

INTEGRACIÓN DE DATOS MULTIESCALA PARA LA GESTIÓN
DEL PATRIMONIO ARQUITECTÓNICO:
UN MODELO ONTOLÓGICO PARA LA INTEROPERABILIDAD ENTRE
NUBES DE PUNTOS, HBIM, GIS Y BASES DE DATOS DIGITALES



Tesis doctoral

Autor:

Pablo Ariel **Escudero**

Directores:

Dra. María Concepción **López González**

Dr. Jorge Luis **García Valdecabres**

Valencia, marzo 2025



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

Tesis doctoral

Integración de datos multiescala para la gestión del patrimonio arquitectónico:
un modelo ontológico para la interoperabilidad entre nubes de puntos, HBIM, GIS y
bases de datos digitales

*Multiscale Data Integration for Architectural Heritage Management: An Ontological
Model for Interoperability between Point Clouds, HBIM, GIS, and Digital Databases*

Pablo Ariel Escudero

Directores:

Dra. María Concepción López González

Dr. Jorge Luis García Valdecabres

Programa de Doctorado en Arquitectura, Edificación, Patrimonio y Ciudad
Escuela de Doctorado
Universitat Politècnica de València

Valencia, marzo 2025

Financiación: esta investigación ha sido financiada por el proyecto “Análisis y desarrollo de la integración HBIM en SIG para la creación de un protocolo de planificación turística del Patrimonio Cultural de un destino” (ref. PID2020-119088RB-I00), financiado por la Agencia Estatal de Investigación (AEI), Ministerio de Ciencia e Innovación, Gobierno de España, y por la ayuda “Análisis y desarrollo de la integración HBIM en SIG para la creación de un protocolo de planificación turística del Patrimonio Cultural de un destino” (ref. PRE2021-097263), financiada por la Agencia Estatal de Investigación (AEI), Ministerio de Ciencia e Innovación, Gobierno de España.

***Funding:** this research was funded by the project “Análisis y desarrollo de la integración HBIM en SIG para la creación de un protocolo de planificación turística del Patrimonio Cultural de un destino” (ref. PID2020-119088RB-I00), funded by the State Research Agency (AEI), Ministry of Science and Innovation, Government of Spain, and by the grant “Análisis y desarrollo de la integración HBIM en SIG para la creación de un protocolo de planificación turística del Patrimonio Cultural de un destino” (ref. PRE2021-097263), funded by the State Research Agency (AEI), Ministry of Science and Innovation, Government of Spain.*

Agradecimientos

Quiero expresar mi más profundo agradecimiento a mis directores por brindarme esta valiosa oportunidad, a mi familia por su apoyo incondicional, y a la Agencia Estatal de Investigación del Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades de España.

Acknowledgment

I would like to express my deepest gratitude to my supervisors for providing me with this valuable opportunity, to my family for their unconditional support, and to the Spanish State Research Agency of the Ministry of Science, Innovation, and Universities.

Resumen

La gestión del patrimonio arquitectónico enfrenta el desafío de integrar metodologías tradicionales con herramientas digitales avanzadas para optimizar su documentación, conservación y análisis. Esta investigación desarrolla una metodología integral para la gestión y documentación del patrimonio arquitectónico mediante la aplicación de modelos BIM, GIS, nubes de puntos y ontologías semánticas.

En primer lugar, se contextualiza el estudio a través de la evolución histórica del registro patrimonial, el marco normativo y el papel de los Planes Directores en la gestión del patrimonio edificado. Posteriormente, se analiza el uso de herramientas digitales, incluyendo bases de datos, estándares de interoperabilidad y tecnologías como GIS y HBIM, para la estructuración y clasificación de la información arquitectónica. La investigación propone un modelo metodológico basado en la integración de datos espaciales y semánticos, utilizando ontologías para mejorar la organización y accesibilidad del conocimiento sobre el patrimonio inmueble.

Como caso de estudio, se examina la Catedral Metropolitana de Valencia, aplicando la metodología desarrollada en la adquisición y procesamiento de datos, la generación de modelos HBIM y la integración semántica con ontologías. Este enfoque busca validar una metodología que podría contribuir a mejorar la accesibilidad, precisión y eficiencia en la gestión del patrimonio arquitectónico.

Palabras claves: *HBIM, GIS, nubes de puntos, ontologías*

Abstract

The management of architectural heritage faces the challenge of integrating traditional methodologies with advanced digital tools to optimise its documentation, conservation, and analysis. This research develops a comprehensive methodology for the management and documentation of architectural heritage through the application of BIM models, GIS, point clouds, and semantic ontologies.

First, the study is contextualised by examining the historical evolution of heritage recording, the regulatory framework, and the role of Master Plans in the management of built heritage. Subsequently, the use of digital tools is analysed, including databases, interoperability standards, and technologies such as GIS and HBIM, for the structuring and classification of architectural information. The research proposes a methodological model based on the integration of spatial and semantic data, utilising ontologies to enhance the organisation and accessibility of knowledge related to built heritage.

As a case study, the Metropolitan Cathedral of Valencia is examined, applying the developed methodology to data acquisition and processing, the generation of HBIM models, and semantic integration with ontologies. This approach seeks to validate a methodology that could contribute to improving the accessibility, accuracy, and efficiency of architectural heritage management.

Keywords: *HBIM, GIS, point clouds, ontologies*

Resum

La gestió del patrimoni arquitectònic enfronta el desafiament d'integrar metodologies tradicionals amb ferramentes digitals avançades per a optimitzar la seua documentació, conservació i anàlisi. Esta investigació desenrotlla una metodologia integral per a la gestió i documentació del patrimoni arquitectònic mitjançant l'aplicació de models *BIM, *GIS, núvols de punts i ontologies semàntiques.

En primer lloc, es contextualitza l'estudi a través de l'evolució històrica del registre patrimonial, el marc normatiu i el paper dels Plans Directors en la gestió del patrimoni edificat. Posteriorment, s'analitza l'ús de ferramentes digitals, incloent-hi bases de dades, estàndards d'interoperabilitat i tecnologies com *GIS i *HBIM, per a l'estructuració i classificació de la informació arquitectònica. La investigació proposa un model metodològic basat en la integració de dades espacials i semàntiques, utilitzant ontologies per a millorar l'organització i accessibilitat del coneixement sobre el patrimoni immoble.

Com a cas d'estudi, s'examina la Catedral Metropolitana de València, aplicant la metodologia desenrotllada en l'adquisició i processament de dades, la generació de models *HBIM i la integració semàntica amb ontologies. Este enfocament busca validar una metodologia que podria contribuir a millorar l'accessibilitat, precisió i eficiència en la gestió del patrimoni arquitectònic.

Paraules clau: HBIM, GIS, núvols de punt, ontologies

Índice

PARTE I: INTRODUCCIÓN

Capítulo 1. Introducción	2
1.1. Motivación de la investigación	3
1.2. Enfoque conceptual	4
1.3. Objetivos	5
1.4. Metodología	6
1.5. Delimitación de la investigación	6
1.6. Estructura del trabajo	10
	11

PARTE II: BASES CONCEPTUALES Y MARCO NORMATIVO

Capítulo 2. Marco conceptual y normativo del registro del patrimonio arquitectónico	13
2.1. Orígenes y evolución histórica del registro	14
2.1.1. <i>La documentación de los monumentos</i>	
2.2. La construcción de un marco jurídico de protección del patrimonio arquitectónico en España	17
2.2.1. <i>Ley de Patrimonio Histórico Español (LPHE)</i>	
2.2.2. <i>Legislación autonómica sobre patrimonio</i>	
2.3. Planes y estrategias de conservación	22
2.3.1. <i>Los Planes Nacionales</i>	
2.4. Niveles de conocimiento del patrimonio cultural	23
2.5. Marco normativo: organismos internacionales, instrumentos y tecnologías digitales	24
2.5.1. <i>Organismos internacionales y su papel en la preservación del patrimonio arquitectónico</i>	
2.5.2. <i>Aplicación de tecnologías digitales en la digitalización y preservación del patrimonio</i>	
Capítulo 3. Planes Directores y su aplicación en la gestión patrimonial	32
3.1 Los Planes Directores de los bienes culturales inmuebles	34
3.2 Los Planes Directores como herramienta integral para la gestión digital del patrimonio edificado	36
3.3. El Plan Nacional de Catedrales (PNC)	37
3.4. Los Planes Directores de Catedrales	38
3.4.1. <i>Contenido y estructura de los Planes Directores de Catedrales</i>	
3.4.2. <i>Experiencias de redacción e implementación de los Planes Directores de Catedrales en España</i>	
3.4.3. <i>Comparación sobre la estructura de los Planes Directores de Catedrales</i>	
3.4.4. <i>Optimización de la estructura de un Plan Director de Catedrales</i>	
3.4.5. <i>Conclusiones sobre los Planes Directores</i>	

