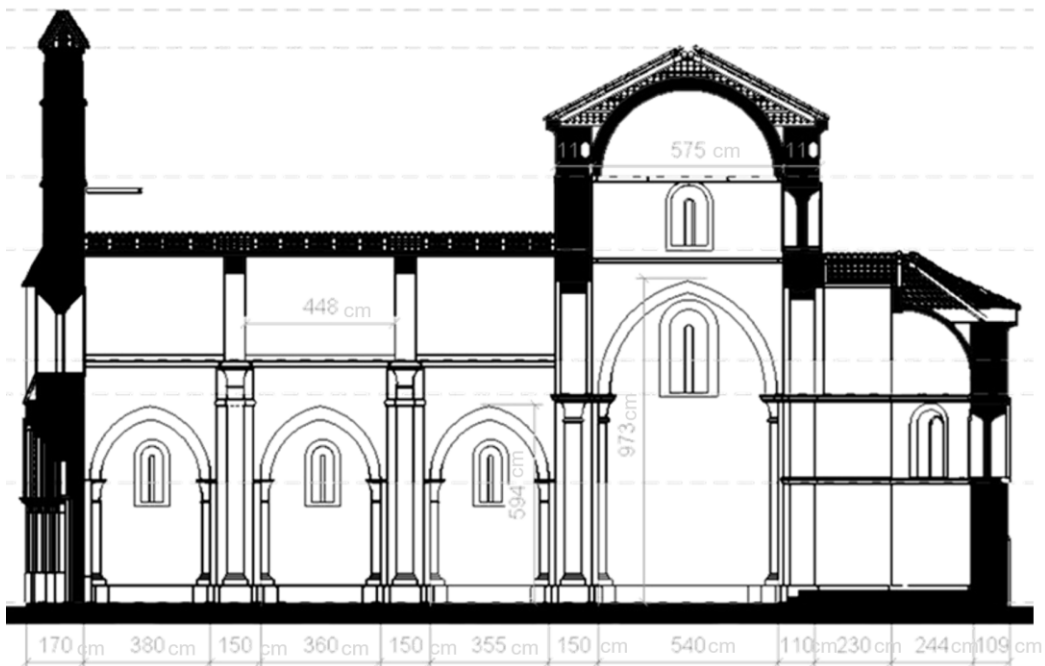


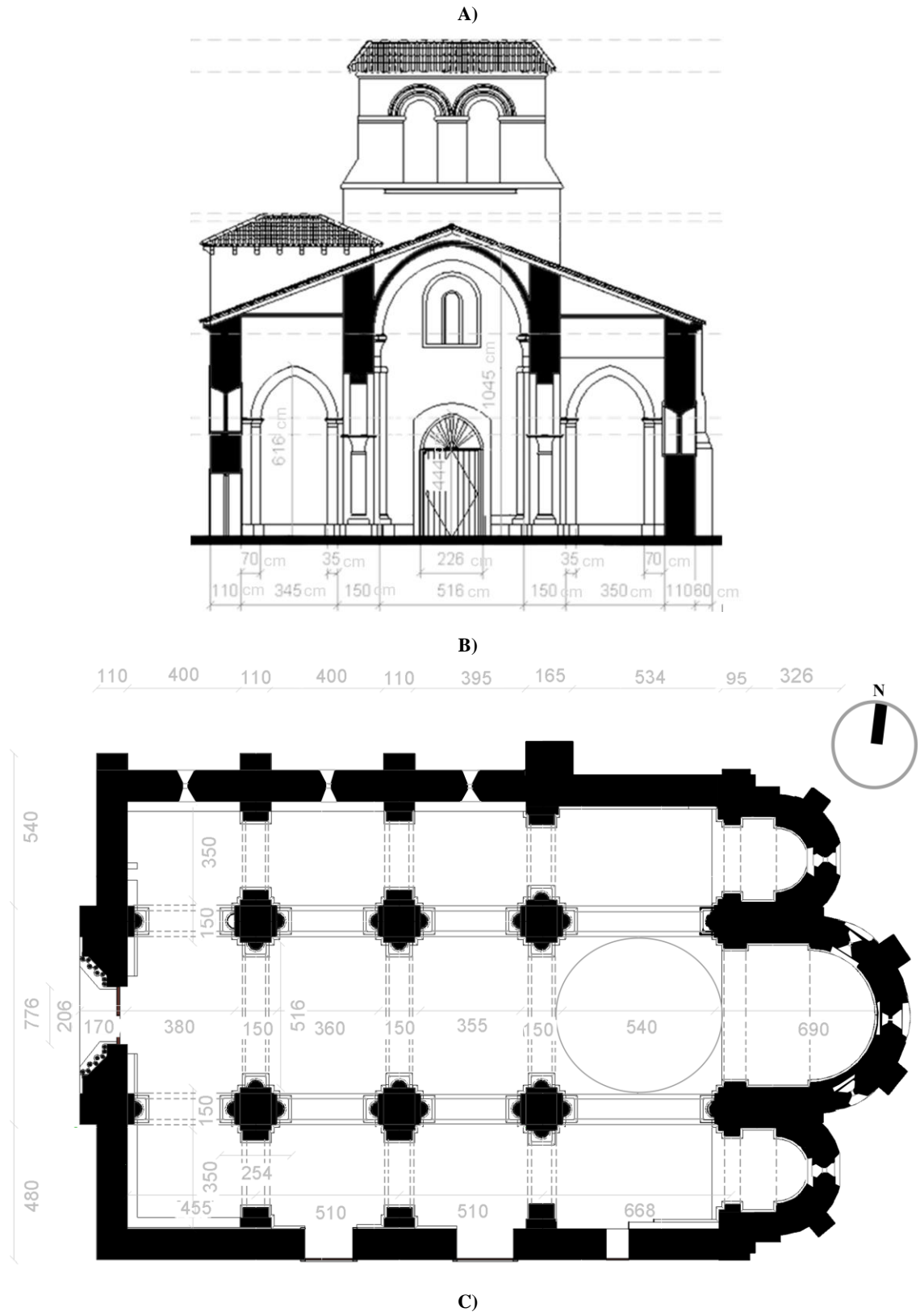
Vista de una columna cruciforme



Perspectiva de la base de una columna cruciforme

**Figura 33:** Similitudes entre la nube de puntos y los elementos creados.



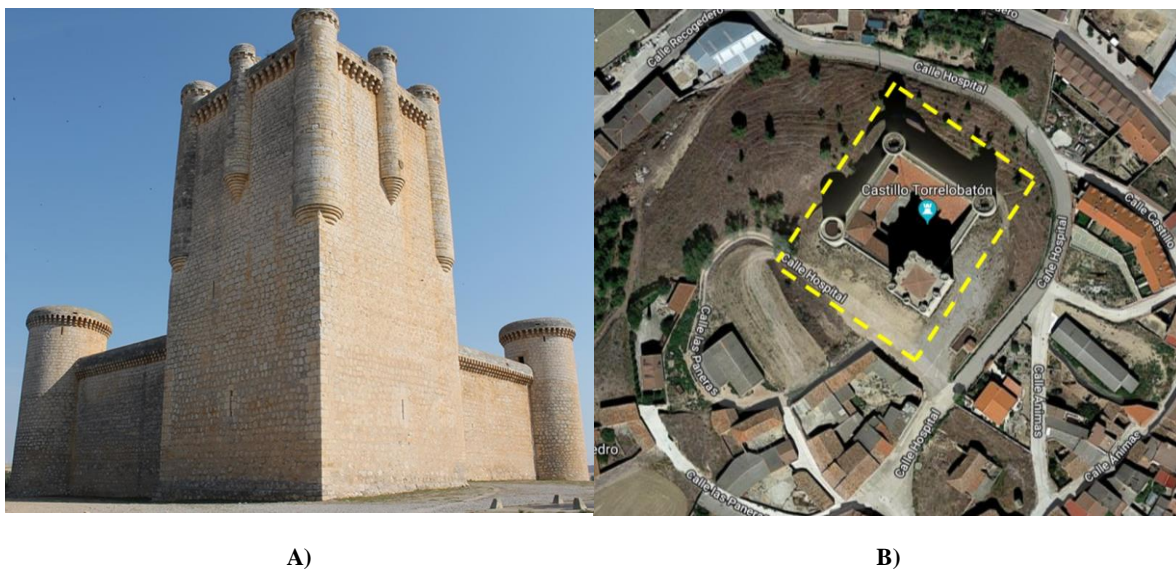


**Figura 34:** A) Sección longitudinal de la iglesia. B) Sección transversal de la iglesia. C) Plano de planta de la Iglesia.



### 5.3. Caso de estudio: Castillo Torrelobatón

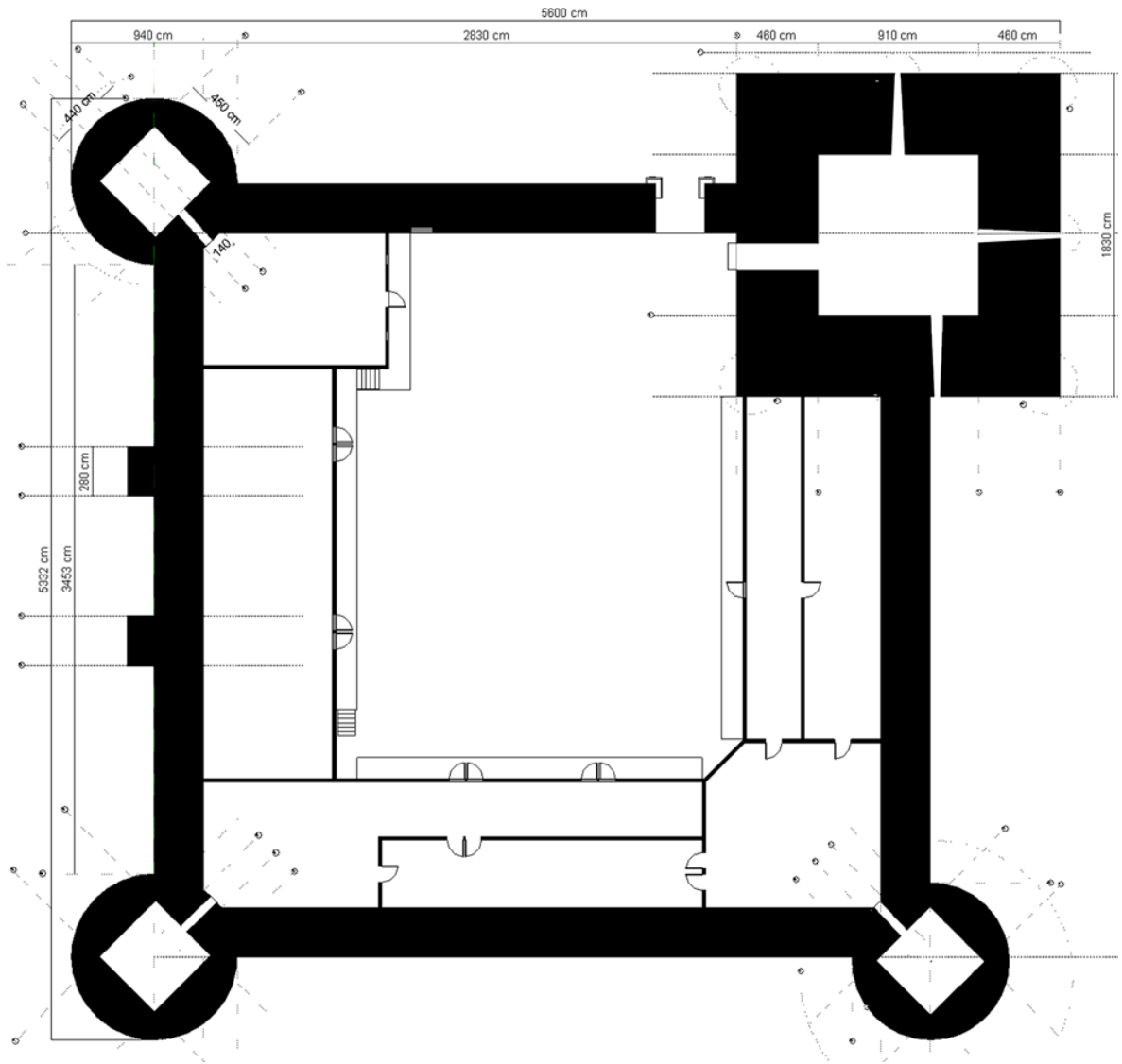
El edificio seleccionado para el segundo caso de estudio es el Castillo de Torrelobatón, también conocido como Castillo de los comuneros. Según los autores de (Navarro, 2010; Cobos Guerra & Retuerce Velasco, 2011). Este castillo señorial ejemplifica a la perfección los cánones arquitectónicos de lo que se ha llamado Escuela de Valladolid, tipología de fortificación iniciada por la propia corona (figura 35 A). Este castillo se sitúa en Torrelobatón, provincia de Valladolid, España (figura 35B), y es considerado como uno de los castillos mejores conservados de Castilla y León.



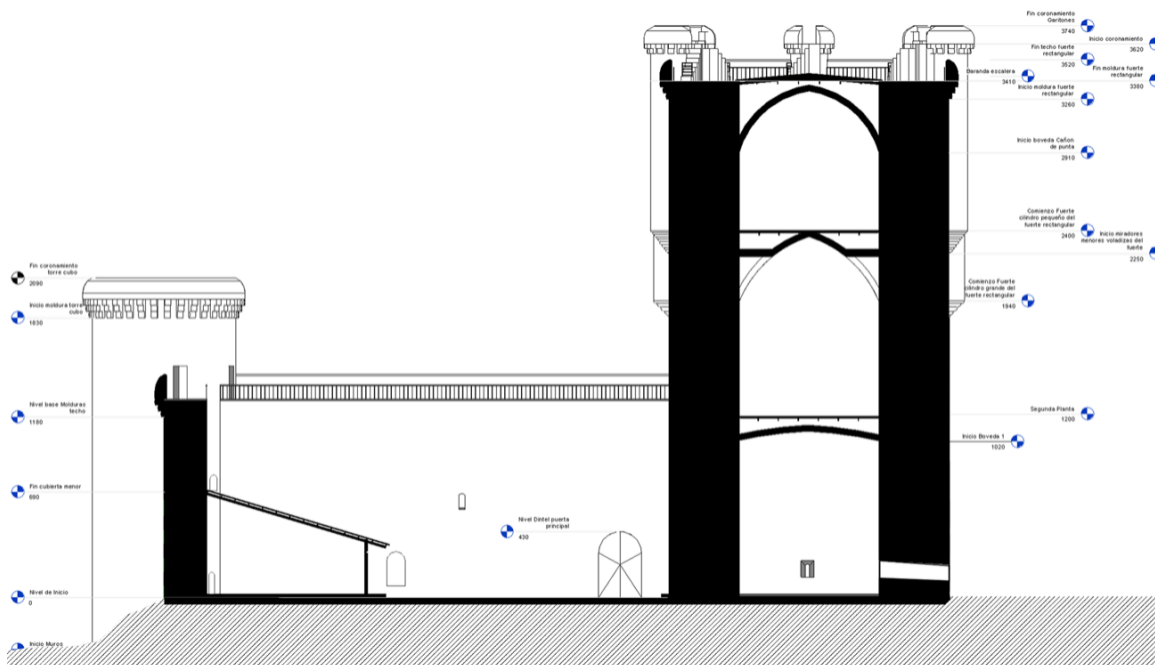
**Figura 35:** **A)** Vista sur del Castillo Torrelobatón. **B)** Emplazamiento del Castillo Torrelobatón.  
Fuente: A) adaptado de <https://jesusantaroca.files.wordpress.com/2015/04/2-crop1.jpg>. B) adaptado de <https://www.google.es/maps/@41.6504048,-5.0257042,390m/data=!3m1!1e3!5m1!1e4?hl=es>.