PARTE III: HERRAMIENTAS DIGITALES Y METODOLOGÍA

Capítulo 4. Herramientas digitales para la gestión del patrimonio	52
4.1. Las bases de datos digitales	54
4.2. Aplicaciones de las bases de datos en los bienes inmuebles del patrimonio cultural	57
4.2.1. <i>Las bases de datos del patrimonio cultural</i>	
4.3. Los modelos de datos y las ontologías	60
4.4. Estándares de interoperabilidad y tecnologías semánticas	61
4.5. Aplicaciones de las bases de datos digitales del patrimonio	62
4.6. Tecnologías digitales aplicadas a los bienes inmuebles	64
4.6.1 <i>Los inicios del CAD</i>	
4.6.2. <i>La incorporación de BIM</i>	
4.6.3. <i>HBIM</i>	
4.6.4. <i>GIS</i>	
4.7. GIS en el patrimonio cultural y las construcciones históricas	67
4.7.1. <i>Softwares GIS</i>	
4.8. Nubes de puntos (PCD)	69
4.8.1. <i>Tecnologías para la adquisición de PCD</i>	
4.8.2. <i>Estructura de datos</i>	
4.8.3. <i>Procesamiento de datos crudos a modelos</i>	
4.8.4. <i>Aplicaciones transformadoras en el patrimonio cultural</i>	
4.9. Visores digitales	72
4.10. Contribuciones recientes	74
Capítulo 5. Organización del conocimiento del patrimonio arquitectónico	79
5.1. Sistemas tradicionales de clasificación de la información en el patrimonio arquitectónico	81
5.1.1 <i>Principios generales de clasificación en el patrimonio arquitectónico</i>	
5.1.2 <i>Clasificación e indización en la documentación arquitectónica</i>	
5.1.3 <i>Clasificación automática y su aplicación en el patrimonio arquitectónico</i>	
5.2. Glosarios y Vocabularios Controlados	83
5.3. Taxonomías en la organización de la información	85
5.4. Los tesauros en la organización del conocimiento del patrimonio arquitectónico	86
5.4.1 <i>Características y estructura de los tesauros aplicados al patrimonio</i>	
5.4.2 <i>Las relaciones de tesauros</i>	
5.4.3 <i>Normas y estándares para tesauros en patrimonio cultural</i>	
5.5. Ontologías en la organización del conocimiento del patrimonio arquitectónico	88
5.5.1 <i>Definición y principios básicos en el contexto patrimonial</i>	
5.5.2 <i>Las relaciones ontológicas</i>	
5.5.3 <i>Normas y estándares para ontologías</i>	
5.5.4 <i>Ontologías y web semántica para el Patrimonio Arquitectónico</i>	
5.5.5 <i>Aplicaciones recientes de ontologías en el patrimonio arquitectónico: experiencias y casos de estudio</i>	
5.5.6 <i>Ontologías vs. taxonomías y tesauros en la organización de datos del patrimonio</i>	
5.6. La web semántica y la Inteligencia Artificial: sinergias en la gestión del patrimonio arquitectónico	92
5.7. Integración de ontologías y modelos de IA en el análisis de geometrías digitales	93

PARTE III: HERRAMIENTAS DIGITALES Y METODOLOGÍA

Capítulo 6. Metodología para la gestión y documentación del patrimonio arquitectónico **94**

- 6.1 Articulación de escalas: edificio, ciudad y territorio **96**
 - 6.1.1. Diseño y generación de geodatos de bienes inmuebles*
 - 6.1.2. Creación de la base de datos espacial*
- 6.2 Modelo conceptual de integración entre fichas de catálogo, CAD, BIM, GIS y PCD **98**
- 6.3 Metodología de recolección de datos: escaneo láser y fotogrametría **100**
 - 6.3.1. Generación de la nube de puntos*
- 6.4 Estructura de conjunto de datos: integración de datos y etiquetado en la nube de puntos **106**
- 6.5 Inteligencia artificial y ontologías en la gestión del patrimonio arquitectónico **108**
 - 6.5.1 Diseño de las relaciones ontológicas*

Capítulo 7. Implementación metodológica **115**

- 7.1. Caso de estudio **117**
 - 7.1.1. La Catedral Metropolitana de Valencia*
- 7.2. Adquisición de datos de la Catedral de Valencia
- 7.3. Modelado manual BIM de la Catedral
- 7.4. Metodologías para la integración de nubes de puntos en CAD y BIM para la documentación de edificaciones históricas
- 7.5. Experimentación con nubes de puntos: detección automática de afecciones patológicas en la Capilla del Santo Cáliz
- 7.6. Generación de fichas a partir del modelo HBIM

Capítulo 8. Integración semántica de datos mediante ontologías **161**

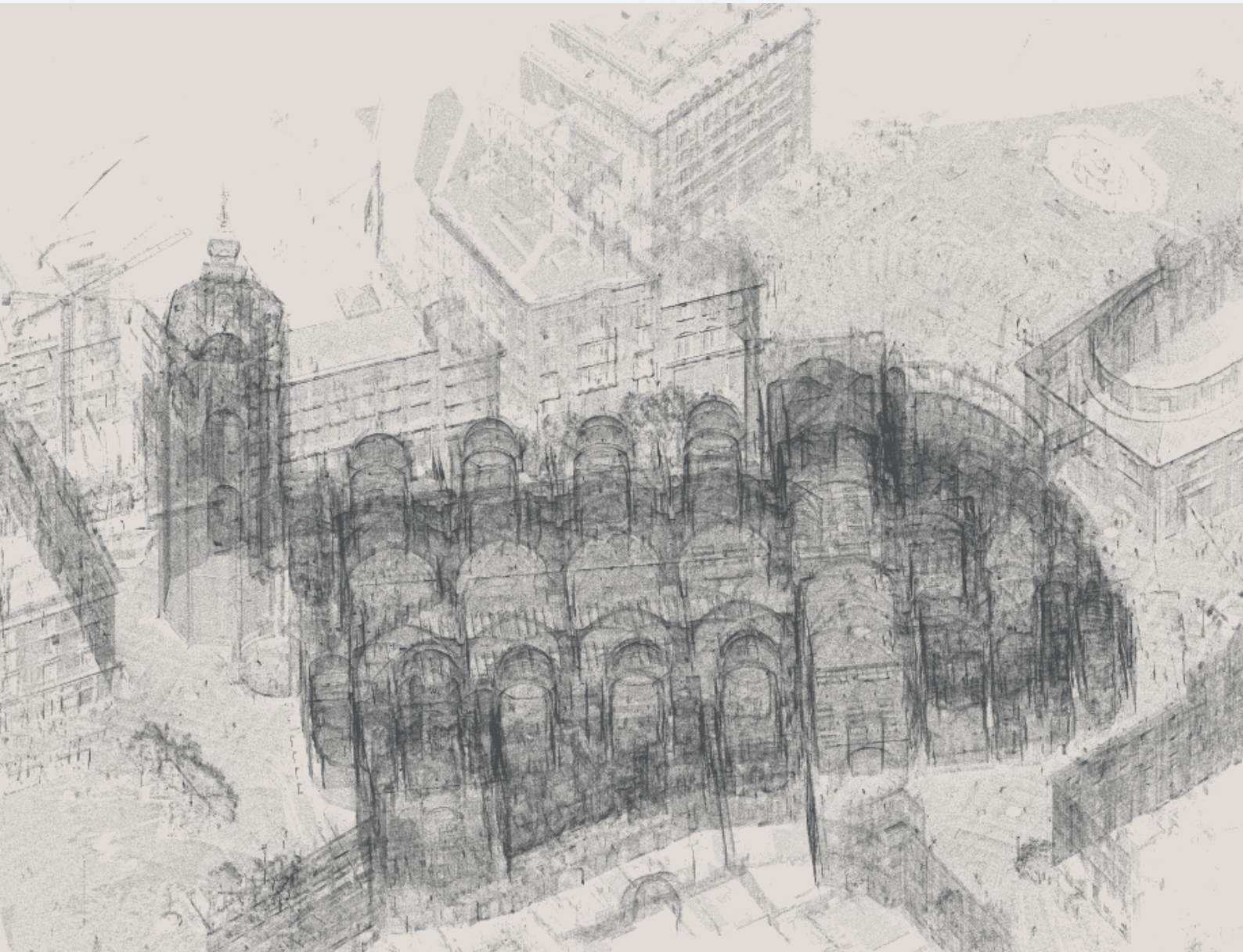
- 8.1. Definición de la ontología base **163**
 - 8.1.1. Definición de las clases principales*
 - 8.1.2. Tabla de correspondencia*
 - 8.1.3. Mapeo de la ontología base*
- 8.2. Integración con HBIM, GIS, nubes de puntos y otras bases de datos **170**
- 8.3. Integración de datos geométricos y semánticos **172**
- 8.4. Implementación de la ontología **176**

PARTE IV: RESULTADOS, CONCLUSIONES Y PROYECCIONES

Capítulo 9. Síntesis y contribuciones **184**

- 9.1. Síntesis **185**
- 9.2. Flujo de trabajo **186**
- 9.3. Aportaciones **187**
- 9.4. Conclusiones y futuras líneas de investigación **188**

Capítulo 1. Introducción



Capítulo 1: Introducción

Presentación

Cuando se redactó el plan de esta investigación en octubre de 2021, el objetivo original se centraba en resolver los desafíos de interoperabilidad entre *Building Information Modeling* (BIM) y *Geographic Information Systems* (GIS) para la documentación del patrimonio arquitectónico, particularmente en la integración de datos geométricos (modelos 2D/3D) y no geométricos (datos históricos). Sin embargo, los rápidos avances en Inteligencia Artificial (IA) y su aplicación en la gestión digital de datos patrimoniales han reorientado el enfoque hacia la estructuración semántica de la información, permitiendo no solo la interoperabilidad técnica, sino también la interpolación contextualizada de datos heterogéneos para optimizar la consulta y recuperación de información. La automatización proporcionada por la IA, mediante la generación de códigos y *scripts*, ha transformado procesos que antes requerían mucho tiempo, como la creación de fichas o visores digitales, convirtiéndolos en tareas más ágiles. Es por ello que este trabajo adquiere una mayor profundidad y complejidad, ya que abarca de manera transversal diversos campos del conocimiento, como la organización de la información, la ciencia de datos, los lenguajes de programación y la programación orientada a objetos, sin descuidar los propios de la arquitectura, como la conservación, la restauración y la gestión del patrimonio cultural.

Actualmente, el registro digital del patrimonio cultural, y en particular el arquitectónico, enfrenta desafíos sin precedentes debido al crecimiento acelerado de los datos generados por tecnologías como el escaneo láser, la fotogrametría y la irrupción de la Inteligencia Artificial¹. Esas tecnologías permiten la obtención de grandes volúmenes de datos con una alta precisión, pero con ello surge un desafío clave: cómo convertir esos datos dispersos en información útil y procesable que ayude a la conservación, documentación y puesta en valor del patrimonio.

Con la llegada de la Inteligencia Artificial, las capacidades para analizar, interpretar y generar información han alcanzado niveles revolucionarios. Las herramientas basadas en IA están permitiendo procesar grandes volúmenes de datos de manera eficiente, identificar patrones, detectar deterioros y optimizar procesos que, en el pasado, eran manuales y mucho más lentos. No obstante, como antes fue mencionado, esta revolución digital no está exenta de desafíos. Es fundamental garantizar la precisión de los resultados, contextualizar la información adecuadamente y, sobre todo, respetar la integridad del patrimonio. En este sentido, la IA debe utilizarse con cautela, asegurando que sus aplicaciones no comprometan la autenticidad, el valor histórico y cultural de los bienes.