Es posible que la construcción de las bases del Castillo Torrelobatón fuera iniciada en el siglo XIII. Sin embargo, el aspecto y las características generales del edificio actual corresponden a la obra finalizada en la segunda mitad del siglo XV y a las reparaciones acometidas en el siglo XVI (Navarro, 2010). Este castillo señorial, posee un diseño racional, donde predomina la planta cuadrada, rodeada con torres cubos circulares en tres de sus esquinas, una torre de homenaje de planta cuadrada que se inserta en la otra esquina y unas murallas que tienen la mitad de la altura de la torre principal (Provincia de Valladolid, 2018). En la figura 36 se puede observar, en planta arquitectónica, la distribución del castillo. La torre de homenaje conserva en su interior tres plantas cubiertas con bóvedas de sillería de medio cañón, crucería y esquifada; y en su exterior está rodeada de ocho garitones circulares. En la figura 37 se puede observar una sección del castillo.

Vale la pena aclarar que a mediados del siglo XX pasa a depender del Servicio Nacional de Trigo (SENPA) del Ministerio de Agricultura, haciendo de almacén de cereales. Esta nueva actividad condujo a cambios internos en la planta baja del castillo y a la ocupación de una parte del patio de armas con construcciones relativas a los procesos de almacenamiento. Desde el año 2003 pertenece al ayuntamiento de Torrelobatón, y desde 2007 alberga el Centro de *Interpretación de la Guerra de las Comunidades*.



**Figura 36:** Planta arquitectónica del Castillo Torrelobatón.



**Figura 37:** Sección de la torre homenaje del Castillo Torrelobatón.

### 5.3.1. Datos de captura

El levantamiento gráfico del Castillo Torrelobatón ha sido llevado a cabo por una empresa subcontratada por la Junta de Castilla y León, utilizando un modelo de vehículo aéreo no tripulado (UAV) y técnicas de de fotomodelado 3D. Específicamente los instrumentos utilizados han sido el Dron DJI inspire y su cámara óptica Zenmuse X3 (12,4 megapíxeles).

El flujo de trabajo que se ha implementado para obtener el modelo de nube tridimensional del Castillo Torrelobatón consiste en la combinación de: (1) el trabajo de campo, donde se ha programado el vuelo del Dron a altura y velocidad constante, tomando imágenes (fotografías) tanto en horizontal y vertical, como en vuelo circular cada 3 segundos para conseguir suficiente solapamiento; y (2) la aplicación de visión por computador para comparar por "parches" dos imágenes consecutivas, con el fin de encontrar de este modo las coincidencias adecuadas.

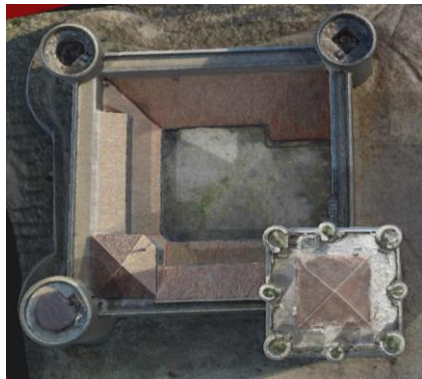
La información de posición y orientación (de la cámara embarcada en el Dron) previamente programada se ha empleado para definir la ubicación de cada parche en el espacio 3D. Cuando la imagen X se combina con las posiciones de las imágenes (X + 1; X + 2; ...), y así sucesivamente, el resultado deriva en una nube de puntos 3D final, única y global. En la tabla 1 se observan los parámetros que caracterizan a la nube de puntos final registrada. Además, se pone en correspondencia

el factor de escala para delineación.

Factor de escala	Nivel de detalle gráfico (LOD)	Tolerancia	Resolución de la nube de puntos
1:100	5 cm	2,5 cm	1,3 cm
1:50	2,5 cm	1,3 cm	0,7 cm

**Tabla 1:** Datos de la nube de puntos final registrada.

Los datos suministrados han sido utilizados con el propósito de construir modelos paramétricos HBIM dentro del contexto del Proyecto de la Unión Europea (UE)<sup>47</sup>, con el que se ha colaborado durante la elaboración de la presente tesis. La figura 38 muestra la nube de puntos final registrada para el Castillo bajo análisis.



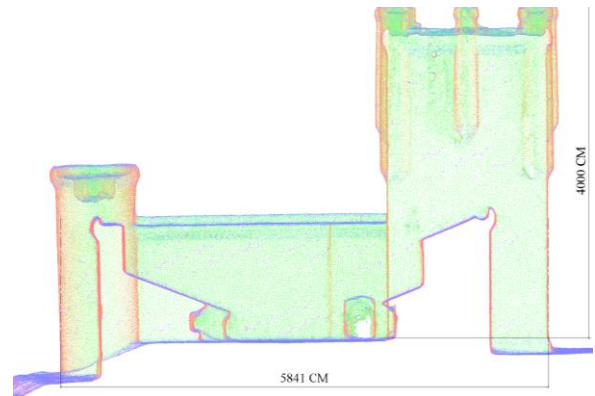
Planimetría de la nube de puntos del Castillo Torrelobatón



Vista sureste (acceso principal)



Vista oeste



Referencia de distancias en la nube de puntos

**Figura 38:** Nube de puntos final del Castillo Torrelobatón.

<sup>47</sup> European Union (EU): Horizon 2020 Call: H2020-REFLECTIVE-7-2014 proposal number 665220

### 5.3.2. Modelado geométrico en BIM con el procedimiento desarrollado

El enfoque práctico citado en el capítulo 4 se aplica ahora al Castillo de Torrelobatón. Para este caso, imágenes ortográficas y una nube de puntos se importan al programa Autodesk Revit® 2015, para ser utilizados como guía para crear los distintos elementos geométricos que componen al edificio.

Al igual que en el caso de estudio anterior, el modelado digital del edificio se ha llevado a cabo utilizando dos tipos de familias de Revit, familias de sistema y familias cargables. Los procesos de modelado son muy similares, excepto que en este caso de estudio el último paso es la vinculación de las familias creadas con el Getty AAT, siempre que ha sido posible.

El paso inicial ha sido la creación de una serie de niveles y secciones sobre la nube de puntos para crear planos de plantas y alzados que demuestren el perfil de los elementos. Luego sobre los planos obtenidos se crean una serie de rejillas para marcar el contorno de las superficies de la nube y para determinar las distancias horizontales y verticales.

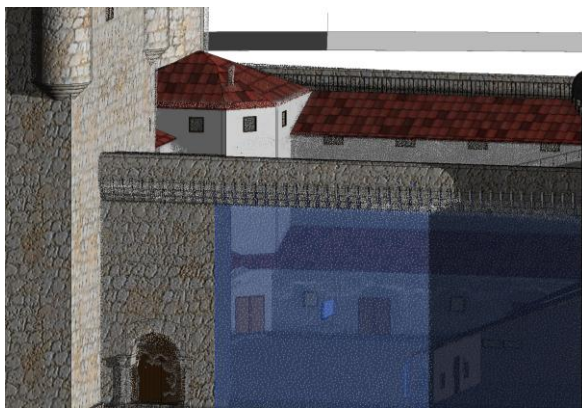
Si bien la nube de puntos nos ha proporcionado la forma, las dimensiones, la altura y las características reales de la superficie externa del castillo, ésta no nos ha brindado la distribución y composición interna de los distintos recintos, así como tampoco la información definitiva sobre el espesor de los muros de la torre del homenaje. Por lo tanto, se han incorporado una ortoimagen de la planimetría y una de la primera planta del castillo.

Las ortoimágenes importadas al programa Autodesk Revit® se han escalado a medida utilizando las referencias y los límites creados sobre la nube de puntos. Específicamente, se han aprovechado los límites que delimitan el plano de planta obtenido del Nivel de inicio (Cota + 0,00m). Gracias a las imágenes ortográficas, a la nube de puntos y al estudio realizado sobre el Castillo Torrelobatón ha resultado posible calcular los valores de las dimensiones (alto, ancho y profundidad) y estimar los materiales utilizados en los distintos elementos arquitectónicos. Una vez delimitadas la nube de puntos y escaladas las imágenes ortográficas, el modelado geométrico puede comenzar.

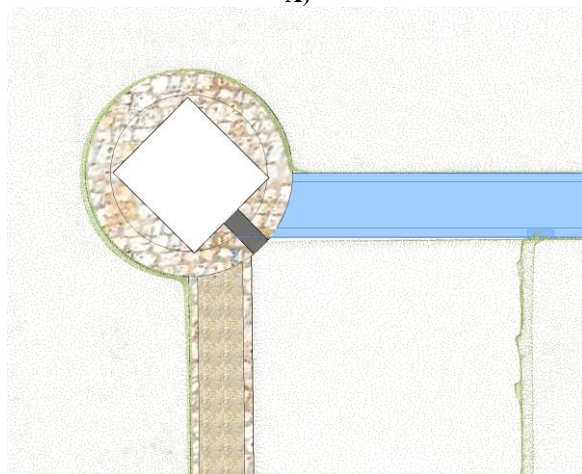
Se ha identificado a las murallas, a las torres cubos, a la torre de homenaje y a los edificios internos como superficies regulares. Por lo tanto, el modelado ha sido realizado utilizando el *Tipo Muro Básico* de la *Familia de Muro* disponible en la biblioteca interna de Revit (figura 39A). Por la calidad y estado de conservación que presenta el castillo en general y los muros en particular, la altura de estos se ha trazado desde el nivel de inicio hasta su altura máxima. Los muros, que son parte de la fortificación tardo-gótica están compuestos por dos capas del mismo material (piedra de cantera). Sin

embargo, el grosor de cada uno varía según la parte del edificio en el que se ubican. Por ejemplo, las murallas poseen un grosor entre los 230 y los 355 cm; y los muros de la torre del homenaje 460 cm. Para cada uno de los casos se han creado subtipos dentro del *Tipo Muro Básico*, los subtipos de la muralla poseen los nombres de *Muro Exterior Castillo Torrelobatón Norte, Sur, Este u Oeste* y el subtipo de la torre de homenaje se denomina *Fuerte Regular Castillo Torrelobatón*.

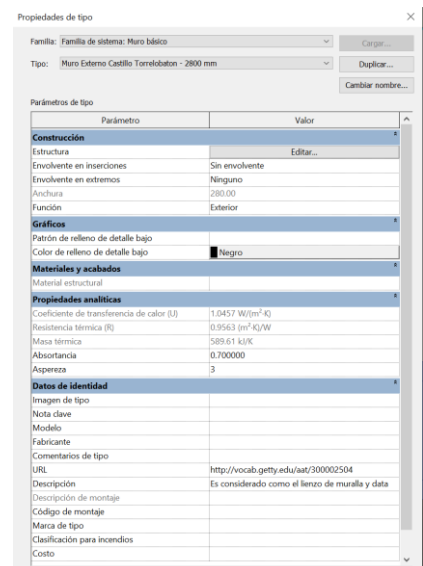
Los muros modelados, pueden formar parte fácilmente del proyecto BIM siguiendo las líneas de las rejillas y los niveles (figura 39B). Además del grosor y tipo de material, los otros parámetros también han sido modificados desde la tabla de dialogo que se muestra en la figura 39C. Estas modificaciones han logrado que los muros proyectados representen con precisión los muros reales del Castillo Torrelobatón.



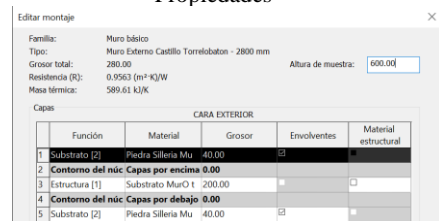
A)



B)



Propiedades

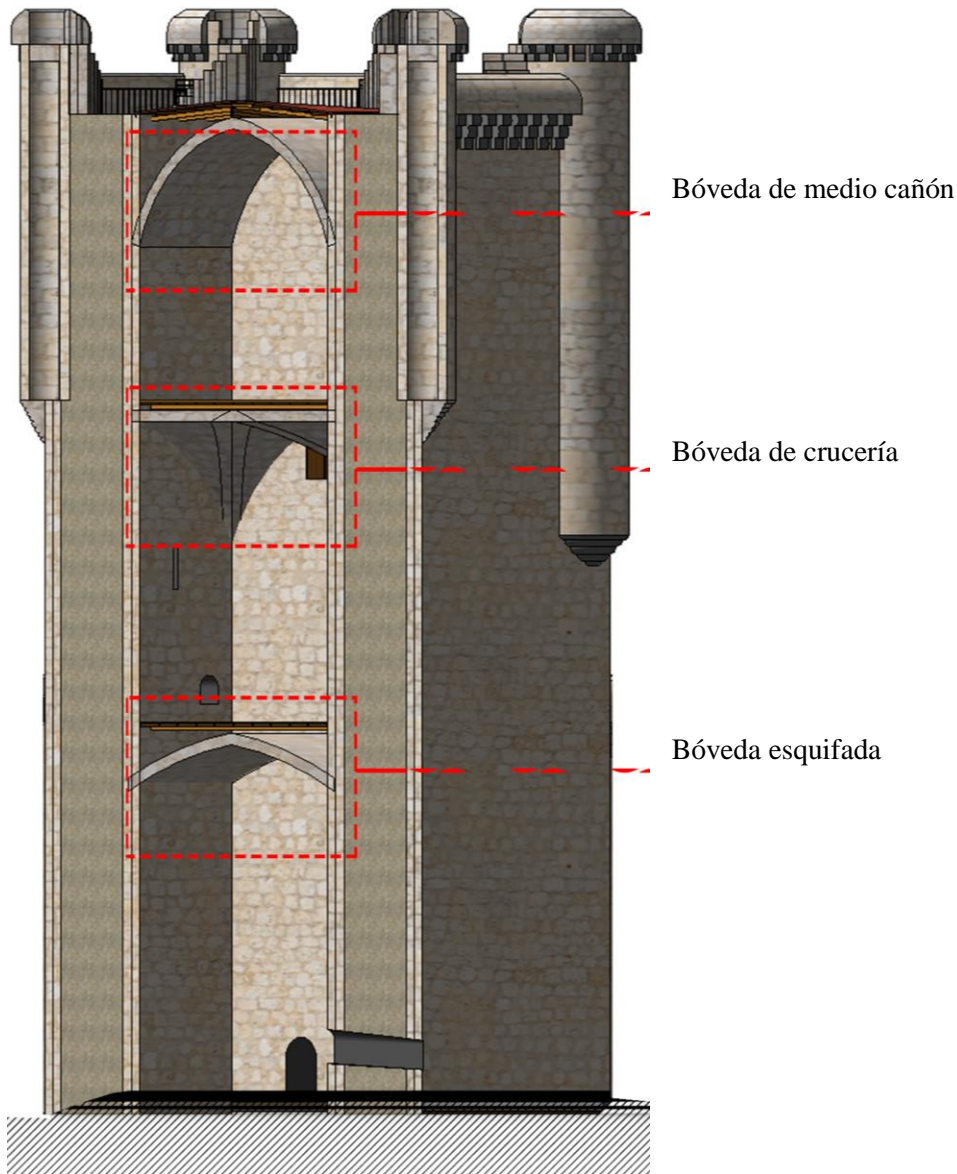


Especificaciones de materialidad

C)

**Figura 39:** A) Vista 3D de la *Familia de muro*, subtipo *Muro Exterior Castillo Torrelobatón*. B) Modelado del muro sobre las rejillas del proyecto. C) Tablas de dialogo para modificar los parámetros del muro.

Las tres bóvedas que dividen el recinto interno de la torre del homenaje se han asumido como superficies regulares, y su procedimiento de modelado es similar al descrito en el caso de estudio anterior. Un ejemplo de las bóvedas se puede observar en la figura 40.

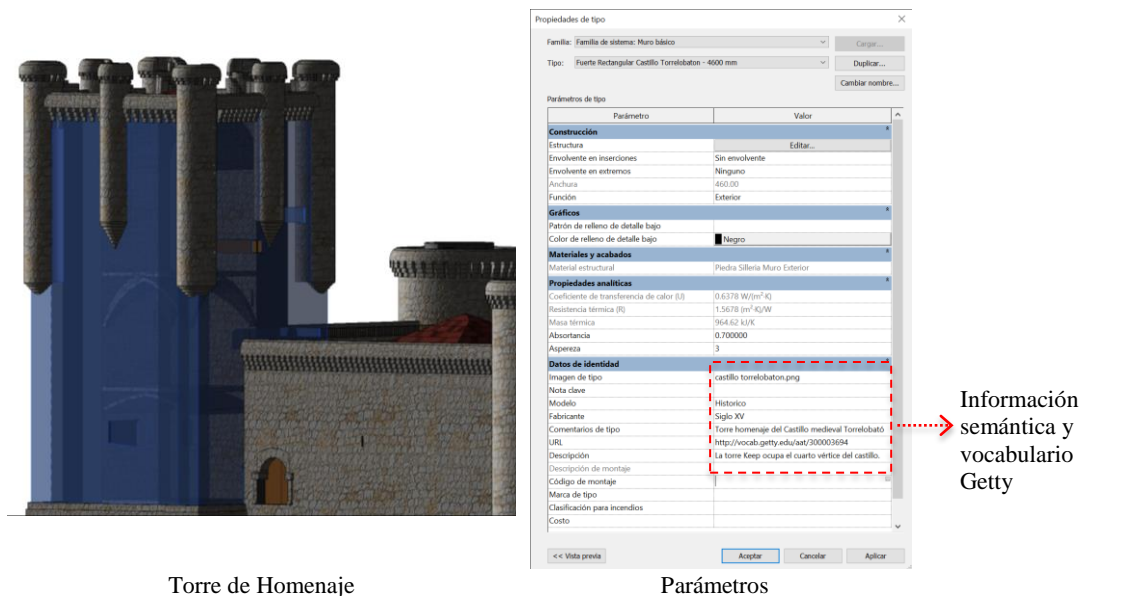


**Figura 40:** Bóvedas de la torre del homenaje.

Por otro lado, las almenas, ménsulas, la sección inferior de los garitones, las columnas del acceso y otros elementos decorativos del Castillo Torrelobatón se han identificado como superficies irregulares. Estos elementos se modelaron externamente mediante la creación de familias cargables, gracias al uso de la metodología asistida descrita en el capítulo 4. Los elementos resultantes se ubican dentro de una biblioteca HBIM y proporcionan una solución para el modelado 3D de una amplia

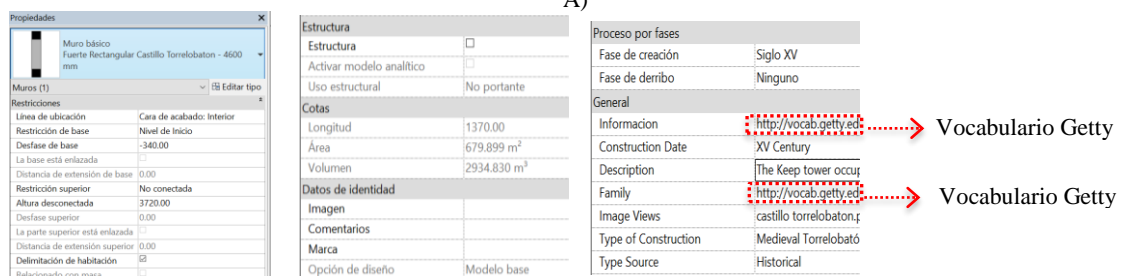
gama de edificios con el mismo estilo. Esto es posible debido a la flexibilidad de los elementos modelados, que pueden cambiar en forma y proporciones (tras editar sus parámetros predeterminados), adaptándose así a los nuevos requisitos y proyectos sin tener que empezar desde cero. Los objetos de la biblioteca paramétrica HBIM se posicionan asistidamente sobre la nube de puntos utilizando los planos de planta, niveles y líneas delimitantes.

Finalmente, el tercer y último paso es vincular el vocabulario Getty AAT con los elementos paramétricos diseñados. La forma de hacer esta asociación depende del paquete BIM en el que se trabaja. En el caso de Autodesk Revit® 2015, el vínculo del vocabulario Getty AAT con los elementos modelados se puede llevar a cabo de dos maneras: (i) asociando la URL AAT de Getty con el parámetro *Datos de identidad* ubicado dentro de la herramienta *Propiedades de tipo*, del grupo *Propiedades* (figura 41A); (ii) generar un enlace en la paleta de *Propiedades* mediante el uso de la opción *General* (es decir, *Información y Familia*), asociando la URL AAT de Getty con el elemento modelado (figura 41B).



Torre de Homenaje

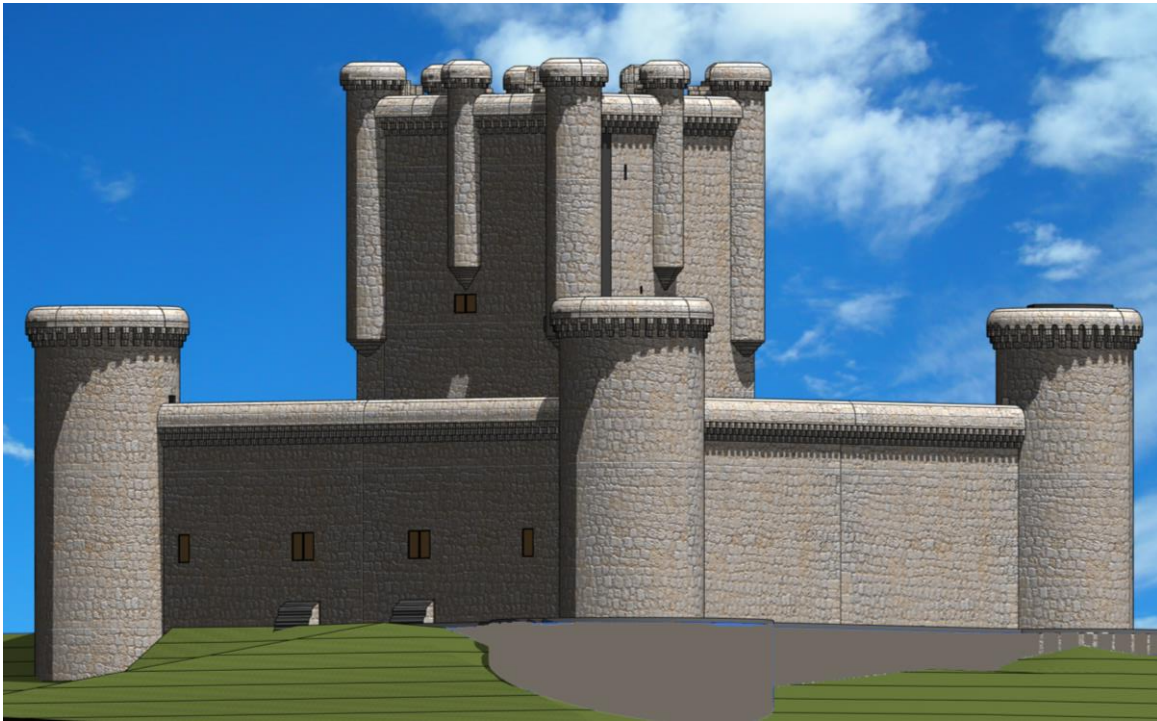
Parámetros



**Figura 41:** A) Vinculación de Getty AAT con los parámetros de la torre de homenaje. B) Vinculación del vocabulario Getty AAT con la paleta de propiedades.



En la figura 42 se ilustra el modelo 3D final del Castillo Torrelobatón, con todos sus elementos estructurales y delimitadores de cerramientos representados en la posición de construcción correcta.

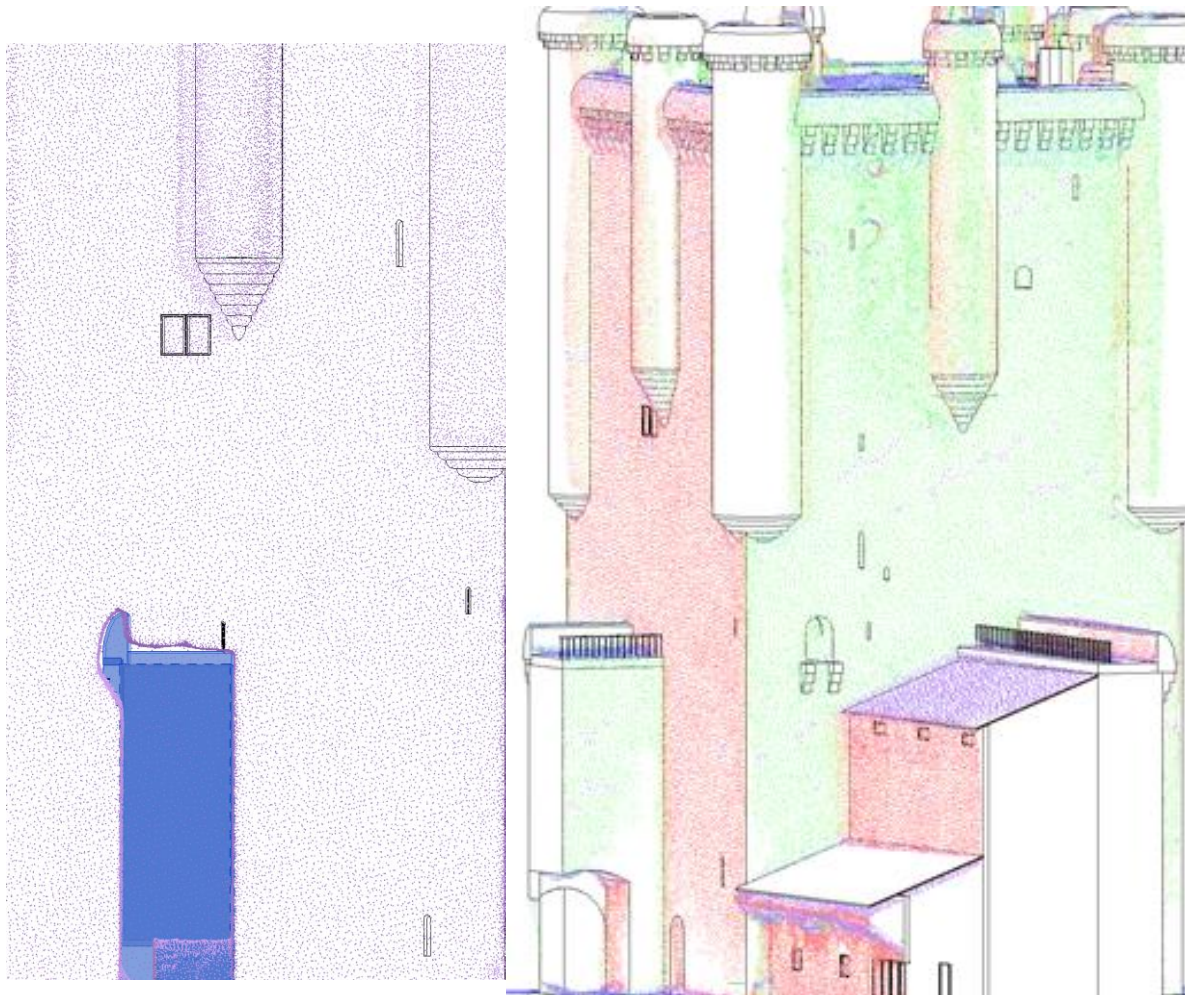


**Figura 42:** Modelo Virtual Castillo Torrelobatón.

### 5.3.3. Resultado del modelado paramétrico del Castillo Torrelobatón

Los componentes paramétricos generados como parte del caso de estudio del Castillo Torrelobatón también han sido utilizados como prueba de precisión. Esta prueba ha consistido en comparar distintas secciones de la nube de puntos del Castillo con el modelo resultante. Particularmente, la evaluación visual de la precisión existente entre nube y modelo ha sido útil para identificar y localizar posibles errores (por ejemplo, tamaños incorrectos, escalas u orientaciones indebidas). La figura 43 muestra las similitudes entre algunos componentes del Castillo y la nube de puntos existente.

Se considera que los componentes creados para la biblioteca HBIM del Castillo Torrelobatón representan el aspecto real de cada elemento modelado. Por tal motivo, estos componentes pueden ser utilizados para generar la documentación técnica y semántica del monumento. La figura 36 muestra la planta arquitectónica del Castillo Torrelobatón y la figura 37 un corte longitudinal del mismo monumento.



Perfil del acceso principal

Perspectiva de la Torre del Homenaje y las murallas laterales

**Figura 43:** Similitudes entre secciones de la nube de puntos y los componentes modelados.

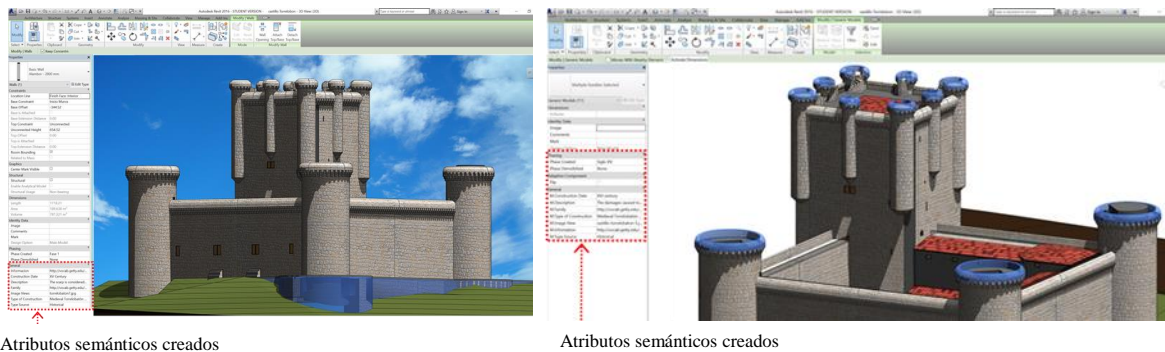
Además, para este caso de estudio, el modelo resultante consta de un total de 18 elementos arquitectónicos significativos (15 con correspondencia en el Getty AAT). El enlace gráfico-semántico más representativo se proporciona en la tabla 2 según los siete niveles arquitectónicos jerárquicos fijados por la AAT.