El registro del patrimonio, más allá de la recopilación de datos, es un puente entre la historia y las generaciones futuras. En este contexto, la correcta interpretación de los datos se convierte en una herramienta para garantizar la preservación y comprensión del legado cultural. A medida que el mundo se digitaliza, es esencial que los procesos de conservación del patrimonio sigan el ritmo de los avances tecnológicos, asegurando que la autenticidad de los datos y la relevancia histórica de los bienes se mantengan intactas.

A pesar de los avances, los sistemas y metodologías actuales aún enfrentan una falta de interoperabilidad, lo que dificulta la integración de los datos generados por diferentes herramientas tecnológicas. Es por eso que esta investigación busca abordar esa limitación, proponiendo un modelo ontológico que permita la integración eficiente de datos multiescalares provenientes de diversas fuentes, como nubes de puntos (en adelante PCD²), *Heritage Building Information Modeling* (HBIM), GIS y bases de datos patrimoniales, para facilitar la gestión y conservación del patrimonio arquitectónico.

1.1. Motivación de la investigación

La gestión del patrimonio arquitectónico ha experimentado una transformación significativa gracias a la proliferación de datos digitales, pero aún persiste un obstáculo relacionado con la falta de interoperabilidad entre los sistemas utilizados para capturar, modelar y analizar estos datos. Esta fragmentación impide que la información recolectada

¹ El 30 de noviembre de 2022, OpenAI lanzó al público ChatGPT, basado en el modelo *Generative Pre-trained Transformer 3.5* (GPT-3.5).

² PCD: *Point Cloud Data*.

se convierta en un conocimiento efectivo y accesible para la toma de decisiones fundamentadas sobre la conservación y el manejo del patrimonio.

Es necesario, por tanto, establecer metodologías y marcos de referencia estandarizados que permitan una integración fluida entre las diferentes plataformas y fuentes de datos. La investigación que se presenta busca abordar esta necesidad, ofreciendo una solución que no solo facilite la integración de datos, sino que también optimice los procesos de gestión patrimonial en las diferentes escalas, desde el nivel territorial hasta el edificio y sus partes.

Este trabajo se centra en la gestión de la información relacionada con el patrimonio arquitectónico, considerando la diversidad de fuentes disponibles, como archivos físicos, libros, contenidos digitales, entre otros. Esta heterogeneidad se ve ampliada por la variedad de vocabularios específicos, idiomas y regionalismos empleados para referirse a conceptos similares.

El objetivo principal de esta investigación es simplificar y unificar el acceso a la información, mejorando su búsqueda y organización, facilitando así la toma de decisiones fundamentadas. Este enfoque no solo puede facilitar el estudio de las construcciones históricas, sino que también puede ser determinante en un contexto donde la Inteligencia Artificial está comenzando a jugar un papel relevante en la interpretación y gestión digital de los datos.

La incorporación de metodologías avanzadas, como el uso de nubes de puntos en la documentación de edificios, es un avance fundamental. Estas tecnologías, junto con su integración en plataformas como el HBIM y GIS, no solo mejoran la calidad y precisión de los datos, sino que también abren nuevas posibilidades para una comprensión más profunda y accesible del patrimonio arquitectónico, contribuyendo de manera más eficiente para su conservación y análisis.

1.2. Enfoque conceptual

El patrimonio arquitectónico es un testimonio material de la historia y la identidad cultural de las sociedades. Por su complejidad, sus adecuadas conservación y gestión requieren un enfoque multidisciplinar, en el cual estén integradas tanto metodologías tradicionales como herramientas digitales avanzadas disponibles en la actualidad (UNESCO, 1972; Historic England, 2017; buildingSMART Spanish Chapter, 2018).

Particularmente, la gestión de este patrimonio enfrenta constantes desafíos relacionados a la documentación, conservación y análisis de las edificaciones históricas. La creciente aplicación de tecnologías digitales ha permitido la captura de datos con un alto nivel de precisión, pero la interoperabilidad entre diferentes fuentes de información sigue siendo un reto. Ante este problema surge la necesidad de contar con un modelo ontológico para la integración multiescala de datos provenientes de PCD, HBIM, GIS y bases de datos patrimoniales.

Históricamente, la documentación del patrimonio se ha basado en planos, fotografías y descripciones textuales. Sin embargo, estos métodos presentan limitaciones en la representación tridimensional y en la actualización de datos. El escaneo láser y la fotogrametría han revolucionado la forma en que se captura la geometría de los edificios, permitiendo la generación de modelos digitales detallados de alta calidad.

La evolución de las tecnologías digitales ha facilitado la creación de repositorios de información estructurada, lo que permite un análisis más preciso del estado de conservación de los edificios. No obstante, la diversidad de formatos y plataformas dificulta la integración efectiva de los datos.

En la gestión del patrimonio cada tecnología aporta información específica y complementaria. Empezando por las nubes de puntos, que son conjuntos de datos tridimensionales obtenidos mediante escaneos láser o fotogrametría. Estas representaciones ofrecen una documentación precisa de la geometría de los edificios y permiten generar modelos de alta precisión. Su principal reto radica en la necesidad de procesamiento y filtrado para extraer información relevante.

La metodología HBIM, que adapta el concepto de BIM al patrimonio histórico, integra información geométrica con datos históricos, materiales y estructurales. Facilita el análisis y la toma de decisiones en proyectos de restauración, pero la interoperabilidad con otras bases de datos sigue siendo un reto importante.

Los sistemas GIS permiten el análisis espacial de datos georreferenciados, facilitando el estudio del entorno urbano y las relaciones espaciales del patrimonio arquitectónico. La combinación de GIS con HBIM proporciona una visión multi-escala del patrimonio, permitiendo el análisis en diferentes niveles de detalle.

Las bases de datos patrimoniales, a su vez, recopilan información sobre catalogación, estado de conservación, materiales y regulaciones de protección. Estas bases de datos suelen estar estructuradas según criterios históricos o administrativos, lo que puede generar dificultades en su integración con modelos tridimensionales y geoespaciales.

En síntesis, cada tecnología utiliza formatos y estructuras de datos distintas, lo que genera problemas en la integración y reutilización de información. Dicho de otro modo, la falta de estándares comunes impide una comunicación fluida entre plataformas, lo que ralentiza el análisis y la toma de decisiones.

En este contexto, las ontologías proporcionan un marco semántico común que mejora la interoperabilidad de los datos. Definidas como estructuras formales que organizan el conocimiento en categorías y relaciones, permiten establecer una jerarquía de conceptos que facilita la integración y vinculación de información proveniente de diversas fuentes. Gracias a esta organización, las ontologías optimizan la gestión de datos y favorecen su interpretación coherente en entornos interdisciplinarios. En este sentido, los modelos ontológicos representan una solución viable para estandarizar la información y facilitar la integración de tecnologías digitales en la gestión del patrimonio. Su aplicación contribuye

a superar las barreras de interoperabilidad entre PCD, HBIM, GIS y bases de datos patrimoniales, mejorando la accesibilidad y cohesión de la información.

1.3. Objetivos

Los objetivos de esta investigación se centran en el desarrollo y validación de un modelo ontológico destinado a integrar datos multiescalares en la gestión del patrimonio arquitectónico. A través de este enfoque, se busca contribuir a la mejora de la interoperabilidad entre diversas plataformas digitales que gestionan la información relacionada con los bienes patrimoniales.

- Conocer las metodologías y enfoques existentes en el registro y gestión del patrimonio para identificar sus principales limitaciones y oportunidades de mejora.
- Fomentar la construcción de un marco conceptual robusto que relacione las ontologías con la gestión del patrimonio arquitectónico, superando la fragmentación de datos.
- Contribuir al diseño de un modelo ontológico que integre datos de diversas fuentes digitales (PCD, HBIM, GIS), mejorando la coherencia y eficiencia en su utilización.
- Promover la implementación y validación del modelo en casos de estudio prácticos para evaluar su aplicabilidad y efectividad en la gestión patrimonial.
- Evaluar el impacto del modelo asegurando que la integración de datos multiescalares facilite una gestión más eficiente, accesible y adecuada de los recursos patrimoniales.

1.4. Metodología

La investigación se desarrolló mediante un enfoque interdisciplinario que combina la recopilación de información documental, el levantamiento de datos mediante tecnologías avanzadas y el uso de herramientas digitales para el análisis y modelado del patrimonio arquitectónico. Se implementaron procesos automatizados y técnicas de Inteligencia Artificial para optimizar la gestión y estructuración de datos, facilitando su interoperabilidad entre diferentes plataformas.

En primer lugar, se llevó a cabo una revisión de fuentes documentales para contextualizar teóricamente el estudio. Posteriormente, se realizó la captura de datos a través de escaneo láser, permitiendo obtener nubes de puntos de alta precisión. Con esta información, se desarrollaron modelos digitales utilizando CAD³ y BIM, asegurando una representación fiel del patrimonio arquitectónico.

³ CAD: *Computer-Aided Design* o Diseño Asistido por Computadora.

Para mejorar el procesamiento de datos, se empleó el lenguaje de programación Python⁴ en la creación de *scripts* automatizados, con el apoyo de Inteligencia Artificial. Además, se analizaron distintas estructuras de bases de datos relacionadas con el patrimonio cultural, con el fin de evaluar su interoperabilidad y optimizar la organización de la información.

Asimismo, se aplicaron técnicas de aprendizaje automático (ML, del inglés *Machine Learning*) y *clustering*⁵, facilitando la clasificación y segmentación de los datos. En paralelo, se estudió la estructuración de los datos utilizados en los Planes Directores de catedrales, con el objetivo de identificar las categorías y relaciones necesarias para estructurar una ontología que facilitara la organización y conexión semántica de la información en el contexto del patrimonio arquitectónico. Este análisis permitió identificar elementos clave como la identificación, el diagnóstico, las intervenciones propuestas y las estrategias de gestión, los cuales fueron integrados en el diseño de la ontología.