Los resultados correspondientes se dan desde la figura 43 a la figura 46, formando el conjunto de elementos fundamentales de la arquitectura defensiva desde la Edad Media hasta el Renacimiento en Europa, de los cuales el Castillo de Torrelatón es un ejemplo representativo. Estos elementos se pueden verificar con los archivos IFC y RVT correspondientes. Además, estos componentes que representan la composición real de cada elemento modelado forman parte de una biblioteca HBIM.

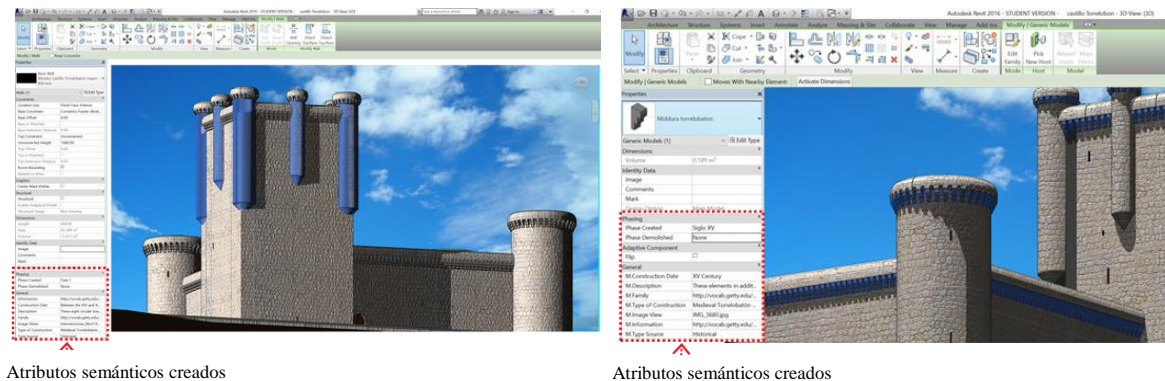
La mencionada biblioteca de HBIM es útil no solo para la catalogación, sino también para el correcto funcionamiento de las acciones de protección, conservación, restauración y difusión del patrimonio construido. Además, gracias a los parámetros de cada componente, los cálculos y simulaciones de eficiencia energética y, la evaluación y análisis de decaimiento se podrán realizar cuando sea necesario.

Elementos	AAT ID	Nivel	Resultado
Alambor	<a href="http://vocab.getty.edu/aat/300003713">http://vocab.getty.edu/aat/300003713</a>	3	Figura 43
Almenas	<a href="http://vocab.getty.edu/aat/300002595">http://vocab.getty.edu/aat/300002595</a>	2	Figura 43
Garitón	<a href="http://vocab.getty.edu/aat/300003636">http://vocab.getty.edu/aat/300003636</a>	4	Figura 44
Matacán	<a href="http://vocab.getty.edu/aat/300002695">http://vocab.getty.edu/aat/300002695</a>	4	Figura 44
Ménsula	<a href="http://vocab.getty.edu/aat/300003610">http://vocab.getty.edu/aat/300003610</a>		
Muro cortina (Muralla)	<a href="http://vocab.getty.edu/aat/300002504">http://vocab.getty.edu/aat/300002504</a>	4	Figura 45
Torre Cubo	<a href="http://vocab.getty.edu/aat/3000101468">http://vocab.getty.edu/aat/3000101468</a>	3	Figura 45
Torre de homenaje	<a href="http://vocab.getty.edu/aat/300003694">http://vocab.getty.edu/aat/300003694</a>	2	Figura 46
Bóveda de crucería	<a href="http://vocab.getty.edu/aat/300001393">http://vocab.getty.edu/aat/300001393</a>	6	Figura 46
Bóveda de medio cañón	<a href="http://vocab.getty.edu/aat/300001363">http://vocab.getty.edu/aat/300001363</a>		

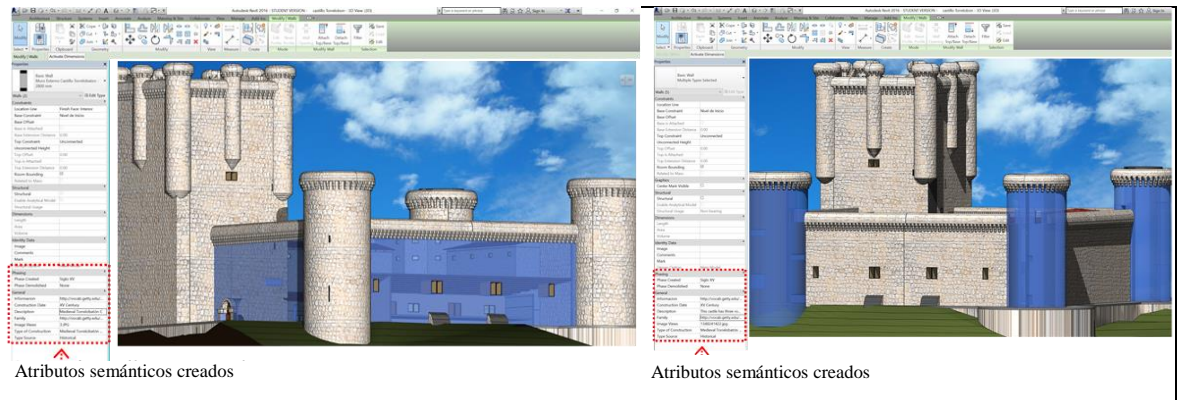
**Tabla 2:** Biblioteca HBIM enriquecida semánticamente para el Castillo de Torrelobatón (Valladolid, España).



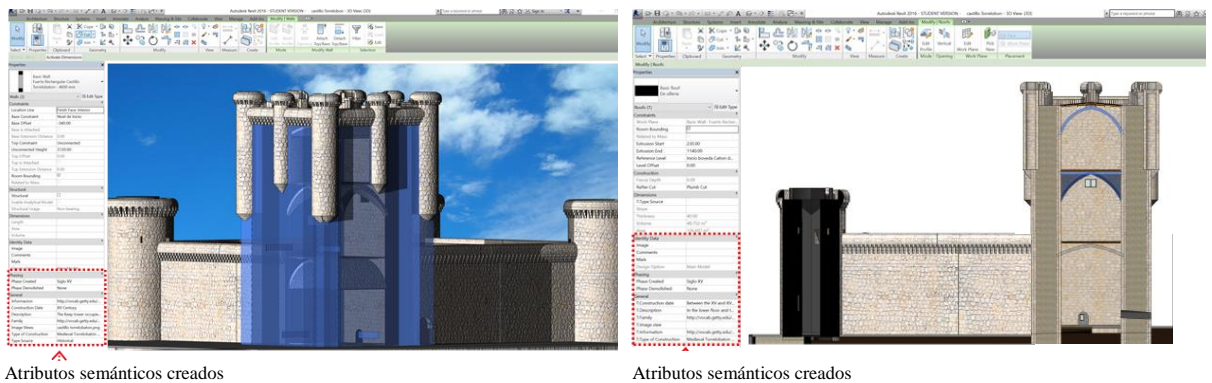
**Figura 44:** Resaltada en azul: Izquierda: alambor; Derecha: almenas.



**Figura 45:** Resaltado en azul: Izquierda: garitón; Derecha: matacán/ménsula.



**Figura 46:** Resaltada en azul: izquierda: muros cortina; Derecha: torres cubo.



**Figura 47:** Resaltado en azul: Izquierda: torre de homenaje; Derecha: bóveda medio cañón (arriba) y bóveda de crucería (abajo).

#### 5.4. Productividad de la metodología desarrollada

Con el fin de estimar la productividad de la metodología desarrollada (MD), se describe a continuación el tiempo que ha consumido cada etapa en los casos de estudio recientemente descritos.

La etapa principal que consiste en la recolección de información semántica y geométrica se ha desarrollado de manera distinta para ambos casos de estudio. La diferencia recae principalmente, en el hecho de que los datos geométricos del Castillo de Torrelobatón nos ha servido una empresa, por lo tanto, se desconoce el tiempo consumido. Las operaciones de levantamiento gráfico de la Iglesia Santa María la Real de Mave, se llevaron a cabo durante 2,5 días hábiles (20 horas de trabajo). La campaña fotográfica se ha realizado paralelamente y se incluye en el tiempo de trabajo. Se calcula que para lograr el levantamiento gráfico de la iglesia utilizando un método de medición convencional se necesitarían 9,5 días hábiles. El tiempo de adquisición de los datos semánticos en ambos casos es

indiferente a la causa de cuantificar la productividad de la MD, ya que la curva de aprendizaje sobre los datos históricos ha ido incrementando hasta y durante la etapa de modelado inclusive.

En la segunda etapa, que representa al preprocesamiento de los datos adquiridos, el tiempo para preprocesar las nubes de puntos y obtener una nube global de la Iglesia ha sido de 6 días hábiles, que es aproximadamente 3 veces el tiempo de trabajo de campo. El preprocesamiento de las nubes de puntos se ha realizado utilizando el programa PolyWorks®. Al igual que con la etapa principal, se desconoce el tiempo implementado para la obtención de la nube de puntos global del Castillo.

Luego, el conjunto de datos geométricos de ambos casos se ha importado directamente al programa Autodesk Revit® para lograr el modelado paramétrico de cada componente arquitectónico<sup>48</sup>. Con los datos geométricos ya almacenados en el programa Revit se inicia la tercera etapa de la MD. Particularmente, las familias de objetos BIM y los atributos paramétricos no se pueden aplicar directamente a las geometrías capturadas por el escáner láser, por lo tanto, se han implementado una serie de pasos para lograr el modelo 3D de cada componente a partir del uso de las nubes de puntos.

El primer caso de la tercera etapa consiste en clasificar los elementos en superficies regulares e irregulares, luego gracias al conocimientos de las reglas, patrones y proporciones constructivas del periodo arquitectónico, se crea más rápidamente un diseño de múltiples vistas, cortes, secciones y rejillas sobre las nubes de puntos. Este primer paso, se ha llevado a cabo en 1,5 días hábiles (12 horas) para el caso de la Iglesia y en 1 día hábil (8 horas) para el caso del Castillo.

El segundo paso hace referencia al modelado geométrico de las superficies catalogadas como regulares (pisos, muros, arcos, bóvedas, puertas, ventanas, etc.). Para ello se han seleccionado los tipos de familias ubicadas en la biblioteca nativa de Revit y luego se han modificado los parámetros de cada tipo para generar nuevos subtipos que coincidan con los datos de la nube de puntos. Esto ha incluido la modificación de los parámetros estándares de construcción, dimensión, materiales, propiedades, datos de identidad, etc. Posteriormente los subtipos resultantes se modelan definiendo una ruta sobre las rejillas o los niveles. Generar y modelar cada componente regular sobre la nube de puntos, se ha llevado a cabo en 4,75 días hábiles (38 horas) en el caso de la Iglesia y aproximadamente en 4 días hábiles (32 horas) en el caso del Castillo.

---

<sup>48</sup> El ahorro de tiempo que se ha logrado al utilizar la metodología desarrollada es proporcional al nivel de experiencia y especialización que se ha adquirido durante el progreso de la tesis doctoral.

Paralelamente al modelado paramétrico de los componentes arquitectónicos regulares, se han modelado las superficies catalogadas como irregulares o complejas (arquivoltas, capiteles, ornamentos, bases escalonadas, etc.). Este paso requiere un desarrollo más complejo basado en otras herramientas relacionadas con el perfilado y modelado de los objetos. Para ello, se han seleccionado plantillas de familias externas que nos permiten trabajar en planos de trabajo 2D y 3D. En el plano de trabajo 2D se ha creado el perfil geométrico de cada objeto y en el plano de trabajo 3D se ha creado la geometría sólida de estos elementos. Además, en el plano de trabajo 3D también se han creado los parámetros de cada componente diseñado. Los objetos resultantes de este paso se vinculan al modelo digital a través de los planos de planta de la nube de puntos. Al ser un proceso detallado, este paso se ha llevado a cabo en aproximadamente 10 días hábiles (78 horas) para la Iglesia y en 7,5 días hábiles (60) para el Castillo.

Finalmente, los elementos modelados gracias a la metodología diseñada simulan al edificio real y se incorporan al diseño de una biblioteca HBIM.

Es importante subrayar que para ambos casos de estudio se utilizó únicamente Revit para modelar los componentes arquitectónicos, sin tener que cambiar de un programa a otro. Esto ha dado como resultado un marco de tiempo más corto para el proceso de modelado general. Por el contrario, otras metodologías (OM) utilizan el proceso de importación de datos de nubes de puntos a varios programas de modelado (como AutoCAD®, Rhinoceros®, 3D Studio Max®<sup>49</sup>, etc.) y luego vuelta a los programas BIM, esto es un proceso de múltiples pasos y transferencias de archivos que requiere más tiempo.

Si la nube de puntos se carga al programa AutoCAD, se necesitarían 3 días hábiles (24 horas) para extraer un conjunto de polilíneas que capturen y tracen las superficies de los componentes escaneados. Posteriormente, el conjunto de polilíneas producidas en AutoCAD se exportaría al programa de modelado Rhinoceros para convertir las superficies lineales en modelos 3D de superficies NURBS. Esta acción de modelado 3D demandaría 10 días hábiles (80 horas). Finalmente, se gastarían 6,5 días hábiles (52 horas) para exportar cada superficie 3D a los programas BIM y convertirlas en objetos paramétricos, de modo que se obtenga un modelo digital completamente parametrizado.

Resumiendo, el flujo de trabajo necesario<sup>50</sup> para llevar a cabo el modelado paramétrico de la Iglesia

---

<sup>49</sup>Programa Autodesk 3DS MAX. URL: <https://www.autodesk.es/products/3ds-max/overview>. [En línea] Acceso: 23/06/2018.

<sup>50</sup> Para el flujo de trabajo no se han contemplado los días hábiles del levantamiento gráfico y tampoco los de preprocesamiento. Esto se debe a que no compararemos la productividad del escáner láser con la de los sistemas de medición convencional. P.M. Leronés en su trabajo (Leronés et al., 2010) ha descrito en detalle que al utilizar los escáneres láser se reduce un 75% el tiempo de trabajo en campo.

Santa María la Real de Mave ha necesitado 16 días hábiles en oficina y el Castillo de Torrelobatón 12,5 días hábiles. En contraste, si implementamos otras metodologías (OM) que utilicen varios programas de modelado, para modelar los mismos monumentos se necesitarían aproximadamente 19,5 días hábiles. En la tabla 3 podemos observar en resumen el tiempo empleado para el modelado paramétrico de los monumentos a partir del uso de las nubes de puntos.

<b>Modelo Paramétrico</b>				
	<b>Paso 1: Segmentación, corte y delimitación de la nube de puntos</b>	<b>Paso 2/3: Modelado paramétrico de los componentes arquitectónicos</b>		<b>Tiempo total para obtener el modelo</b>
<b>Metodología desarrollada (MD)</b>	12-8 horas	38-32 horas (para modelar superficies regulares)	78-60 horas (para modelar superficies irregulares)	128-100 horas (16- 12,5 días hábiles)
<b>Otras metodologías (OM)</b>	24 horas	80 horas (para el modelado 3D de las superficies)	52 horas (para la parametrización de las superficies)	156 horas (19,5 días hábiles)

**Tabla 3:** Tiempo empleado para el modelado paramétrico de los monumentos a partir del uso de las nubes de puntos.

Una vez obtenidos los tiempos totales necesarios empleando la MD y las OM, es posible calcular la eficacia de la MD como porcentaje del tiempo ahorrado (PTA) en función a la siguiente ecuación:

$$\text{Porcentaje de tiempo ahorrado (PTA)} = \frac{(OM - MD)}{OM} \times 100 = 18\%$$

Se observa que al utilizar la MD se reduce aproximadamente un 18% del tiempo de modelado paramétrico en comparación con las OM.

Por otro lado, cabe subrayar que utilizando la MD se ha generado una biblioteca HBIM donde se almacenan los componentes paramétricos diseñados para esta investigación. Cada componente paramétrico de la biblioteca HBIM puede ser modificado con el fin de adaptarse a diferentes construcciones con carácter y estilo arquitectónico similar. En la tabla 4 se resume el tiempo estimativo que consumiría modelar otro monumento de similares características utilizando los componentes almacenados en la biblioteca HBIM.

Modelado Paramétrico					
	Paso 1: Segmentación, corte y delimitación de la nube de puntos	Paso 2/3: Modelado paramétrico de los componentes arquitectónicos		Transformación y cambio de parámetros	Tiempo total para obtener el modelo
MD	8 horas	32 horas (para modelar superficies regulares)	60 horas (para modelar superficies irregulares)	-----	100 horas (12,5 días hábiles)
HBIM	8 horas	-----	-----	26 horas	34 horas (4,25 días hábiles)

**Tabla 4:** Tiempo empleado para el modelado paramétrico utilizando los componentes de la biblioteca HBIM.

Para cuantificar la eficacia mejorada, el tiempo ahorrado con HBIM también se calcula como porcentaje del PTA en función a la siguiente ecuación:

$$PTA = \frac{(MD - HBIM)}{MD} \times 100 = 66\%$$

Se considera que al modelar otro monumento de similares características utilizando los componentes almacenados en la biblioteca HBIM, será posible reducir un 66% del tiempo de trabajo requerido por la MD para modelar ese monumento desde cero. Lamentablemente, no existe una biblioteca HBIM capaz de ayudar al modelado paramétrico de todos los monumentos arquitectónicos existentes. Sin embargo, actualmente, HBIM es un tema de activa investigación, que se expande gracias a los modelos históricos diseñados por los investigadores e interesados en el tema. Por lo tanto, implementar la metodología desarrollada, que ha mostrado una reducción de tiempo del 18% en el proceso de modelado paramétrico, es una solución para la digitalización de los monumentos históricos que podrán ser parte de una biblioteca HBIM universal.

## 5.5. Conclusiones

El enfoque multifactorial y multidisciplinar requerido para la investigación, protección, conservación, restauración y diseminación del patrimonio construido exige cada vez más no solo desarrollar métodos de modelado paramétrico 3D interoperables, manteniendo la complejidad y precisión, sino también enriquecer estos modelos semánticamente con información gráfica para enfrentar proyectos útiles de HBIM. Por tal motivo, en este capítulo se han descrito dos casos de estudio que validan la eficacia de la metodología propuesta para facilitar y acelerar el modelado paramétrico 3D del patrimonio arquitectónico, mediante la utilización de las nubes de puntos y los datos semánticos del monumento. También se manifiesta cómo se pueden vincular y catalogar los componentes constructivos a través de Getty AAT. El modelado paramétrico de estos casos de estudio se llevó a cabo utilizando el programa Autodesk Revit® 2015.



El caso de estudio de la iglesia Santa María la Real de Mave demostró con precisión el proceso de modelado de ingeniería inversa. Además, brinda la oportunidad de conocer los beneficios de parametrizar cada componente arquitectónico con información semántica y geométrica, ya que, gracias a la flexibilidad de los parámetros, estos componentes podrán adaptarse a otros monumentos pertenecientes al mismo período y estilo arquitectónico. Las familias creadas para este monumento se han incorporado a una biblioteca HBIM que se utilizara como complemento en la librería nativa de Revit.

El caso de estudio del Castillo Torrelobatón ha utilizado la misma metodología de diseño que el caso de estudio anterior. Además, este caso de estudio ha mostrado un ejemplo realista sobre la combinación de elementos significativos del patrimonio 3D con la taxonomía Getty AAT, permitiendo no solo la automatización sino la coherencia en la catalogación de los elementos requeridos, así como una recuperación más eficiente de la información de forma estandarizada como base para una ontología de HBIM confiable.

Las bibliotecas creadas para estos casos de estudios están disponibles a través del enlace ([Familias HBIM-Tesis-Doctoral-López\\_Facundo\\_José \(Universidad de Valladolid-2018\)](#)). Esperamos que este material sea útil para los investigadores en el patrimonio cultural y se complete a través de futuras intervenciones.

# Capítulo 6

Conclusiones y trabajos futuros

## 6.1. Conclusiones

La industria AEC ha evolucionado hacia una nueva era, donde las plataformas BIM y el levantamiento gráfico 3D han renovado y agilizado las técnicas de representación arquitectónica. Además, diversos proyectos a nivel internacional han apoyado y estimulando esta renovación, mostrando interés continuo y creciente con relación al desarrollo de metodologías BIM para el modelado paramétrico de los edificios históricos.

La planificación y la gestión de proyectos de conservación y restauración podrían mejorarse al tener acceso al modelo digital 3D del patrimonio arquitectónico. Particularmente, es posible utilizar la productividad de los escáneres laser 3D y la fotogrametría, junto con los análisis bibliográficos históricos, para la captura fiel de la geometría e identidad de los edificios analizados (el resultado del levantamiento gráfico por escáner láser o fotogrametría es la nube de puntos). Los datos recopilados, después del preprocesamiento digital adecuado, se pueden introducir en los sistemas BIM, independientemente de si estos sistemas se basan principalmente en modelos paramétricos simplificados más adecuados para la arquitectura moderna o los elementos industriales.

Idealmente, las plataformas BIM permitirían modelar componentes arquitectónicos automáticamente a partir del uso de las nubes de puntos. Sin embargo, la complejidad e irregularidad de las formas que caracterizan a los edificios históricos, las restricciones presentes en gran parte de las herramientas de los programas de autoría BIM y la falta de algoritmos inteligentes que automaticen por completo el modelado digital a partir de nubes de puntos, hace que el proceso constructivo de un modelo BIM “tal como está” sea un proceso que consume mucho tiempo y requiera, hasta cierto punto, la intervención humana.

En este contexto, en la presente tesis se ha desarrollado una metodología integral basada en el uso de nubes de puntos, patrones constructivos, cortes, secciones y rejillas que permite modelar más detalladamente las formas simples y complejas encontradas en los edificios analizados, así como reducir el tiempo de modelado BIM desde una única plataforma BIM. Se considera que la metodología propuesta sistematiza todo el proceso de modelado paramétrico a partir del uso de las nubes de puntos, facilitando así la arquitectura inversa del patrimonio arquitectónico. Los componentes resultantes al implementar dicha metodología se almacenan en una biblioteca HBIM. Estos componentes almacenados en la biblioteca HBIM, debido a la flexibilidad de sus parámetros, permiten transformaciones y cambios rápidos en sus formas y proporciones, logrando de este modo adaptarse a otros proyectos sin tener que empezar su modelado desde cero. Esta cualidad de

reutilización o readaptación ayuda a reducir, hasta cierto punto, el aporte humano que todavía es necesario.

Además, esta metodología también es una solución efectiva para simplificar el trabajo de arquitectos, ingenieros, constructores y otros profesionales involucrados en los procesos de rehabilitación, reconstrucción o mantenimiento del patrimonio arquitectónico, debido a que las plataformas y herramientas BIM, a través de la estructura de datos común IFC, permiten la interoperabilidad de la información y la comunicación entre los diferentes actores implicados,

La iglesia de Santa María la Real de Mave y el castillo Torrelobatón, son dos casos de estudio que validan la efectividad de la metodología desarrollada. Estos monumentos analizados han sido completamente modelados y cada componente arquitectónico ha sido parametrizado. Los componentes de la iglesia modelados como *Familia de entrada* y *Familia columna cruciformes*, y los componentes del castillo pueden adaptarse a otros monumentos pertenecientes al mismo período y estilo arquitectónico, gracias a la flexibilidad de sus parámetros. Por esta razón, los componentes arquitectónicos modelados se han almacenado en una biblioteca HBIM interoperable y compatible con todos los profesionales interesados en el tema, lo que permite actualizar y enriquecer geométrica o semánticamente cada componente. Además, estos casos de estudio evalúan la exactitud de los modelos resultantes contra los datos reales obtenidos sobre el terreno. Los modelos digitales obtenidos de esta manera se pueden utilizar para muchos propósitos, como análisis de energía, cálculos estructurales y lumínicos, programaciones temporales, generación automática de documentación técnica que sirva para interpretar los diferentes elementos constructivos y los elementos faltantes; y muchos otros tipos de gestión de información.

Esta investigación ha descrito con sólida convicción que la metodología desarrollada es una solución adecuada para acelerar la generación de modelos BIM precisos a partir de las nubes de puntos. Además, se ha detallado cómo el uso de la biblioteca HBIM ha acelerado el proceso de modelado paramétrico, así como también ha facilitado el intercambio de objetos / datos semánticos y geoespaciales entre expertos de diferentes disciplinas en el campo del patrimonio arquitectónico. La falta de bibliotecas HBIM internacionales, la diferencia y la diversidad entre diferentes períodos arquitectónicos, y la colaboración internacional insuficiente, han limitado el uso potencial de HBIM. Por tal motivo, todavía hay mucho por hacer en este ámbito, donde se debe realizar más investigación y desarrollo para abordar el progreso continuo de las plataformas BIM y su relación con el patrimonio arquitectónico.

Cabe señalar en las conclusiones, que la presente tesis ha dado respuesta a las cuestiones planteadas en los principales objetivos de la investigación. En concreto:

- Se han obtenido los datos (geométricos y semánticos) necesarios para el estudio y modelado de los inmuebles seleccionados (sección 4.2.).
- Se ha desarrollado una metodología para combinar los datos obtenidos de la exploración láser y la documentación histórica en una única estructura digital, utilizando las herramientas BIM (capítulo 4).
- La metodología desarrollada sobre las plataformas BIM ha mejorado y acelerado el proceso de modelado paramétricos de los edificios existentes en comparación con las otras metodologías de modelado digital (sección 4.4. y sección 5.4.).
- Se ha implementado la metodología sobre las nubes de puntos obtenidas, respetando los patrones históricos analizados, para crear modelos paramétricos BIM precisos y actualizados de los edificios históricos analizados (capítulo 5).
- Se han generado geometrías BIM con información semántica y espacial de los edificios analizados (sección 5.2. y 5.3.).
- Se han agrupado y organizado los objetos modelados en una biblioteca HBIM actualizable (capítulo 5).
- Se ha creado una biblioteca HBIM disponible a través de servicios web, capaz de ser utilizada por las distintas oficinas involucradas en la investigación del patrimonio cultural (sección 5.5.).
- Se ha validado la eficacia de la biblioteca de modelado HBIM con dos casos de estudio real (capítulo 5).
- Se ha validado con un caso de estudio el proceso de vinculación de los modelos de la biblioteca HBIM con la taxonomía Getty (AAT) (sección 5.3.).

## **6.2. Análisis de las Debilidades, Amenazas, Fortalezas y Oportunidades (DAFO)**

Un paso estratégico y efectivo para concluir con esta tesis doctoral resulta en la valorización de las Debilidades, Amenazas, Fortalezas y Oportunidades (DAFO) que caracterizan a la presente investigación. Las Debilidades y Fortalezas son valorizaciones que permiten cuantificar los factores (internos) negativos y positivos de la implementación de la investigación desarrollada. Por su parte, las Amenazas y Oportunidades son los factores externos que pueden beneficiar o no a la investigación.

### 6.2.1. Debilidades

- A pesar del creciente uso de BIM, en la actualidad las herramientas y las bibliotecas nativas de BIM se centran en el diseño y la construcción de nuevos edificios, provocando vacíos o imperfecciones al utilizarse en el modelado de edificios históricos.
- Poco progreso en la automatización completa del proceso de paso de nubes de puntos a modelos paramétricos BIM, de tal forma que se convierte en un proceso largo y costoso.
- Generalmente, los componentes de las bibliotecas HBIM no pueden ser modificados fácilmente por los usuarios, de tal manera que los parámetros de cada componente deben ser personalizados específicamente por un experto para su uso extendido en otros proyectos.

### 6.2.2. Amenazas

- La resistencia al cambio de paradigma entre los programas de diseño 2D y los programas multidimensionales de diseño paramétrico resulta un obstáculo latente que amenaza en cierto aspecto el avance hacia la estandarización en rehabilitación y mantenimiento del patrimonio arquitectónico. Por lo tanto, son esenciales las investigaciones que destaquen los beneficios y las oportunidades que brindan las plataformas BIM.
- En particular, la mayoría de las investigaciones científicas se centran en la combinación de nuevas tecnologías de adquisición de datos (escáner láser y fotogrametría) con plataformas BIM para lograr la gestión y el modelado paramétrico del patrimonio arquitectónico. Sin embargo, solo unos pocos documentos tratan el estudio integral del beneficio de implementar los programas de autoría BIM para administrar, documentar, mantener y/o diagnosticar las condiciones actuales de los edificios existentes.
- Los vocabularios de Getty son recursos compilados que crecen a través de contribuciones de proyectos de Getty y otras instituciones (museos, proyectos nacionales o internacionales, etc.), de tal manera que resulta prácticamente imposible contribuir como un académico individual.
- El desarrollo evolutivo de las tecnologías BIM que mejoran su aplicabilidad en el modelado de edificios existentes debe enfrentar el desafío de lograr la interoperabilidad y la sincronización de los datos de los modelos BIM existentes con las nuevas tecnologías operativas.

### 6.2.3. Fortalezas

- Eficiencia y replicabilidad de la metodología desarrollada para acelerar y simplificar la conversión de los datos láser o fotogramétricos en elementos de BIM. Los elementos resultantes son agrupados en una biblioteca HBIM.
- Digitalización del patrimonio cultural arquitectónico a través de los componentes paramétricos de la biblioteca HBIM. Los modelos digitales obtenidos permiten automatizar y racionalizar la producción de información cuantitativa y cualitativa relacionada con temas como la documentación técnica e histórica, los datos de monitorización y la información energética, lo que abre las puertas a un análisis detallado, incluso remoto, y multidisciplinar en el marco general del *patrimonio inteligente*.
- Alto grado de comunicación e intercambio de datos relacionados a la gestión (estructural, energética, económica, temporal, etc.) del edificio entre los distintos actores involucrados, garantizado y promovido por la interoperabilidad de los programas colaborativos de autoría BIM.
- Al trabajar con una única plataforma de diseño, el modelo 3D y los datos están unidos durante los procesos de consultas.
- Combinación de elementos significativos del patrimonio 3D con la taxonomía Getty AAT, permitiendo no solo la automatización sino la coherencia en la catalogación de los elementos requeridos, así como una recuperación más eficiente de la información de forma estandarizada.
- Compatibilidad entre los programas BIM y las tecnologías RV y AR, lo que permite una interacción más amigable entre el modelo virtual y los ciudadanos.