Finalmente, se diseñaron ontologías con el apoyo de modelos avanzados de IA como GPT-3.5 y GPT-4, lo que permitió estructurar la información de manera eficiente y estandarizada. Este enfoque metodológico permitió mejorar la integración y análisis de datos en el estudio y conservación del patrimonio arquitectónico, proporcionando herramientas innovadoras para su documentación y gestión. A continuación, se enumeran las fases del trabajo:

Fase 1: Investigación de fuentes documentales

Recopilación de antecedentes:

- Revisión sistemática de la literatura, artículos y estándares internacionales y estudios previos sobre HBIM, GIS, PCD, ontologías y automatización aplicadas al patrimonio arquitectónico.
- Análisis de bases de datos abiertas y repositorios especializados para identificar vacíos terminológicos y necesidades de interoperabilidad.
- Digitalización de la información de edificios históricos (planos, informes de restauración) mediante OCR⁶ avanzado y modelos de lenguaje como GPT-4 para extraer datos estructurados.

⁴ Python: lenguaje de programación interpretado, de alto nivel y multipropósito, ampliamente usado en desarrollo web, análisis de datos, Inteligencia Artificial y automatización.

⁵ *Clustering*: es un algoritmo de *machine learning* no supervisado que organiza y clasifica diferentes objetos, puntos de datos u observaciones en grupos o *clusters* basados en similitudes o patrones (IBM, 2024).

⁶ OCR: Reconocimiento Óptico de Caracteres.

Fase 2: Captura de datos mediante escaneo láser

Adquisición geométrica:

- Uso de escáneres láser terrestres (Faro y Leica) para generar nubes de puntos de alta densidad (≥ 1000 pts/m²) de edificios históricos, siguiendo protocolos de múltiples escaneados capturados desde diferentes ángulos.
- Registro de nubes mediante software especializado (Faro® Scene, CloudCompare, Autodesk® ReCap, Leica Cyclone Register) utilizando algoritmos ICP⁷.
- Validación métrica con distancias controladas y ajuste de errores. Georreferenciación con puntos de control tomados por GPS⁸.

Fase 3: Modelado CAD y BIM basado en nubes de puntos

Reconstrucción semántica:

- Conversión de nubes de puntos a modelos HBIM (Autodesk® Revit) mediante segmentación e importación automatizada (*scan-to-HBIM*⁹).
- Generación de superficies de mallados y superficies a partir de algoritmos de *Poisson Surface Reconstruction*, optimizados con *scripts* de Python para preservar detalles históricos.
- Integración de metadatos no geométricos (materiales, cronologías) usando esquemas RDF/OWL vinculados a ontologías.

Fase 4: Automatización con Python e IA

Desarrollo de scripts inteligentes:

Creación de rutinas en Python (Open3D) para:

- Limpieza automática de *outliers* en nubes de puntos mediante filtros estadísticos (DBSCAN).
- Clasificación de elementos arquitectónicos usando modelos de *machine learning* entrenados con *datasets* etiquetados.
- Generación de informes técnicos automatizados con GPT-4, vinculando datos BIM a normativas de conservación.

⁷ ICP: *Iterative Closest Point*.

⁸ GPS: *Global Positioning System*.

⁹ *Scan-to-HBIM* es un proceso que convierte datos de escaneo 3D, como nubes de puntos, en modelos HBIM para la documentación, análisis y gestión del patrimonio arquitectónico.

Fase 5: Análisis de datos y diseño ontológico

Extracción de conocimiento:

Clustering de datos patrimoniales (K-means¹⁰, K-NN¹¹, t-SNE¹²) para identificar patrones de deterioro o correlaciones entre estilo arquitectónico y materiales.

- Diseño de ontologías OWL mediante:

Asistencia de GPT-4 para definir relaciones jerárquicas (ej.: "Adobe ES_PARTE_DE Técnicas Vernáculas").

Validación con herramientas como *Protégé* y enlaces a vocabularios controlados (AAT¹³, UNESCO).

- Integración con plataformas de interoperabilidad global.

Fase 6: Validación y aplicación práctica

Caso de estudio piloto:

- Selección de un edificio histórico (Catedral Metropolitana de Valencia) para aplicar el flujo completo.

- Evaluación de métricas:

Precisión geométrica (RMSE ≤ 3 mm en comparación con mediciones físicas).

Eficiencia en tiempo (reducción del 60% en horas de modelado manual mediante IA).

- Publicación de resultados en repositorios FAIR (*Findable, Accessible, Interoperable, Reusable*) para replicabilidad.

¹⁰ K-means es un algoritmo de aprendizaje no supervisado utilizado para la agrupación en clústeres de datos, que reúne puntos de datos no etiquetados en grupos o *clusters* (IBM, 2024).

¹¹ KNN (*K-Nearest Neighbors*) es un algoritmo es un clasificador de aprendizaje supervisado no paramétrico, que emplea la proximidad para realizar clasificaciones o predicciones sobre la agrupación de un punto de datos individual (IBM, 2024).

¹² t-SNE (*t-Distributed Stochastic Neighbor Embedding*) es un algoritmo de *machine learning* de reducción de dimensión no lineal utilizado para la visualización de datos de alta dimensión.

¹³ ATT: *Art & Architecture Thesaurus* (Getty Research Institute) se trata de un vocabulario estructurado para describir e indexar las artes visuales y la arquitectura.

1.4.1. Resumen de herramientas utilizadas

Componente	Tecnologías
Escaneo láser	Faro® Focus 3D X 130, Faro® Freestyle 2 Handheld Scanner, Faro® Focus Premium, Faro® Focus Core y Leica BLK360
Procesamiento de PCD (registro, limpieza, segmentación y submuestreo)	Faro® Scene 2024.1, CloudCompare 2.13.2 Kharkiv, Autodesk® Recap 2024, Leica Cyclone Register 360 1.4.3, <i>scripts</i> Python para registro
Procesamiento de datos	<i>Scripts</i> Python
Modelado BIM/CAD	Autodesk® Revit 2024 + Dynamo, Autodesk® AutoCAD 2024
Modelado GIS	QGIS 3.40.3 Bratislava y ESRI® ArcGIS Pro 3.4
IA y automatización	GPT-3.5, GPT-4 (OpenAI), DeepSeek V3 DeepThink (R1), Scikit-learn
Ontologías	Protégé Desktop v.5.6.5, WebProtégé, CIDOC-CRM, SKOS
Visualización de datos	HTML, JS, CSS
Extensiones de archivos	txt, xls, xlm, csv, rcp, rcs, dwg, dwx, rvt, pts, xyz, html, js, css, py, pdf

1.5. Delimitación de la investigación

El presente trabajo se enfoca en el estudio y análisis de los edificios reconocidos como patrimonio arquitectónico, específicamente aquellos que forman parte del patrimonio cultural español, es decir, aquellos que poseen un valor destacado en la historia, identidad y cultura de la sociedad. En particular, la investigación se concentra en los Bienes de Interés Cultural (BIC), que corresponde a la categoría de mayor protección estatal. Esta selección se justifica por el alto valor patrimonial de estas edificaciones, las cuales requieren un nivel de estudio y documentación exhaustivo. Se debe destacar que, generalmente, a medida que disminuye el nivel de protección de un bien, también lo hace la cantidad de información disponible sobre el mismo.

La investigación se organiza en tres niveles de análisis. El primero de ellos aborda la estructura general de los campos del patrimonio español reconocido, lo que implica un examen de todos los BIC de España. El segundo nivel se centra en el análisis del Plan Nacional de Catedrales, investigando su alcance y la aplicación de sus directrices. Finalmente, el tercer nivel profundiza en el estudio particularizado de la Catedral Metropolitana de Valencia, permitiendo un enfoque más detallado sobre un caso específico.

El ámbito de estudio se extiende a la recuperación y el análisis de información contenida en diferentes tipos de bases de datos, como BIM, GIS, PCD, así como en archivos en

formatos TXT¹⁴, XLS¹⁵, CSV¹⁶, SQL¹⁷ y BD. Este enfoque multidimensional tiene como objetivo integrar datos provenientes de diversas fuentes para una visión más completa del patrimonio arquitectónico.

En cuanto a la metodología, la investigación se centra en la integración de datos multiescalares aplicados a la gestión del patrimonio arquitectónico. Para ello, se consideran diversas tecnologías de registro, como el escaneo láser, así como herramientas de modelado digital como HBIM. También se incluirán plataformas GIS para el análisis territorial y bases de datos patrimoniales, que se utilizan comúnmente en la gestión y conservación del patrimonio.

Para experimentar la aplicación del modelo propuesto, se ha seleccionado como caso de estudio a la Catedral Metropolitana de Valencia, un edificio complejo que puede ser trabajado en diferentes escalas de análisis. La validación del modelo se ha llevado a cabo mediante pruebas de interoperabilidad entre las plataformas utilizadas.

1.6. Estructura del trabajo

El presente trabajo se organiza en cuatro partes fundamentales que guían el desarrollo y análisis de la metodología propuesta para la gestión digital del patrimonio arquitectónico.

La **Parte I: Introducción** establece el marco inicial del estudio. En este apartado se presenta el contexto y la motivación de la investigación, explicando la relevancia del tema y las razones que impulsaron el trabajo. Se aborda el marco conceptual que fundamenta el estudio, planteando el problema a resolver y las hipótesis que guían la investigación. También se detallan los objetivos, las delimitaciones de la investigación y la estructura general del trabajo, ofreciendo una visión global del contenido y cómo cada sección se interrelaciona.

La **Parte II: Bases Conceptuales y Marco Normativo** profundiza en los aspectos teóricos y normativos que sustentan el estudio. En este apartado se exploran los orígenes y la evolución del registro patrimonial, así como los marcos jurídicos y los instrumentos de protección del patrimonio en España, con un enfoque particular en los inventarios y los planes directores. Este capítulo también examina cómo se aplican estas normativas en la gestión del patrimonio, tanto en España como en otros contextos internacionales, ofreciendo una base sólida sobre la que se construye la propuesta metodológica.

La **Parte III: Herramientas Digitales y Metodología** constituye el núcleo metodológico del trabajo, donde se exploran las tecnologías y enfoques necesarios para la gestión digital del patrimonio. Se abordan las herramientas clave, como bases de datos patrimoniales,

¹⁴ TXT: formato de archivo de texto plano que contiene solo caracteres sin formato, sin estilos ni imágenes.

¹⁵ XLS: formato de archivo de Microsoft Excel utilizado para hojas de cálculo.

¹⁶ CSV (*Comma-Separated Values*): es un tipo de archivo de texto plano que utiliza delimitadores, como comas o punto y coma, para separar los valores de los datos.

¹⁷ SQL (*Structured query language*): es un lenguaje de programación diseñado para gestionar y manipular bases de datos relacionales mediante operaciones como consulta, inserción, actualización y eliminación de datos.

tecnologías CAD, BIM, GIS y PCD, y se analiza cómo estas herramientas se integran a diferentes escalas en la gestión patrimonial. En esta sección también se presenta el diseño ontológico propuesto, que permite la vinculación de bases de datos heterogéneas a través de metodologías avanzadas, y se valida su aplicación mediante el caso de estudio, detallando tanto los éxitos como los desafíos encontrados. Además, se profundiza en la visualización y explotación de los datos patrimoniales a través de herramientas avanzadas y métodos de análisis como el *machine learning*, lo que permite una gestión más eficiente y una toma de decisiones más informada.

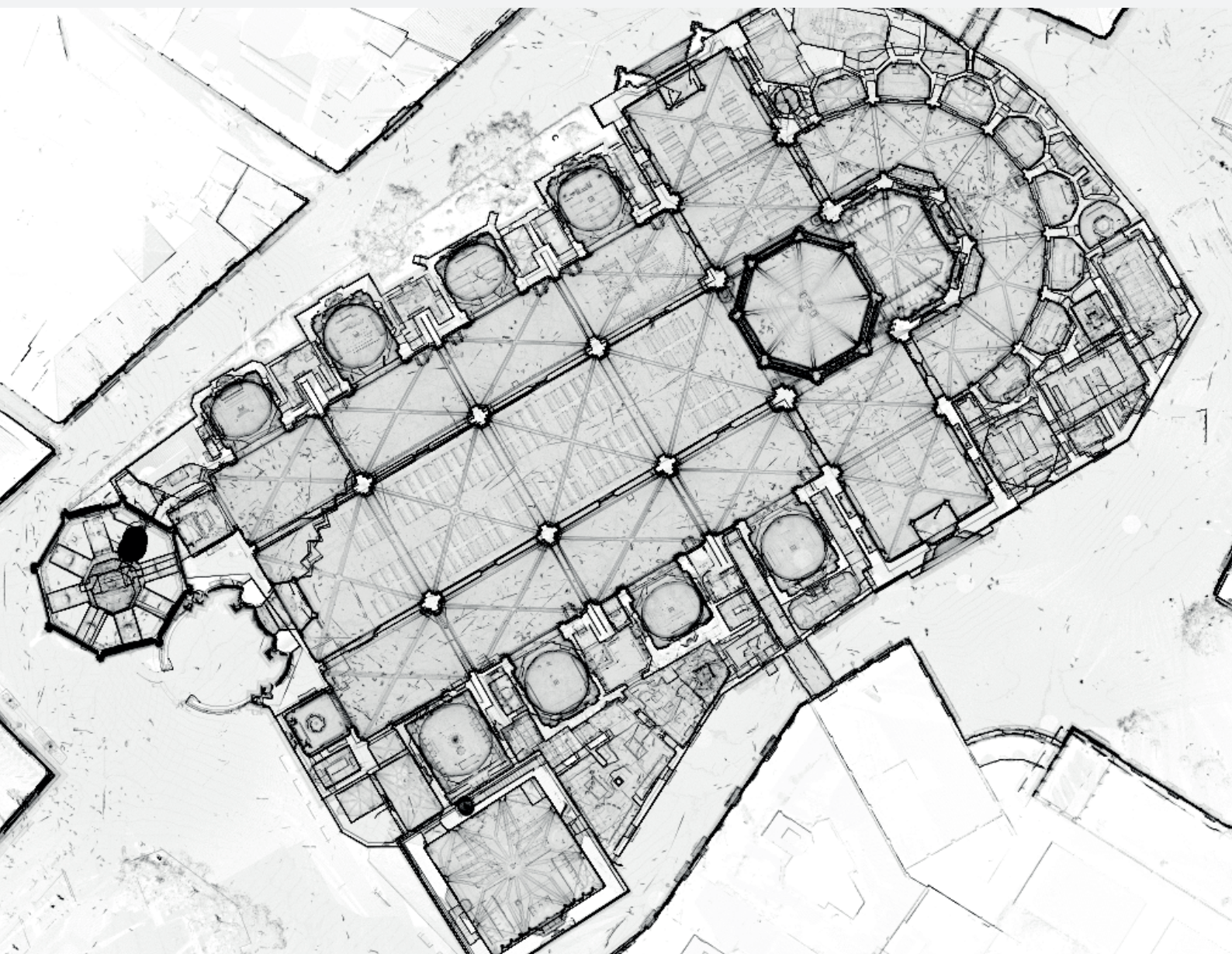
La **Parte IV: Resultados, Conclusiones y Proyecciones** cierra la tesis con una síntesis de los hallazgos obtenidos a lo largo de la investigación. En este apartado se valida la metodología propuesta, destacando su impacto en la eficiencia, accesibilidad y transparencia de la gestión patrimonial. Se reflexiona sobre las lecciones aprendidas y se proponen líneas futuras de investigación, enfocándose en el desarrollo de repositorios globales interoperables para facilitar la gestión del patrimonio arquitectónico a nivel mundial.

De esta manera, este trabajo busca seguir una lógica progresiva que va desde los fundamentos teóricos y normativos hacia el análisis práctico y la evaluación de la metodología, culminando en las conclusiones y las proyecciones para el futuro de la investigación.

Referencias del Capítulo 1

- buildingSMART Spanish Chapter. (2018). Guía de usuarios BIM aplicado al Patrimonio Cultural. Recuperado el 20 de marzo de 2025, de <https://www.buildingsmart.es/bim/guías-ubim/>
- Historic England. (2017). BIM for Heritage: Developing a Historic Building Information Model. Historic England.
- IBM. (s.f.). ¿Qué es el clustering? *IBM*. Recuperado el 20 de marzo de 2025, de <https://www.ibm.com/es-es/topics/clustering>
- IBM. (s.f.). ¿Qué es la agrupación de medias k? *IBM*. Recuperado el 20 de marzo de 2025, de <https://www.ibm.com/es-es/topics/k-means-clustering>
- IBM. (s.f.). ¿Qué es KNN? *IBM*. Recuperado el 20 de marzo de 2025, de <https://www.ibm.com/mx-es/topics/knn>
- UNESCO. (1972). Convención sobre la Protección del Patrimonio Mundial, Cultural y Natural. Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura. <https://whc.unesco.org/en/conventiontext/>

Capítulo 2. Marco conceptual y normativo del registro del patrimonio arquitectónico



Capítulo 2: Marco conceptual y normativo del registro del patrimonio arquitectónico

2.1. Orígenes y evolución histórica del registro

La estructuración de la información en el campo del patrimonio cultural surge del interés por registrar y sistematizar el legado de los monumentos, un proceso que Françoise Choay analiza como parte de la evolución de la conciencia histórica occidental desde el Renacimiento. Este interés se consolidó con el surgimiento de los anticuarios en Francia durante los siglos XVII y XVIII, quienes iniciaron un enfoque metodológico basado en la catalogación y el estudio de artefactos y ruinas. Su enfoque era comparable al empleado en el campo de las ciencias naturales, a medida que buscaba una descripción confiable y controlable de los objetos, y sentó las bases para una perspectiva sistemática del patrimonio (Choay, 2001).

Esta nueva perspectiva no solo implicó el examen minucioso de artefactos aislados, sino que gradualmente amplió su escala hacia el concepto de "monumento". Este puede ser entendido como testimonio material de valor histórico y simbólico (Choay, 2001) o, tal cual cita Poulot (2009) del diccionario de D'Aviler de 1761, como cualquier construcción que sirva para conservar la memoria del tiempo y de su fabricante o de aquello para lo que había sido construido.

En el siglo XIX, las figuras de Eugène Emmanuel Viollet-le-Duc y John Ruskin resultaron clave en la definición de los principios de restauración y conservación del patrimonio arquitectónico. Mientras Viollet-le-Duc concebía la restauración como un proceso reconstructivo que buscaba devolver al edificio un estado idealizado a partir de un profundo análisis estilístico, Ruskin rechazaba cualquier intervención que alterara su autenticidad, defendiendo la preservación de la huella del tiempo como un testimonio irremplazable. Así, la noción de monumento pasó de ser solo un vestigio del pasado a convertirse en un objeto de debate sobre su significado, conservación y las intervenciones adecuadas para su protección (Choay, 2001; Poulot 2009).

La concepción del patrimonio como objeto de estudio profundo, vinculado a su historia y valor artístico, se consolidó con la taxonomía de Alois Riegl, quien distinguió entre el monumento intencional (creado deliberadamente para conmemorar) y el monumento histórico (valorado retrospectivamente por su dimensión estética o documental). Esta clasificación no solo amplió el campo de estudio del patrimonio, sino que redefinió los criterios de su apreciación y conservación. En esta línea, Françoise Choay resalta cómo la propuesta de Riegl revolucionó la valoración del tejido arquitectónico al trascender lo puramente material e incorporar factores simbólicos y culturales. Así, el patrimonio es comprendido como algo que no solo preserva la identidad colectiva y la memoria histórica, sino que también responde a necesidades sociales y culturales contemporáneas.