### 6.2.4. Oportunidades

- Correspondencia de esta tesis con el programa marco de investigación H2020 de la UE bajo el proyecto INCEPTION. En particular, el proyecto INCEPTION incluye un enfoque especial en la interoperabilidad gráfica, semántica y topológica HBIM, y entre sus objetivos está contribuir al vocabulario Getty para expandir el contenido e información de la taxonomía Getty AAT.
- Difusión del patrimonio modelado y documentado, a través de organismos responsables, tales como el Ministerio de Educación, Cultura y Deporte, y el IPCE en el caso de España; y la UNESCO, ICOMOS Y CIPA en el caso internacional.

- Fortalecer el mantenimiento y rehabilitación del patrimonio arquitectónico, formando una biblioteca HBIM universal y de libre acceso que mantenga actualizada la información de cada elemento útil para las actividades de gestión del proyecto.
- Intensificación en la investigación sobre la utilización de BIM en los procesos de gestión y modelado paramétrico de los edificios nuevos y existentes.

### 6.3. Trabajos futuros

Hay algunas líneas de trabajos futuros que se podrían seguir a partir de esta tesis para avanzar en la metodología desarrollada para el modelado paramétrico de los edificios existentes.

La incorporación de catálogos y procedimientos al programa Revit que permitan enlazar los componentes de la biblioteca HBIM resultante, con otras bases de datos históricas desarrolladas en el dominio de las demás plataformas de autoría BIM, es un paso significativo hacia el intercambio de información en tiempo real entre varios paquetes de *software*. Asimismo, estas incorporaciones incluirán acceso rápido a familias de patrimonio y herramientas útiles para crear, por ejemplo, diferentes tipos de matrices de elementos. Para ello, los *kits de desarrollo de software* (SDK) correspondiente para programar la *interfaz de programación de aplicaciones* (API) de BIM se puede usar directamente o aplicar herramientas que faciliten estos desarrollos (como el *software* de código abierto Dynamo®)<sup>51</sup> expandiendo así el mundo digital donde los investigadores o expertos en el contexto de AEC puedan interactuar con respecto al patrimonio arquitectónico en cualquier momento, en cualquier lugar y con cualquier dispositivo, garantizando de este modo la valorización del patrimonio cultural. El seguimiento del progreso, monitorización, ciclo de vida o demolición de un edificio existente, a través del modelo virtual BIM, también representa las tendencias de investigaciones futuras.

Además, otros enfoques realistas para el futuro del patrimonio arquitectónico serían la implementación de redes neuronales y la creación de algoritmos de aprendizaje y reconocimiento de forma para automatizar la conversión de las superficies de nubes de punto en modelos paramétricos BIM *as-is* evitando de esta manera tareas rutinarias que a menudo son procesos que requieren mucho tiempo. La automatización de la nube de puntos se considera una solución muy deseable

---

<sup>51</sup> Dynamo. URL: <http://dynamobim.org/>. [En línea] Acceso 10/05/2018.



comercialmente para acelerar y reducir los costos del modelado BIM de los edificios existentes (Thomson & Boehm, 2015).

En este contexto, otro aspecto importante sería la necesidad de crear una biblioteca HBIM universal (con todos los estilos arquitectónicos), estandarizada y de libre acceso que contenga toda la información útil para arquitectos, diseñadores, arqueólogos, historiadores, ingenieros y conservadores del patrimonio arquitectónico. Para el propósito de gestión y modelado tridimensional del patrimonio arquitectónico, las tendencias futuras también deberían considerar el avance en las tecnologías web como PetroBIM y en las aplicaciones BIM para dispositivos móviles. Los avances en los dispositivos móviles permitirán, a través de la RV y AR, presentar virtualmente escenarios futuros de intervenciones arquitectónicas. En consecuencia, estas herramientas de vanguardia podrán ser utilizada para la interacción entre el modelo virtual y el público en general.

En definitiva, esta investigación ha servido para demostrar el beneficio que tiene el modelado paramétrico de los componentes arquitectónicos de los edificios históricos a partir del uso de las nubes de punto. Además, ha explicado y sintetizado cuales deberían ser los pasos futuros, para lograr automatizar el modelado de las nubes de puntos y para estimular la implementación de BIM como vanguardia, en los edificios existentes.

## Referencias

- Abdelhafiz, A., & Hassan, T. (2018). Two points registration algorithm for terrestrial laser scanner point clouds. *Survey Review*, 1-6.
- AIA, A. (2008). Document E202-2008. Building Information Modeling Protocol Exhibit, Washington, DC: American Institute of Architects.
- Aicardi, I., Chiabrando, F., Lingua, A. M., & Noardo, F. (2018). Recent trends in cultural heritage 3D survey: The photogrammetric computer vision approach. *Journal of Cultural Heritage*.
- Akin, O. (2010). Current Trends and Future Directions in CAD. En *CAD and GIS Integration.s. 1.*: CRC Press, pp. 1-21.
- Allen, P. K., Troccoli, A., Smith, B., Murray, S., Stamos, I. & Leordeanu, M. (2003). 'New Methods for Digital Modeling of Historic Sites', *IEEE Comput. Graph. Appl.*, 23(6), pp. 32-41.
- Alsadik, B., Gerke, M., & Vosselman, G. (2013). Automated camera network design for of cultural heritage objects. *Journal of Cultural Heritage*, 14(6), 515-526.
- Amano, K. & Lou, E. (2016). BIM for existing facilities: feasibility of spectral image integration to 3D point cloud data, *MATEC web of Conferences - the 4th International Building Control Conference 2016 7–8 March*, EDP Sciences, Kuala Lumpur, Malaysia, 2016, pp. 0–5, , <http://dx.doi.org/10.1051/mateconf/20166600024>.
- Anil, E.B., Tang, P., Akinci, B., & Huber, D. (2011). Assessment of the quality of as-is building information models generated from point clouds using deviation analysis, in: *Proceedings of SPIE*. San Jose, California, USA, p. 78640F–13. Doi:10.1117/12.876554.
- Anil, E. B., Tang, P., Akinci, B., & Huber, D. (2013). Deviation analysis method for the assessment of the quality of the as-is Building Information Models generated from point cloud data. *Automation in construction*, 35, 507-516.
- AUTODESK. (2018). BIM AND THE FUTURE OF AEC. What is BIM?. URL: <https://www.autodesk.com/solutions/bim>. [En línea] Acceso: 07/01/2018.
- Azhar, S. (2011). Building information modeling (BIM): Trends, benefits, risks, and challenges for the AEC industry. *Leadership and Management in Engineering*, 11(3), 241-252.
- Baik, A., Alitany, A., Boehm, J., & Robson, S. (2014). Jeddah Historical Building Information Modelling "JHBIM" – Object Library. In: *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. (pp. 41 - 47). International Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ISPRS): Riva del Garda, Italy. Doi: [10.5194/isprsannals-II-5-41-2014](https://doi.org/10.5194/isprsannals-II-5-41-2014).
- Baik, A., Yaagoubi R. & Boehm, J. (2015). Integration of Jeddah Historical BIM and 3D GIS for Documentation and Restoration of Historical Monument. *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 40(5) 29. Doi:10.5194/isprsarchives-XL-5-W7-29-2015.
- Balletti, C., Guerra, F., Vernier, P., Studnicka, N., Riegl, J., & Orlandini, S. (2004). Practical comparative evaluation of an integrated hybrid sensor based on Photogrammetry and Laser Scanning for Architectural Representation. In *ISPRS, International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*”, Commission V, ISPRS XX Congress, Istanbul, Turchia (pp. 12-23).

Barazzetti, L., Banfi, F., Brumana, R., Gusmeroli, G., Previtali, M., & Schiantarelli, G. (2015). Cloud-to-BIM-to-FEM: Structural simulation with accurate historic BIM from laser scans. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 57, 71-87.

Barazzetti, L. (2016). Parametric as-built model generation of complex shapes from point clouds. *Advanced Engineering Informatics*, 30(3), 298-311.

Barazzetti, L., Banfi, F., Brumana, R., Roncoroni, F., & Previtali, M. (2016). BIM from laser scans... not just for buildings: NURBS-based parametric modeling of a medieval bridge. In *ISPRS Conference* (pp. 51-56).

Baselga, S., Garrigues, P., Berné, J. L., Anquela, A. B., & Martín, A. (2011). Deformation monitoring in historic buildings: A case study. *Survey Review*, 43(323), 484-492. <http://dx.doi.org/10.1179/003962611X13117748891912>.

Becerik-Gerber, B., & Rice, S. (2010). The perceived value of building information modeling in the US building industry. *Journal of Information Technology in Construction (ITcon)*, 15(15), 185-201.

Besl, P.J., & McKay, N.D. (1992). A method for registration of 3-D shapes. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 14, 239-256. <https://doi.org/10.1117/12.57955>.

Bhatla, A., Choe, S. Y., Fierro, O., & Leite, F. (2012). Evaluation of accuracy of as-built 3D modeling from photos taken by handheld digital cameras. *Automation in construction*, 28, 116-127.

Bianchini, C. (2014). Survey, modeling, interpretation as multidisciplinary components of a Knowledge System. *SCIRES-IT-SCientific RESearch and Information Technology*, 4(1), 15-24.

Bianchini, C., Borgogni, F., Ippolito, A., & Senatore, L. J. (2014). The surveying and representation process applied to archaeology: a quest for invariants in a highly variable context. In *Computational Modeling of Objects Presented in Images* (pp. 1-29). Springer, Cham.

BIM FORUM. (2016). Level of Development Specification. pp. 11-13. URL: <https://bimforum.org/lod/>. [En línea] Acceso: 12/04/2017.

BIM Industry Working Group. (2011). A report for the Government Construction Client Group Building Information Modelling (BIM) Working Party Strategy Paper, Communications. London, UK.

Bozoglu, J. (2016). Collaboration and coordination learning modules for BIM education. *Journal of Information Technology in Construction (ITcon)*, 21(10), 152-163.

Böhler, W., & Marbs, A. (2002). 3D scanning instruments, in: *Proceedings of the CIPA WG 6 International Workshop on Scanning for Cultural Heritage Recording*. Corfu, Greece, pp. 9-18. URL: [http://www.i3mainz.fh-mainz.de/publicat/korfu/p05\\_Boehler.pdf](http://www.i3mainz.fh-mainz.de/publicat/korfu/p05_Boehler.pdf).

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.

Brusaporci, S. (Ed.). (2017). *Digital Innovations in Architectural Heritage Conservation: Emerging Research and Opportunities: Emerging Research and Opportunities*. IGI Global.

Bryde, D., Broquetas, M. & Volm, J.M. (2013). The project benefits of building information modelling (BIM), *Int. J. Project Manage.* 31 (7) 971-980.

BuildingSMART Internationl. (2013). Industry Foundation Classes (IFC) for Data Sharing in the Construction and Facility Management Industries (ISO 16739:2013).

Cera, V., & Campi, M. (2017). Evaluating the Potential of Imaging Rover for Automatic Point Cloud Generation. *ISPRS-International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 147-154.

Chevrier, C., Charbonneau, N., Grussenmeyer, P., & Perrin, J. P. (2010). Parametric documenting of built heritage: 3D virtual reconstruction of architectural details. *International Journal of Architectural Computing*, 8(2), 135-150.

Cobos Guerra, F & Retuerce Velasco, M. (2011). Metodología, valoración y criterios de intervención en la arquitectura fortificada de Castilla y León. Catálogo de las provincias de León, Salamanca, Valladolid y Zamora Edición digital Junta de Castilla y León. Valladolid 2011.

De Masi, A. (2015). From knowledge to complex representation interpretation of material systems, survey guidelines and reading criteria, multi-representations of 3D city models for Cultural Heritage. In *Digital Heritage*, 2, 133-136. IEEE.

De Villena, I. D. C. M. (2001). Topografía de obras (Vol. 117). Univ. Politèc. de Catalunya.

Dimitrov, A., & Golparvar-Fard, M. (2015). Segmentation of building point cloud models including detailed architectural/structural features and MEP systems. *Automation in Construction*, 51, 32-45.

Dore, C. (2017). Procedural Historic Building Information Modelling (HBIM) For Recording and Documenting European Classical Architecture.

Dore, C., & Murphy, M. (2012). Integration of HBIM and 3D GIS for digital heritage modelling. Proceeding of at Digital Documentation International Conference, Edinburgh 22-23 October 2012.

Dore, C., & Murphy, M. (2013). Semi-automatic modelling of building facades with shape grammars using historic building information modelling. *ISPRS International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science*, 40, 5.

Dore, C. & Murphy, M. (2014). Semi-Automatic Generation of As-Built BIM Façade Geometry From Laser and Image Data. *Journal of Information Technology in Construction*, 19, pp. 20-46. Available: <http://www.int-arch-photogramm-remote-sens-spatial-inf-sci.net/XL-5-W1/57/2013/isprsarchives-XL-5-W1-57-2013.pdf> [9/20, 2015].

Eadie, R., Browne, M., Odeyinka, H., McKeown, C., & McNiff, S. (2013). BIM implementation throughout the UK construction project lifecycle: An analysis. *Automation in Construction*, 36, 145-151.

East, W., & Carrasquillo-Mangual, M. (2013). The COBie guide: A commentary to the NBIMS-US COBie standard (release 3). buildingSMARTalliance and National Institute of Building Sciences.

Eastman, C.M., Teicholz, P., Sacks, R., Liston, K., (2011). *BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Managers, Designers, Engineers and Contractors*, Second Ed. ed. John Wiley and Sons. Hoboken, New Jersey, USA.

El-Hakim, S., Gonzo, L. Voltolini, F., Girardi, S., Rrizzi, A., Remondino, F., & Whiting, E. (2007). Detailed 3D Modelling of Castles. *International Journal of Architectural Computing* 5 (2), pp. 200-220.

EUBIM taskgroup. (2017). Handbook for the introduction of Building Information Modelling by the European Public Sector. Report. URL: [http://www.eubim.eu/downloads/EU\\_BIM\\_Task\\_Group\\_Handbook\\_FINAL.PDF](http://www.eubim.eu/downloads/EU_BIM_Task_Group_Handbook_FINAL.PDF). [En línea] Acceso: 07/01/2018.

Fai, S., Graham, K., Duckworth, T., Wood, N., & Attar, R. (2011). Building information modelling and heritage documentation. In Proceedings of the 23rd International Symposium, International Scientific Committee for Documentation of Cultural Heritage (CIPA), Prague, Czech Republic (pp. 12-16).

Farjas, Martin. (2003). Teoría de Levantamientos Topográficos. Madrid. Ediciones Técnicas y Científicas.

Furukawa, Y., Curless, B., Seitz, S. M., & Szeliski, R. (2009). Reconstructing building interiors from images. In Computer Vision, 2009, September IEEE 12th International Conference on (pp. 80-87). IEEE.

Gant, M. L. B. (2013). Los museos y los nuevos medios: paradigmas del conocimiento y la difusión. Sociedad: boletín de la Sociedad de Amigos de la Cultura de Vélez-Málaga, (12), 27-30.

Garagnani, S. (2013). Building Information Modeling and real world knowledge: A methodological approach to accurate semantic documentation for the built environment. In *Digital Heritage International Congress* (DigitalHeritage), 2013(Vol. 1, pp. 489-496). IEEE.