En este contexto, es importante citar que Choay también introduce la noción de "textos instauradores", correspondiente a aquellos documentos que no solo describen el patrimonio desde una perspectiva material o histórica, sino que también establecen su significado en la sociedad. Estos textos legitiman el estudio del patrimonio como un campo dinámico y en constante reinterpretación, permitiendo comprender su papel en la construcción de narrativas colectivas y en la práctica arquitectónica contemporánea. De esta forma, la conservación del patrimonio se convierte en un acto crítico y reflexivo, orientado tanto a su disfrute en el presente como a su transmisión a futuras generaciones (O'Connell, 2022).

2.1.1. La documentación de los monumentos

El origen del registro de los monumentos tuvo lugar en Francia, cuando François Guizot propuso al rey Louis-Philippe la creación del cargo de inspector de monumentos históricos, que fue otorgado a Ludovic Vitet en 1830, sucedido por Prosper Mérimée en 1837. La misión del inspector de monumentos históricos tenía una doble función: establecer la clasificación de los edificios dignos de ser conservados y realizar las reparaciones más necesarias con carácter de urgencia. Esta tarea incluía un inventario y una clasificación que inicialmente se basó en consideraciones políticas, posteriormente en 1835, en el interés histórico y, desde 1841, en el valor arquitectónico (Léon, 1951).

En 1840, la Comisión de Monumentos Históricos (CMH) publicó la *Liste des Monuments* firmada por Mérimée. Se trataba de la primera lista, que contenía 1.082 monumentos

históricos, de los cuales 934 eran edificios. Hay que considerar que las catedrales y los edificios diocesanos no estaban incluidos en la lista, ya que se consideraba que su mantenimiento debía ser atribuido al Ministerio de Culto (Francia, Commission des monuments et documents historiques et des bâtiments civils, 1865).

En esa época, la forma de distinguir la urgencia de una actuación se realizaba utilizando los recursos de la imprenta, con la cual habían desarrollado un sistema de indicadores. Las letras capitales indicaban los monumentos designados por la comisión para realizar trabajos urgentes y considerables. El asterisco, a su vez, indicaba aquellos monumentos de notables méritos, pero cuyas reparaciones requerían sumas menores o aquellos cuya situación aún no había sido establecida por falta de estudio.

La ficha de registro de monumentos estaba compuesta por los siguientes siete campos: características arquitectónicas, accesorios importantes, información cronológica, edad de la edificación, indicadores relativos a la propiedad, propuestas a hacer en interés de la conservación o restauración, y observaciones particulares. En cuanto a los primeros informes de la Comisión de Monumentos, incluían estudios detallados con descripciones, historia, plantas, alzados, secciones y algunos dibujos representativos.

En España, la primera norma que habla de los monumentos es la Instrucción del 26 de marzo de 1802¹, *“sobre el modo de recoger y conservar los monumentos históricos”*, en la cual se incorpora una larga enumeración de bienes muebles e inmuebles. En ese entonces la tutela y vigilancia de los bienes artísticos e históricos se delegaba en las Reales Academias de Historia y de Bellas Artes de San Fernando, en el marco de una política de mecenazgo (González-Varas, 1999, p. 79). Es por ello que la instrucción hace referencia a que:

“La Academia quedará agradecida á los buenos patriotas que coadyuven á la ilustracion de la Patria por el medio de buscar, conservar y comunicarla los monumentos antiguos” (España, 1993).

Producto de las revoluciones liberales y la desamortización de los bienes del patrimonio eclesiástico, que dieron origen al expolio, la exportación, los robos, la destrucción y la pérdida, surgió la necesidad de realizar inventarios. En reacción, la Corona dicta la Real Orden de 29 de julio de 1835, en la que solicita a las provincias la elaboración de un inventario de los objetos de ciencia y bellas artes presentes en los conventos (González-Varas, 1999, p. 79).

Con relación a los bienes inmuebles, mediante la Real Orden del 2 de abril de 1844 se solicitó un listado de los edificios con méritos artísticos o históricos. Posteriormente, la Real Orden de 13 de junio de 1844, inspirada en la legislación francesa, estableció la creación de las Comisiones Provinciales de Patrimonio, las cuales obligaban a las provincias a informar sobre la existencia de Monumentos Histórico-Artísticos y a declarar aquellos bienes más relevantes y en peligro. Se trataba de los “edificios nacionales que,

¹ Novísima Recopilación de las Leyes de España mandada a formar por el señor D. Carlos IV en Madrid, Libro VIII, Título XX, Ley III por resolución a constar del 26 de marzo de 1802 y cedula del 6 de julio de 1803.

por su mérito artístico o por sus recuerdos históricos, merecieran conservarse” como se redacta en la Real Orden de 1844. Ese mismo año, la Catedral de León fue declarada un edificio de valor histórico y categorizada como monumento nacional (González-Varas, 1999, p. 79).

Entre sus competencias, las recién creadas Comisiones Provinciales de Patrimonio tenían la obligación de inventariar y catalogar el patrimonio histórico. Estas instituciones estaban bajo la órbita de la Comisión Central de Monumentos, encargada de elaborar una estadística monumental o un catálogo de la riqueza artística nacional, un objetivo que quedó en el terreno de la utopía y no se materializó hasta el siglo XX. Fue entonces cuando comenzaron los trabajos para la elaboración del Catálogo Monumental, cuyo origen se encuentra en el Real Decreto de 1 de junio de 1900, que ordenaba “la catalogación completa y ordenada de las riquezas históricas y artísticas de la nación”. Por primera vez, se llevó a cabo una recopilación exhaustiva y sistemática de información sobre bienes culturales, aplicando nuevos métodos como la fotografía, la planimetría y el dibujo como instrumentos de documentación gráfica (González-Varas, 1999, p. 80).

En 1907, Lampérez y Romea publicaron *Bases y medios prácticos para hacer el inventario de los monumentos arquitectónicos de España* durante el IV Congreso Nacional de Arquitectos en Bilbao, en el cual diferenciaron claramente entre “inventario” y “catálogo”. Según su exposición, el inventario consistía en una recopilación de datos breves y escuetos, mientras que el catálogo requería una información más profunda y detallada sobre los monumentos (Lampérez y Romea, 1907).

2.2. La construcción de un marco jurídico de protección del patrimonio arquitectónico en España

Con la formación de las naciones a finales del siglo XIX, emergió un fuerte interés por crear una identidad que representara al Estado, lo que también se trasladó a los monumentos como símbolos del legado cultural e histórico. Esta conciencia de la importancia de conservar el patrimonio llevó al surgimiento de las primeras leyes que contemplaban la protección de los monumentos, buscando preservarlos como elementos fundamentales de la memoria colectiva de los pueblos.

La Ley de Conservación de Monumentos Históricos-Artísticos del 4 de marzo de 1915 es considerada la base conceptual para la protección del patrimonio español en el siglo XX. Se le reconoce como antecedente inmediato del Decreto-Ley de 1926 y de la Ley de 13 de mayo de 1933, tanto por la adopción de una denominación con pretensiones de generalidad (“monumentos arquitectónicos artísticos”) como por la instauración de la técnica de catalogación, que condicionaba la implementación de las medidas de conservación y protección (Alegre Ávila, 1994, p. 76):

“Artículo I.º Se entiende por monumentos arquitectónicos artísticos, á los efectos de esta ley, los de mérito histórico ó artístico, cualquiera que sea su estilo, que en todo ó en parte sean como tales en los respectivos expedientes, que se incoarán, á petición de cualquier Corporación ó particular, y que habrán de incluirse en el catálogo que ha de formarse por el

Ministerio de Instrucción Pública y Bellas Artes, con arreglo á lo dispuesto en la ley de 7 de Julio de 1911.” (Boletín Oficial del Estado, 1915).

Refiriéndose a la tutela de los monumentos, la misma ley de 1915 mencionaba:

“Art. 4.0 Los Municipios, las Diputaciones Provinciales, las Corporaciones, las Asociaciones reconocidas por la Ley y los particulares que se comprometan á la conservación, restauración ó reconstrucción de los monumentos” (Boletín Oficial del Estado, 1915).

Con la proclamación de la Segunda República en 1931 se promulgó una nueva Constitución, cuyo Artículo 45 establecía:

“Toda la riqueza artística e histórica del país, sea quien fuere su dueño, constituye tesoro cultural de la Nación y estará bajo la salvaguardia del Estado, que podrá prohibir su exportación y enajenación y decretar las expropiaciones legales que estime oportunas para su defensa. El Estado organizará un registro de la riqueza artística e histórica, asegurará su celosa custodia y atenderá a su perfecta conservación. El Estado protegerá también los lugares notables por su belleza natural o por su reconocido valor artístico o histórico.” (España, 1931).

La nueva Constitución establecía la salvaguardia de los tesoros de la Nación, así como la elaboración de un registro de la riqueza artística e histórica. Esta disposición se materializó con la Ley de Protección del Tesoro Artístico Nacional, que en su Título V especificaba aspectos relacionados con los inventarios del Patrimonio Histórico-Artístico:

“Artículo 66. Se emprenderá la formación del Inventario del Patrimonio histórico-artístico nacional. Servirán de base para lograrlo los Catálogos monumentales y el Fichero de Arte Antiguo.” (España, 1933).

La Ley de 13 de mayo de 1933, sobre la defensa, conservación y acrecentamiento del Patrimonio Histórico-Artístico, a su vez, sentó las bases para una protección más estructurada y rigurosa del patrimonio en España. Influenciada por la Carta de Atenas de 1931, esta normativa estableció los fundamentos para la creación del inventario en los catálogos monumentales y la incorporación de los catálogos complementarios.

Después de la Guerra Civil, el Decreto de 9 de marzo de 1940 encargó al CSIC² la elaboración del Catálogo Monumental. Las normativas posteriores fueron eficaces, dando lugar a la confección de numerosos inventarios provinciales, organizados según una nomenclatura y unos campos de información coherentes y útiles. Estos incluían la identificación, la localización del objeto, un plano esquemático, el estado de conservación y una reproducción fotográfica (González-Varas, 1999, p. 82).

² CSIC: Consejo Superior de Investigaciones Científicas.

2.2.1 Ley de Patrimonio Histórico Español (LPHE)

Con la promulgación de la Constitución de 1978, en su Artículo 46 se incorporó la obligación del Estado en cuanto a la conservación del patrimonio histórico, cultural y artístico. Posteriormente, se redactó la Ley 16/1985, Ley de Patrimonio Histórico Español (LPHE), que integró algunos de los logros más importantes de las dos grandes normativas que la precedieron: el Real Decreto-Ley de 9 de agosto de 1926 y la Ley Republicana de 13 de mayo de 1933 (Alegre Ávila, 1994). La LPHE establece la protección, el acrecentamiento y la transmisión del patrimonio a las generaciones futuras, definiendo que:

“El Patrimonio Histórico Español es el principal testigo de la contribución histórica de los españoles a la civilización universal y de su capacidad creativa contemporánea. La protección y el enriquecimiento de los bienes que lo integran constituyen obligaciones fundamentales que vinculan a todos los poderes públicos...” (Gobierno de España, 1985).

La misma ley establece el instrumento administrativo del Bien de Interés Cultural, que debe ser incorporado en el Inventario General. Además, determina que estos bienes deben ser conservados, mantenidos y custodiados:

“En el seno del Patrimonio Histórico Español, y al objeto de otorgar una mayor protección y tutela, adquiere un valor singular la categoría de Bienes de Interés Cultural, que se extiende a los muebles e inmuebles de aquel Patrimonio que, de forma más palmaria, requieran tal protección. Semejante categoría implica medidas asimismo singulares que la Ley establece según la naturaleza de los bienes sobre los cuales recae.” (Gobierno de España, 1985).

En su Artículo 15, la LPHE establece cinco categorías de Bienes Inmuebles, organizados y enumerados como BIC:

1 - Monumentos:

- Bienes inmuebles que constituyen realizaciones arquitectónicas, de ingeniería o esculturas colosales.
- Deben poseer interés histórico, artístico, científico o social.

2 - Jardines Históricos:

- Espacios delimitados organizados por el ser humano con elementos naturales.
- Pueden incluir estructuras de fábrica.
- Valorados por su origen, pasado histórico, estética, aspectos sensoriales o botánicos.

3 - Conjuntos Históricos:

- Agrupaciones de bienes inmuebles que conforman una unidad de asentamiento.
- Pueden ser continuos o dispersos, representando la evolución de una comunidad humana.
- También pueden ser núcleos individualizados dentro de una unidad mayor de población.

4 - Sitios Históricos:

- Lugares o parajes naturales vinculados a acontecimientos, tradiciones populares, creaciones culturales o de la naturaleza.
- Pueden poseer valor histórico, etnológico, paleontológico o antropológico.

5 - Zonas Arqueológicas:

- Lugares o parajes naturales con bienes muebles o inmuebles susceptibles de estudio arqueológico.
- Pueden estar en la superficie, subsuelo o bajo aguas territoriales españolas.

Las categorías de protección según la LPHE que afectan a los bienes inmuebles incluyen los bienes culturales sin declaración, que están protegidos por los Planes Nacionales de Información, y la máxima categoría de protección, que corresponde a la figura del BIC. La figura jurídica del BIC goza de una tutela especial por parte del poder público, garantizando su conservación y protección conforme a la LPHE (González-Varas, 1999, p. 520).

Además, la LPHE obliga a incorporar en el planeamiento de los Conjuntos Históricos la catalogación de los elementos unitarios. Cabe destacar que todos los BIC incluyen la noción de entorno de protección, buscando así la preservación de su contexto histórico y paisajístico.

Con la Constitución de 1978, se transfieren las competencias en materia de administración de la cultura a las Comunidades Autónomas, según lo establecido en el Artículo 148, lo que incluye la gestión del patrimonio monumental. Esta descentralización también queda reflejada en la LPHE, que promueve la cooperación entre Comunidades Autónomas y Ayuntamientos en la protección del patrimonio.

Posteriormente, el Real Decreto 64/1994 reafirma este reparto de competencias, otorgando a las Comunidades Autónomas la facultad de declarar Bienes de Interés Cultural dentro de sus territorios. En el ámbito municipal, la Ley 7/1985, Reguladora de las Bases del Régimen Local, establece competencias generales en materia de cultura, permitiendo a los Ayuntamientos desempeñar un papel activo en la gestión y conservación del patrimonio (González-Varas, 1999, p. 524).

2.2.2 Legislación autonómica sobre patrimonio

En un segundo nivel legislativo se encuentran las leyes autonómicas, basadas en la Ley 16/1985 y que, en muchos casos, establecen regulaciones iguales o más restrictivas en materia de protección del patrimonio. Cada Comunidad Autónoma ha elaborado su propia normativa específica para la gestión y conservación del patrimonio cultural. Este desarrollo normativo ha evolucionado de manera independiente, dando lugar a regulaciones diferenciadas.

En términos generales, las normativas autonómicas han mostrado mayor agilidad en la incorporación de nuevas tipologías patrimoniales y han seguido de cerca la doctrina internacional. Sin embargo, su alcance y aplicación varían según cada Comunidad Autónoma, que ha formulado su marco normativo en función de sus propios intereses y prioridades.

A continuación, se presenta un listado completo de las leyes que regulan el patrimonio cultural:

Andalucía: Ley 14/2007, de 26 de noviembre (*Ley de Patrimonio Histórico de Andalucía*).

Aragón: Ley 3/1999, de 10 de marzo (*Ley del Patrimonio Cultural Aragonés*).

Canarias: Ley 4/1999, de 15 de marzo (*Ley del Patrimonio Histórico de Canarias*), modificada por la Ley 11/2002, de 21 de noviembre.

Cantabria: Ley 11/1998, de 13 de octubre (*Ley del Patrimonio Cultural de Cantabria*).

Canarias: Ley 11/2019, de 25 de abril (*Patrimonio Cultural de Canarias*)

Castilla-La Mancha: Ley 4/2013, de 16 de mayo (*Patrimonio Cultural de Castilla-La Mancha*).

Castilla y León: Ley 7/2024, de 20 de junio (*Ley del Patrimonio Cultural de Castilla y León*).

Cataluña: Ley 9/1993, de 30 de septiembre (*Patrimonio Cultural Catalán*).

Comunidad de Madrid: Ley 8/2023, de 30 de marzo (*Patrimonio Cultural de la Comunidad de Madrid*).

Comunidad Foral de Navarra: Ley Foral 14/2005, de 22 de noviembre (*Patrimonio Cultural de Navarra*).

Comunidad Valencia: Ley 4/1998, de 11 de junio (*Patrimonio Cultural Valenciano*).

Extremadura: Ley 2/1999, de 29 de marzo (*Patrimonio Histórico y Cultural de Extremadura*).

Galicia: Ley 5/2016, de 4 de mayo (*Patrimonio Cultural de Galicia*).

Illes Balears: Ley 12/1998, de 21 de diciembre (*Ley del Patrimonio Histórico de las Illes Balears*).

La Rioja: Ley 7/2004, de 18 de octubre (*Patrimonio Cultural, Histórico y Artístico de La Rioja*).

País Vasco: Ley 6/2019, de 9 de mayo (*Patrimonio Cultural Vasco*).

Principado de Asturias: Ley 1/2001, de 6 de marzo (*Normas reguladoras del Patrimonio Cultural*).

Región de Murcia: Ley 4/2007, de 16 de marzo (*Patrimonio Cultural de la Región de Murcia*).

Este conjunto normativo refleja la diversidad y especificidad de la protección del patrimonio en las distintas regiones de España, existiendo en algunos casos la creación de categorías intermedias de protección, como son los bienes de interés cultural, los elementos patrimoniales con protección ambiental o aquellos clasificados como patrimonio inmaterial. Estas leyes autonómicas, en su mayoría, también establecen mecanismos de gestión participativa, donde los ciudadanos y las entidades locales pueden influir en la protección y conservación del patrimonio cultural. Además, en muchas de ellas se contempla la posibilidad de aplicar planes especiales de conservación, restauración e intervención, adaptados a las particularidades de cada territorio. La legislación autonómica, por tanto, no solo regula la protección del patrimonio, sino que también establece un marco para su integración en el desarrollo económico, social y cultural de cada comunidad.

2.3. Planes y estrategias de conservación

2.3.1. Los Planes Nacionales

Los Planes Directores en España son herramientas clave para la gestión del patrimonio cultural, diseñadas para racionalizar las intervenciones e inversiones en la conservación de bienes culturales de gran complejidad. Funcionan como documentos marco que, desde un enfoque interdisciplinario, permiten profundizar en el conocimiento del bien, diagnosticar sus patologías y definir estrategias coordinadas para su protección, conservación, investigación y difusión.

El origen de estos planes se remonta al Real Decreto 565/1985, de 24 de abril, que creó el Instituto de Conservación y Restauración de Bienes Culturales (ICRBC). En dicho decreto se estableció, entre sus fines, la elaboración de planes para la conservación y restauración del Patrimonio Histórico Español. Este marco normativo surgió tras la transferencia de competencias sobre patrimonio a las Comunidades Autónomas y la promulgación de la Ley de Patrimonio Histórico Español de 1985.

Por otro lado, los Planes Nacionales, surgidos con posterioridad a esta ley, son considerados instrumentos estratégicos de gestión para el patrimonio cultural. Estos planes establecen directrices metodológicas, programan actuaciones específicas y sirven como guía para las administraciones encargadas de la conservación del patrimonio.

Actualmente, el organismo estatal responsable de estos planes es el Instituto del Patrimonio Cultural de España (IPCE), que sustituyó al antiguo ICRBC. Los Planes Nacionales articulan estrategias metodológicas y programan la ejecución y el seguimiento de las intervenciones en bienes culturales, garantizando así una gestión coordinada y efectiva por parte de todas las administraciones (MECD, 2015).