García Ortega, A. J., & Ruíz de la Rosa, J. A. (2009). Diseño estructural en el primer gótico andaluz (I): Reglas y proporción. EGA: revista de expresión gráfica arquitectónica, 14, 100-107.

García Ortega, A. J., & Ruíz de la Rosa, J. A. (2010). Diseño estructural en el primer gótico andaluz (II): Maestros y medidas. EGA: revista de expresión gráfica arquitectónica, 15, 46-53.

Golparvar-Fard, M., Bohn, J., Teizer, J., Savarese, S., & Peña-Mora, F. (2011). Evaluation of image-based modeling and laser scanning accuracy for emerging automated performance monitoring techniques. *Automation in Construction*, 20(8), 1143-1155.

Gomes, A.J.P. & Teixeira, J.C.G. (1991). Form feature modelling in a hybrid CSG/BRep scheme, *Computers & Graphics*, Vol. 15, Issue 2, pp. 217-229.

Gómez-García-Bermejo, J., Zalama, E., & Feliz, R. (2013). Automated registration of 3D scans using geometric features and normalized color data. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 28(2), 98-111.

Gray, M., Gray, J., Teo, M., Chi, S., & Cheung, Y. K. F. (2013). Building information modelling: an international survey.

Grussenmeyer, P., Landes, T., Voegtle, T., & Ringle, K. (2008). Comparison methods of terrestrial laser scanning, photogrammetry and tacheometry data for recording of cultural heritage buildings. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Vol. XXXVII. Part B5. Beijing, pp. 213-218.

Grussenmeyer, P. & Hanke, K. (2010). 'Cultural Heritage Applications', in Maas, G.V.a.H.-G. (ed.) *Airborne and Terrestrial Laser Scanning*: Wittles Publishing, pp. 271-272.

Guarnieri, A., Milan, N., & Vettore, A. (2013). Monitoring of complex structure for structural control using terrestrial laser scanning (TLS) and photogrammetry. *International Journal of Architectural Heritage*, 7(1), 54-67.

- Guidi, G., Russo, M., & Angheluddu, D. (2014). 3D survey and virtual reconstruction of archeological sites. *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*, 1(2), 55-69.
- Hanke, K., & Oberschneider, M. (2002). The Medieval Fortress Kufstein, Austria - An Example for the Restitution and Visualization of Cultural Heritage. In: *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. (34) 5, pp. 530-533.
- Hichri, N., Stefani, C., De Luca, L., & Veron, P. (2013). REVIEW OF THE « AS-BUILT BIM » APPROACHES. *Proceedings of the 3D-ARCH- 3D Virtual Reconstruction and Visualization of Complex Architectures*. International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Trento, Italy, pp. 107–112.
- Hong, S., Jung, J., Kim, S., Cho, H., Lee, J. & Heo, J. (2015) 'Semi-automated approach to indoor mapping for 3D as-built building information modeling', *Computers, Environment and Urban Systems*, 51, pp. 34-46.
- Hosseini, M. R., Roelvink, R., Papadonikolaki, E., Edwards, D. J., & Parn, E. (2018). Integrating BIM into facility management: typology matrix of information handover requirements. *International Journal of Building Pathology and Adaptation*, (just-accepted), 00-00.
- Ibáñez, A. J. P., Bernal, J. M. M., de Diego, M. J. C., & Sánchez, F. J. A. (2015). Expert system for predicting buildings service life under ISO 31000 standard. Application in architectural heritage. *Journal of Cultural Heritage*.
- ICOMOS. (1964). International charter for the conservation and restoration of monuments and sites (The Venice Charter 1964). In 2nd International Congress of Architects & Technicians of Historic Monuments.
- Institution of Civil Engineers. (2014). What is Building Information Modeling?. ICE BIM 2014. URL: <http://www.ice-conferences.com/ICE-BIM-2014/What-is-BIM/>. [En línea] Acceso: 12/12/2017.
- Jung, J., Hong, S., Jeong, S., Kim, S., Cho, H., Hong, S. & Heo, J. (2014). 'Productive modeling for development of as-built BIM of existing indoor structures', *Automation in Construction*, 42(0), pp. 68-77. <http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2014.02.021>.
- Kassem, M., Kelly, G., Dawood, N., Serginson, M., & Lockley, S. (2015). BIM in facilities management applications: a case study of a large university complex. *Built Environment Project and Asset Management*, 5(3), 261-277.
- Kawaguchi, K., Ohsaki, M., & Takeuchi, T. (2016). BIM application to the membrane roof—A practical case study of the Anaheim Regional Transportation Intermodel Center (ARTIC).
- Kersten, T. (2006). Combination and Comparison of Digital Photogrammetry and Terrestrial Laser Scanning for the Generation of Virtual Models in Cultural Heritage Applications. *The 7th International Symposium on Virtual Reality, Archaeology and Cultural Heritage, VAST (2006)*, pp. 207–214.
- Klein, L., Li, N. & Becerik-Gerber, B. (2012). 'Imaged-based verification of as-built documentation of operational buildings', *Automation in Construction*, 21(0), pp. 161-171.
- Laidlaw, D. H., Trumbore, W. B., & Hughes, J. F. (1986). Constructive solid geometry for polyhedral objects. In *ACM SIGGRAPH computer graphics* Vol. 20, No. 4, pp. 161-170 . ACM.
- Larsen, K.E., Lattke, F., Ott, S., & Winter, S. (2011). Surveying and digital workflow in energy performance retrofit projects using prefabricated elements. *Automation in Construction* 20, 999–1011. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2011.04.001>.

LeBlanc, F., & Eppich, R. (2005). Documenting our past for the future. *The GCI Newsletter*, 20(3), 5-9. Los Angeles: The Getty Conservation Institute. URL: [www.getty.edu/conservation/publications/newsletters/20\\_3/feature.html](http://www.getty.edu/conservation/publications/newsletters/20_3/feature.html). [En línea] Acceso: 11/12/ 2017.

Letellier, R., Schmid, W. & LeBlanc, F., (2007). Recording, documentation & information management for the conservation of heritage places: Guiding principles, J. Paul Getty Trust.

Lerones, P. M., Fernández, J. L., Gil, Á. M., Gómez-García-Bermejo, J., & Casanova, E. Z. (2010). A practical approach to making accurate 3D layouts of interesting cultural heritage sites through digital models. *Journal of Cultural Heritage*, 11(1), 1-9.

Lerones, P. M., Llamas, J., Gómez-García-Bermejo, J., Zalama, E., & Oli, J. C. (2014). Using 3D digital models for the virtual restoration of polychrome in interesting cultural sites. *Journal of Cultural Heritage*, 15(2), 196-198.

Livieratos, E. (1992). "Empiric, Topographic or Photogrammetric recording? Answers to properly phrased," in *Terrestrial Photogrammetry and Geographic Information*, Thessaloniki, Greece.

Logothetis, S., Delinasiou, A., & Stylianidis, E. (2015). Building Information Modelling for Cultural Heritage: A review. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2(5), 177.

Logothetis, S., & Stylianidis, E. (2016). BIM Open Source Software (OSS) for the documentation of cultural heritage. *Virtual Archaeology Review*, 7(15), 28-35.

Logothetis, S., Karachaliou, E., & Stylianidis, E. (2017). From OSS CAD to BIM for cultural heritage digital representation. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 3D Virtual Reconstruction and Visualization of Complex Architectures, 1-3.

López, F. J., Lerones, P. M., Llamas, J., Gómez-García-Bermejo, J., & Zalama, E. (2017). A framework for using point cloud data of Heritage buildings towards geometry modeling in a BIM context: a case study on Santa María la Real de Mave Church. *International Journal of Architectural Heritage*. <http://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/15583058.2017.1325541>.

López, F. J., Lerones, P. M., Llamas, J., Gómez-García-Bermejo, J., & Zalama, E. (2018). A review of Heritage Building Information Modeling (H-BIM). Special Issue of the journal *Multimodal Technologies and Interaction on the subject of Digital Cultural Heritage*. *Multimodal Technologies Interact.* 2018, 2(2), 21 <https://doi.org/10.3390/mti2020021>.

López Sorzano, M. C., García Schiller, C., & Serpa Isaza, E. (2005). *Manual para inventarios de bienes culturales muebles*.

Lowell, K. (2017). A socio-environmental monitoring system for a UNESCO biosphere reserve. *Environmental Monitoring and Assessment*, 189(12), 601. <https://doi.org/10.1007/s10661-017-6200-3>.

Luhmann, T., Robson, S., Kyle, S., & Boehm, J. (2013). *Close-range photogrammetry and 3D imaging*. Walter de Gruyter.

Macher, H., Landes, T., Grussenmeyer, P., & Alby, E. (2014). Semi-automatic segmentation and modelling from point clouds towards historical building information modelling. In *Euro-Mediterranean Conference* (pp. 111-120). Springer, Cham.

Macher, H., Landes, T., & Grussenmeyer, P. (2017). From Point Clouds to Building Information Models: 3D Semi-Automatic Reconstruction of Indoors of Existing Buildings. *Applied Sciences*, 7(10), 1030.

Mahdjoubi, L., Moobela, C., & Laing, R. (2013). Providing real-estate services through the integration of 3D laser scanning and building information modelling. *Computers in Industry*, 64(9), 1272-1281.

Martín, A. G., Campoy, M. R., & Vázquez, F. E. S. (1994). *Topografía básica para ingenieros* (Vol. 42). EDITUM.

Mata, E., Hernández, M.A., Perez-García, J.L., & Cardenal, J. (2008). Low cost automatized system for control points capture in close range photogrammetry. *Internacional Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XXXVII, B5, 107- 110, Beijing, 2008.

Merchán, P., Salamanca, S., Merchán, M. J., Pérez, E. & Moreno, M. D. (2018). PASADO, PRESENTE Y FUTURO DE LOS HBIM (HERITAGE/HISTORIC BUILDING INFORMATION MODELS). Proceedings of the XXXIX Actas de las Jornadas de Automática, Badajoz, España, 5-7 de septiembre de 2018. URL: [http://eii.unex.es/ja2018/actas/JA2018\\_140.pdf](http://eii.unex.es/ja2018/actas/JA2018_140.pdf). [En línea] Acceso: 08/09/2018.

Mukupa, W., Roberts, G. W., Hancock C. M. & Al-Manasir, K. (2017). A review of the use of terrestrial laser scanning application for change detection and deformation monitoring of structures, *Survey Review*, 49(353), 99-116: DOI: 10.1080/00396265.2015.1133039.

Muñoz, F. J. P., & Poza, M. J. A. (2011). El castillo de Navarredonda (San Martín de Valdeiglesias). Una fortaleza medieval inédita en la Comunidad de Madrid. In *Actas de las octavas jornadas de Patrimonio Arqueológico en la Comunidad de Madrid* (pp. 417-430). Consejería de Cultura y Deportes. Dirección General de Patrimonio Histórico.

Murphy, M., McGovern, E., & Pavia, S. (2009). Historic building information modelling (HBIM). *Structural Survey*, 27(4), 311-327.

Murphy, M., McGovern, E., & Pavia, S. (2011). Historic building information modelling-adding intelligence to laser and image based surveys. *ISPRS-International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 3816, 1-7.

Navarro, Z. E. (2010). Un nuevo uso para el " Castillo Comunero" de Torrelobatón, Valladolid. *Estudios del Patrimonio Cultural*, (5), 31-53.

Nawari , N. O. (2014). Synthesizing Aspects and Constraints of Structural Design Using BIM and a Proposed Framework in Education. In R. R. Olbina (Ed.), Accepted In "Building Information Modeling: Applications and Practices in the AEC Industry. American Society of Civil Engineers (ASCE). doi:10.1061/9780784413982.

NBIMS. "About the National BIM Standard-United States". URL: <https://www.nationalbimstandard.org/faqs#faq1>. [En línea] Acceso: 07/01/2017.

Ochmann, S., Vock, R., Wessel, R., Leander Evers, H., Nergård, H., & Törlind, P. (2014). *Documenting the Changing State of Built Architecture—Software Prototype v1*; Durable Architectural Knowledge (DURAARK); pp. 20–23. URL: [http://duraark.eu/wp-content/uploads/2014/02/duraark\\_d4.4.1\\_final.pdf](http://duraark.eu/wp-content/uploads/2014/02/duraark_d4.4.1_final.pdf). [En línea] Acceso: 12/11/2016.

Oreni, D., Brumana, R., Georgopoulos, A., & Cuca, B. (2013). HBIM for conservation and management of built heritage: Towards a library of vaults and wooden beam floors. *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 5, 215-221.

Oreni, D., Brumana, R., Della Torre, S., Banfi, F., & Previtali, M. (2014). Survey turned into HBIM: the restoration and the work involved concerning the Basilica di Collemaggio after the earthquake



(L'Aquila). ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2(5), 267-273.

Osello, A., (2012). The future of drawing with BIM for Engineers and Architects. Dario Flaccovio Editore s.r.l.

PAS 1192-2. (2013). Specification for information management for the capital/delivery phase of construction projects using building information modelling. URL: [https://www.bimhealth.co.uk/uploads/pdfs/PAS\\_1192\\_2\\_2013.pdf](https://www.bimhealth.co.uk/uploads/pdfs/PAS_1192_2_2013.pdf). [En línea] Acceso: 17/03/2018.

PAS 1192-5. (2015). A specification for security-minded building information modelling, digital built environments and smart asset management. URL: <https://www.cpni.gov.uk/system/files/documents/18/6f/BIM-Introduction-To-PAS1192-5.pdf>. [En línea] Acceso: 17/03/2018.

Patias, P. Grussenmeyer, P., & Hanke, K. (2008). Applications in Cultural Heritage Documentation. En: Advances in Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information sciences: 2008 ISPRS Congress Book. Eds. Li, Chen y Baltasvias. Cap. 27, 363-383. CRC Press, Taylor and Francis Gr. London.

Park, Y. N., Lee, Y. S., Kim, J. J., & Lee, T. S. (2018). The structure and knowledge flow of building information modeling based on patent citation network analysis. *Automation in Construction*, 87, 215-224.

Pauwels, P., Verstraeten, R., De Meyer, R., & Van Campenhout, J. (2008). Architectural information modelling for virtual heritage application. In International Conference on Virtual Systems and Multimedia (VSMM) (pp. 18-23). Archaeolingua.

Percy, K., Ward, S., Quintero, M. S., & Morrison, T. (2015). Integrated Digital Technologies for the Architectural Rehabilitation & Conservation of Beinn Bhreagh Hall & Surrounding Site, Nova Scotia, Canada. ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2(5), 235.

Pezeshki, Z. & Ivari, S. A. S. (2016). Applications of BIM: A Brief Review and Future Outline, *Archives of Computational Methods in Engineering*, 1 40.

Pu, S. & Vosselman, G. (2009). 'Knowledge based reconstruction of building models from terrestrial laser scanning data', ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 64(6), pp. 575 - 584.

Puerto, F. P., Fornos, R. A., Román, M. C., Dorado, J. A. A., & Lopes, P. F. (2016). Using BIM and GIS to Research and Teach Architecture. In *Congreso Internacional de Expresión Gráfica Arquitectónica* (pp. 699-711). Springer, Cham.

Pritchard, D., Sperner, J., Hoepner, S., & Tenschert, R. (2017). Terrestrial laser scanning for heritage conservation: the Cologne Cathedral documentation project. ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences, 4, 213.

Pärn, E. A., & Edwards, D. J. (2017). Conceptualising the FinDD API plug-in: A study of BIM-FM integration. *Automation in Construction*, 80, 11-21.

Quattrini, R., & Baleani, E. (2015). Theoretical background and historical analysis for 3D reconstruction model. Villa Thiene at Cicogna. *Journal of Cultural Heritage*, 16(1), 119-125.

Quattrini, R., Malinverni, E. S., Clini, P., Nespeca, R., & Orlietti, E. (2015). FROM TLS TO HBIM. HIGH QUALITY SEMANTICALLY-AWARE 3D MODELING OF COMPLEX ARCHITECTURE. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*.

- Quattrini, R., Pierdicca, R., & Morbidoni, C. (2017). Knowledge-based data enrichment for HBIM: Exploring high-quality models using the semantic-web, *Journal of Cultural Heritage*. <http://dx.doi.org/10.1016/j.culher.2017.05.004>.
- Redondo, M., Javier, F., Menéndez, V., Álvarez, R., Fernández, A., & Fernández-jardón, G. (2016). PLATAFORMA VIRTUAL PARA EL DISEÑO, PLANIFICACIÓN, CONTROL, INTERVENCIÓN Y MANTENIMIENTO EN EL ÁMBITO DE LA CONSERVACIÓN DEL PATRIMONIO HISTÓRICO “PETROBIM”. Proceedings of the Congreso Euro-Americano REHABEND, Burgos, España, 24-27 de Mayo de 2016. Pp. 1–9.
- Remondino, F. & El-Hakim, S. F. (2006). Image-Based 3D Modelling: A Review. *The Photogrammetric Record Journal*, 21, 269-291.
- Rivera, B., Merchán, P., Salamanca, S., Pérez, E., Moreno, M. D. & Merchán, M. J. (2018). CREACIÓN DE BIBLIOTECAS DE OBJETOS PARAMÉTRICOS PARA SU INTEGRACIÓN EN MODELOS HBIM. Proceedings of the XXXIX Actas de las Jornadas de Automática, Badajoz, España, 5-7 de septiembre de 2018. URL: [http://eii.unex.es/ja2018/actas/JA2018\\_138.pdf](http://eii.unex.es/ja2018/actas/JA2018_138.pdf). [En línea] Acceso: 08/09/2018.
- Rodríguez-Moreno, C., Reinoso-Gordo, J. F., Rivas-López, E., Gómez-Blanco, A., Ariza-López, F. J., & Ariza-López, I. (2016). From point cloud to BIM: an integrated workflow for documentation, research and modelling of architectural heritage. *Survey Review*, 1-20.
- Rua, H., & Gil, A. (2014). Automation in heritage–Parametric and associative design strategies to model inaccessible monuments: The case-study of eighteenth-century Lisbon Águas Livres Aqueduct. *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*, 1(3), 82-91.
- Ruiz Torres, D. (2011). Realidad aumentada y Patrimonio Cultural: nuevas perspectivas para el conocimiento y la difusión del objeto cultural. *e-rph: Revista Electrónica de Patrimonio Histórico.*, (8), 92-113.
- Sacks, R., Eastman, C. M., & Lee, G. (2004). Parametric 3D modeling in building construction with examples from precast concrete. *Automation in construction*, 13(3), 291-312.
- Schueremans, L., Van Balen, K., Brosens, K., Van Gemert, D., & Smars, P. (2007). Church of Saint-James at Leuven: Structural assessment and consolidation measures. *International Journal of Architectural Heritage*, 1(1), 82-107.
- Schuhmacher, S. & Böhm, J. (2005). Geo-referencing of terrestrial laser scanner data for applications in architectural modeling. 3D-ARCH 2005. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Vol. XXXVI, 5/W17.
- Shishido, H., Ito, Y., Kawamura, Y., Matsui, T., Morishima, A., & Kitahara, I. (2017). Proactive preservation of world heritage by crowdsourcing and 3D reconstruction technology. In *Big Data (Big Data)*, IEEE International Conference on (pp. 4426-4428). IEEE.
- Simeone, D., Cursi, S., Toldo, I., & Carrara, G. (2014). BIM and knowledge management for building heritage. In Proceedings of the 34th Annual Conference of the Association for Computer Aided Design in Architecture, Los Angeles, CA, USA, 23–25 October. ACADIA, Vol. 2014, pp. 681-690.
- Soust-Verdaguer, B., Llatas, C., & García-Martínez, A. (2017). Critical review of bim-based LCA method to buildings. *Energy and Buildings*, 136, 110-120. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.12.009>.

- Tang, P., Huber, D., Akinci, B., Lipman, R., & Lytle, A. (2010). Automatic reconstruction of as-built building information models from laser-scanned point clouds: A review of related techniques. *Automation in construction*, 19(7), 829-843. <http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2010.06.007>.
- Tapponi, O., Kassem, M., Kelly, G., Dawood, N., & White, B. (2015). Renovation of Heritage Assets using BIM: a Case Study of the Durham Cathedral. Proceedings of the 32nd CIB W78 Conference, Eindhoven, The Netherlands.
- Thomson, C. & Boehm, J. (2015). 'Automatic Geometry Generation from Point Clouds for BIM', *Remote Sensing*, 7(9), pp. 11753.
- Thomson, C. P. H. (2016). From Point Cloud to Building Information Model: Capturing and Processing Survey Data Towards Automation for High Quality 3D Models to Aid a BIM Process (Doctoral dissertation, UCL (University College London)).
- Tomiyama, T., Gu, P., Jin, Y., Lutters, D., Kind, C., & Kimura, F. (2009). Design methodologies: Industrial and educational applications. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 58(2), 543-565.
- Um, D. (2016). 3D Geometric Modeling. In *Solid Modeling and Applications*, pp. 51-92. Springer, Cham.
- Underwood, J. (Ed.). (2009). *Handbook of research on building information modeling and construction informatics: Concepts and technologies: Concepts and technologies*. IGI Global.
- UNESCO. (2011). World Heritage Centre. URL: <https://whc.unesco.org/en/sessions/35com/documents/>. [En línea] Acceso: 21/11/2017.
- UNESCO, ICCROM, ICOMOS & I. U. C. N. (2013). Managing Cultural World Heritage. *World heritage resource manual, Paris*. URL: <https://whc.unesco.org/document/125839>. [En línea] Acceso: 17/09/17.
- Volk, R., Stengel, J., & Schultmann, F. (2014). Building information modeling (BIM) for existing buildings - literature review and future needs, *Automation in Construction* 38, pp. 109–127, <http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2013.10.023>.
- Xiong, X., Adan, A., Akinci, B. & Huber, D. (2013). 'Automatic creation of semantically rich 3D building models from laser scanner data', *Automation in Construction*, 31(0), pp. 325-337.
- Wang, C., Cho, Y. K. & Kim, C. (2015). 'Automatic BIM component extraction from point clouds of existing buildings for sustainability applications', *Automation in Construction*, 56, pp. 1-13. <http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2015.04.001>.
- Watson, A. (2011). Digital buildings—Challenges and opportunities. *Advanced engineering informatics*, 25(4), 573-581.
- Wypysiński, R. (2015). Hybrid modeling in CAD. *Advanced Technologies in Mechanics*, 2(1 (2)), 15-22.
- Zawadzki, T., Nikiel, S., & Warszawski, K. (2012). Hybrid of shape grammar and morphing for procedural modeling of 3d caves. *Transactions in GIS*, 16(5), 619-633.
- Zheliazkova, M., Naboni, R., & Paoletti, I. (2015). A parametric-assisted method for 3D generation of as-built BIM models for the built heritage. *WIT Transactions on The Built Environment*, 153, 693-704.

## Webgrafía

Diagrama BIM. URL: <http://www.grupoditecsa.com/es/metodologia-bim-renovarse-o-morir/>. [En línea] Acceso: 15/03/2018.

Arquivolta. URL: <http://dentrodemochila.blogspot.com.es/2015/03/>. [En línea] Acceso: 07/04/2018.

Capitel. URL: <http://www.arquivoltas.com/8-palencia/Mave%20G05.jpg>. [En línea] Acceso: 07/04/2018.

Muro. URL: [https://i0.wp.com/castillosdelolvido.com/wp-content/uploads/2015/09/Castillo-de-Torrelobato%CC%81n\\_3156.jpg](https://i0.wp.com/castillosdelolvido.com/wp-content/uploads/2015/09/Castillo-de-Torrelobato%CC%81n_3156.jpg). [En línea] Acceso: 07/04/2018.

Fachada Iglesia Santa María la Real de Mave. URL: <http://www.flickriver.com/photos/rabiespierre/tags/klaster/>. [En línea] Acceso: 13/08/2016.

Emplazamiento Iglesia Santa María la Real de Mave. URL: <http://www.bing.com/maps/>. [En línea] Acceso: 13/08/2016.

Vista sur Castillo Torrelobatón. URL: <https://jesusantaroca.files.wordpress.com/2015/04/2-crop1.jpg>. [En línea] Acceso: 21/07/2017.

Emplazamiento Castillo Torrelobatón: URL: <https://www.google.es/maps/@41.6504048,-5.0257042,390m/data=!3m1!1e3!5m1!1e4?hl=es>. [En línea] Acceso: 21/07/2017.

The Getty Research Institute. URL: <http://www.getty.edu/research/tools/>. [En línea] Acceso: 10/09/2017.

The Getty Research Institute. Contribute to the Getty Vocabularies. URL: <http://www.getty.edu/research/tools/vocabularies/contribute.html>. [En línea] Acceso: 10/09/2017.

UNESCO. URL: <http://whc.unesco.org/>. [En línea] Acceso: 10/01/2018.

ICOMOS: International Council on Monuments and Sites. URL: <http://www.icomos.org/en>. [En línea] Acceso: 27/09/2017.

CIPA (2010). CIPA\_Heritage Documentation: Objectives and Activities. URL: <http://cipa.icomos.org/index.php?id=40>. [En línea] Acceso: 12/09/2017.

Ministerio de Educación, Cultura y Deporte. URL: <http://www.mecd.gob.es/cultura-mecd/areas-cultura/patrimonio/portada.html;jsessionid=FA07DEB4ACA8731E8AC2547762B78559>. [En línea] Acceso: 10/04/2017.

Instituto del Patrimonio Cultural de España (IPCE). URL: <http://ipce.mecd.gob.es/documentacion.html>. [En línea] Acceso: 10/04/2017.

PetroBIM. URL: <http://petrobim.com> [En línea] Acceso: 25/09/2018.

Polywors. URL: [https://www.innovmetric.com/es/productos/polyworks-inspector?gclid=Cj0KCQjwpcLZBRCnARIsAMPBgF08aq7nLWQNFECpoDuJNdgCgLWjYyyS2CCq1sDjbg9qqRxuDC\\_arJIaAnWrEALw\\_wcB](https://www.innovmetric.com/es/productos/polyworks-inspector?gclid=Cj0KCQjwpcLZBRCnARIsAMPBgF08aq7nLWQNFECpoDuJNdgCgLWjYyyS2CCq1sDjbg9qqRxuDC_arJIaAnWrEALw_wcB). [En línea] Acceso: 22/01/2017.

Cyclone. URL: <https://leica-geosystems.com/es-es/products/laser-scanners/software/leica-cyclone>. [En línea] Acceso: 14/11/2017.

Geomagic. URL: <https://es.3dsystems.com/software/geomagic-design-x>. [En línea] Acceso: 14/11/2017.

MATLAB. URL: [https://es.mathworks.com/academia/student\\_version.html](https://es.mathworks.com/academia/student_version.html). [En línea] Acceso: 14/11/2017.

FreeCAD. URL: [https://www.freecadweb.org/?lang=es\\_ES](https://www.freecadweb.org/?lang=es_ES). [En línea] Acceso: 14/11/2017.

MeshLab. Descripción. URL: <http://www.meshlab.net/#description>. [En línea] Acceso: 21/10/2017.

Rhinoceros 3D. URL: <https://www.rhino3d.com/es/>. [En línea] Acceso: 07/10/2016.

Grasshopper. URL: <https://www.grasshopper3d.com/>. [En línea] Acceso: 11/12/2017.

ClearEdge 3D (2011) EdgeWise Plant Suite | ClearEdge 3D. URL: <http://www.clearedge3d.com/products/edgewise-plant-suite/>. [En línea] Acceso 05/02/2018.

eBIM, 2015. Heritage BIM – eBIM [WWW Document]. URL: <http://ebim.co.uk/heritage-bim/>. [En línea]. Acceso: 10/25/2016.

Scan-to-BIM. IMAGINiT, Scan to BIM. URL: <http://www.imaginit.com/software/imaginit-software-other-products/scan-to-bim>. [En línea] Acceso: 12/02/2018.

Programa ArchiCAD. Graphisoft. URL: <https://www.graphisoft.es/archicad/>. [En línea] Acceso 21/12/2017.

Programa Revit. Autodesk. URL: <https://www.autodesk.es/products/revit/overview>. [En línea] Acceso 21/12/2017.

Programa Bentley Architecture. URL: <https://www.bentley.com/en/products/brands/microstation>. [En línea] Acceso 02/02/2018.

Programa Tekla. URL: <https://www.tekla.com/>. [En línea] Acceso 02/02/2018.

ISO Standard. ISO 16739:2013 Industry Foundation Classes (IFC) for Data Sharing in the Construction and Facility Management Industries. International Standard. 2013. URL: <https://www.iso.org/standard/51622.html>. [En línea] Acceso 04/05/2017.

Programa Allplan Architecture. Nemetschek. URL: <https://www.allplan.com/es/>. [En línea] Acceso 02/02/2018.

Programa AutoCAD. Autodesk. URL: <https://www.autodesk.es/products/autocad/overview>. [En línea] Acceso 02/02/2018.

Programa Blender. URL: <https://www.blender.org/>. [En línea] Acceso 02/02/2018.

Inventario del Patrimonio Arquitectónico. URL: <http://www.mcu.es/comun/bases/ipce/IPAA.html>. [En línea] Acceso 10/04/2016.

Portal de Archivos Españoles (PARES). URL: <http://pares.mcu.es/ParesBusquedas20/catalogo/search>. [En línea] Acceso 10/04/2016.

Archivo PARES. URL: <http://pares.mcu.es/ParesBusquedas20/catalogo/autoridad/19683>. [En línea] Acceso 22/06/2016.

Vocabulario Getty AAT. URL: <http://vocab.getty.edu/aat/300003713>.; <http://vocab.getty.edu/aat/300002595>.; <http://vocab.getty.edu/aat/300003636>.; <http://vocab.getty.edu/aat/300002695>.; <http://vocab.getty.edu/aat/300003610>.; <http://vocab.getty.edu/aat/300002504>.; <http://vocab.getty.edu/aat/300101468>.; <http://vocab.getty.edu/aat/300003694>.; <http://vocab.getty.edu/aat/300001393>.; <http://vocab.getty.edu/aat/300001363>. [En línea] Acceso 25/07/2017.

Programa Autodesk 3DS MAX. URL: <https://www.autodesk.es/products/3ds-max/overview>. [En línea] Acceso: 23/06/2018.

Dynamo. URL: <http://dynamobim.org/>. [En línea] Acceso 10/05/2018.