Entre los planes para el patrimonio cultural de bienes inmuebles redactados por el IPCE se encuentran:

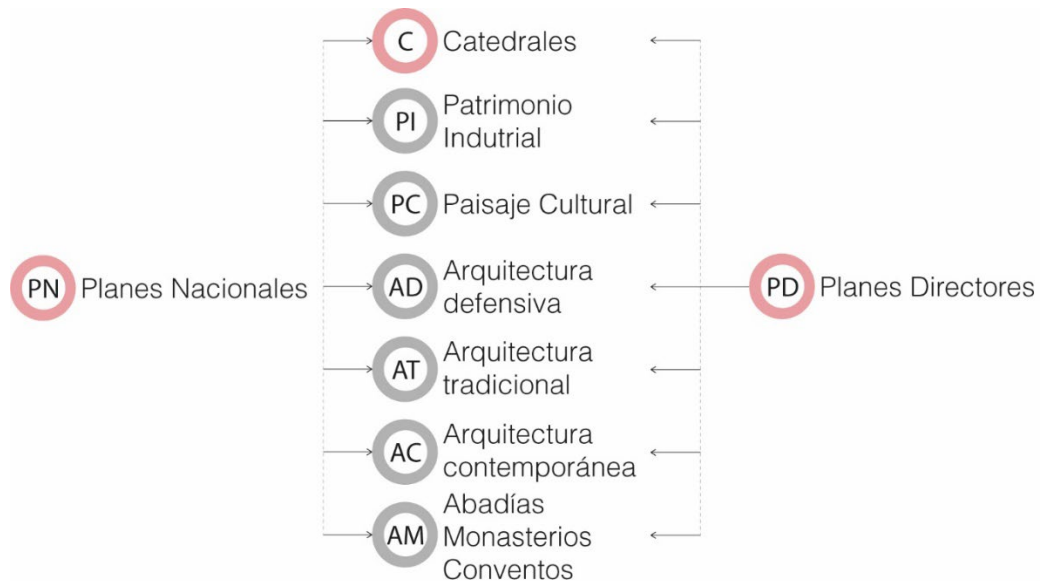


Figura 2.1: Planes Nacionales de bienes inmuebles (elaboración propia).

Tras analizar la importancia de los Planes Directores y los distintos Planes Nacionales en la gestión del patrimonio cultural en España, este trabajo se enfocará en el Plan Nacional de Catedrales, el primero desarrollado por el IPCE. Este plan, elaborado a partir de 1987 y aprobado en 1990, establece directrices para la conservación y restauración de estas construcciones, promoviendo soluciones duraderas y criterios unificados para edificios de características similares (MECD, 2015).

2.4. Niveles de conocimiento del patrimonio cultural

El listado de los bienes que componen el patrimonio cultural es la primera operación obligada y necesaria, ya que constituye el punto de partida para su conocimiento y conservación (González-Varas, 1999, p. 77). La preservación de los bienes culturales comienza con su registro e identificación, tareas que se llevan a cabo mediante inventarios y catálogos, herramientas tradicionales esenciales para el estudio, análisis y protección del patrimonio.

Los inventarios son instrumentos de carácter sumario que se centran en la identificación, descripción y ubicación del bien, sin considerar su significación artística, histórica o cultural. Funcionan como un registro que recoge únicamente los datos básicos, como la

naturaleza, datación, ubicación, propiedad y grado de protección del objeto (González-Varas, 1999).

Los catálogos, por su parte, amplían el conocimiento al incluir una valoración histórico-artística o cultural. A diferencia de los inventarios, no se limitan a la identificación del bien, sino que aportan un análisis más profundo basado en la investigación.

Si bien inventario y catalogación poseen finalidades y metodologías distintas, ambas son operaciones complementarias dentro de un mismo proceso cognoscitivo. El inventario representa una actividad inicial de registro, caracterizada por una mera relación extrínseca con el bien, mientras que la catalogación supone un nivel más avanzado de estudio, en el que el objeto se analiza en su contexto, significado y valor (González-Varas, 1999, p. 77). De este modo, la catalogación es el resultado maduro de una iniciativa cognoscitiva en la que el inventario constituye la fase preliminar e indispensable.

Dado que ambos procesos forman parte de un mismo sistema de conocimiento, en ocasiones se emplea el término conjunto inventario-catalogación, aunque en realidad hacen referencia a dos niveles diferenciados de descripción documental del patrimonio. El propósito final de ambos es establecer un conocimiento sistemático que facilite la adecuada protección de los bienes culturales. No obstante, mientras el inventario se enfoca en la identificación, los catálogos tienen también aplicaciones en la docencia, la investigación y la difusión (Alba, 2014).

2.5. Marco normativo: organismos internacionales, instrumentos y tecnologías digitales

2.5.1 Organismos internacionales y su papel en la preservación del patrimonio arquitectónico

Tras la culminación de la Segunda Guerra Mundial, surgieron organismos internacionales dedicados a la conservación de la cultura y el patrimonio. Entre ellos, la UNESCO (Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura), creada en 1945, trabaja en la promoción de la cooperación internacional para la protección del patrimonio cultural, a través de programas como el de Patrimonio Mundial. Más tarde, ICOMOS (Consejo Internacional de Monumentos y Sitios) en 1965 se especializa en la conservación de monumentos y sitios históricos, desarrollando principios y directrices para garantizar su protección.

A lo largo de las décadas, ambos organismos han redactado diversas cartas, principios, recomendaciones, convenios, protocolos, resoluciones y normas que, en su conjunto, constituyen un marco normativo fundamental para la protección y gestión del patrimonio cultural. La preservación del patrimonio arquitectónico requiere de normativas y estrategias que trasciendan los contextos nacionales, garantizando su protección en un marco global, y así esos organismos han desempeñado un papel clave en la elaboración

de principios y metodologías que orientan la conservación y gestión del patrimonio cultural, tanto tangible como inmaterial.

Entre los documentos fundamentales de la UNESCO se destacan la Convención sobre la Protección del Patrimonio Mundial, Cultural y Natural (1972), que establece criterios para la identificación y conservación de bienes de valor universal excepcional, y la Convención para la Salvaguardia del Patrimonio Cultural Inmaterial (2003), que reconoce la importancia de las tradiciones, conocimientos y expresiones culturales en la preservación de los sitios históricos.

Por su parte, ICOMOS ha desarrollado una serie de cartas y principios que han definido los estándares en restauración y conservación. La Carta de Venecia (1964) es un referente en la restauración de monumentos, enfatizando la autenticidad y el respeto por la historia arquitectónica. La Carta de Burra (2013) introduce un enfoque basado en la significación cultural, mientras que otras cartas, como la de Turismo Cultural (1999, actualizada en 2022) y la de Itinerarios Culturales (2008), abordan la relación entre patrimonio, turismo y desarrollo sostenible.

Además, documentos como la Declaración de Nara sobre Autenticidad (1994) amplían la noción de autenticidad en distintos contextos culturales, y los Principios de Sevilla (2017) establecen criterios para el uso de tecnologías digitales en la reconstrucción del patrimonio.

Estos marcos normativos y doctrinales han evolucionado para responder a desafíos contemporáneos, incorporando enfoques de sostenibilidad, participación comunitaria y avances tecnológicos en la conservación del patrimonio arquitectónico.

2.5.2 Aplicación de tecnologías digitales en la digitalización y preservación del patrimonio

Con la irrupción de las Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (TIC) a partir de la segunda mitad del siglo XX, y su expansión y adopción masiva en la década de 1990, comenzó a gestarse una transformación en la gestión y conservación del patrimonio cultural. Este cambio dio lugar, entre otros documentos, a la Carta de Cracovia (2000), que establece principios para la conservación y restauración del patrimonio construido, reconociendo la diversidad cultural y la pluralidad de valores asociados a los bienes patrimoniales, al tiempo que promueve el uso de modernas tecnologías como bancos de datos, sistemas de información y presentaciones virtuales.

En la Unión Europea (UE), los Principios de Lund (2001) abordan la coordinación de programas de digitalización entre los Estados miembros y promueven la inclusión del contenido europeo en las redes globales. Se destaca que los recursos culturales y científicos digitalizados de Europa constituyen un activo público único, que forma parte de la memoria colectiva y proporciona una base sólida para el desarrollo de las industrias de contenido digital. La digitalización se reconoce como un proceso clave para mejorar el acceso ciudadano y asegurar la preservación del patrimonio cultural europeo.

En 2003, la UNESCO publica la Carta sobre la preservación del patrimonio digital, en la que elabora directrices técnicas detalladas sobre la conservación de este patrimonio. Reconoce los recursos informáticos como herramientas para la conservación electrónica, dando lugar al concepto de patrimonio digital como fuente de intercambio de conocimiento, con un énfasis en la accesibilidad. Además, busca proteger dicho patrimonio.

La Carta de Londres (2006) establece varios principios fundamentales en materia de patrimonio cultural, particularmente en lo que respecta al uso de la visualización tridimensional y las tecnologías digitales. Define directrices para la aplicación de métodos de visualización basados en ordenadores, enfocándose en aspectos clave como la integridad intelectual, la fiabilidad, la documentación, la sostenibilidad y el acceso al patrimonio cultural. Estas directrices buscan garantizar que la visualización del patrimonio digital sea rigurosa tanto intelectual como técnicamente, basada en un enfoque académico sólido, asegurando que las representaciones sean precisas y reflejen el estado actual del conocimiento. De igual manera, la transparencia y la documentación juegan un papel crucial. La Carta exige que los resultados de las investigaciones que utilicen visualización por ordenador transmitan con precisión el estado de la evidencia y las hipótesis, y que se documente suficiente información para que los métodos y resultados sean comprensibles y evaluables adecuadamente.

En el mismo 2006, la UE aprobó la Recomendación de la Comisión sobre la digitalización, la accesibilidad en línea del material cultural y la conservación digital, con el objetivo de fomentar la digitalización del material de bibliotecas, archivos y museos. Esta recomendación facilitó la creación de Europeana, un punto de acceso común y multilingüe al patrimonio cultural digital de Europa. Europeana es una plataforma digital, una biblioteca europea que ofrece acceso multilingüe y digital al patrimonio cultural europeo, permitiendo la búsqueda en línea de materiales culturales conservados en diferentes lugares y por diversas organizaciones (Europeana, s.f.).

La Carta de ICOMOS (2008) para la Interpretación y Presentación de Sitios de Patrimonio Cultural aborda el uso de tecnologías digitales en la interpretación y presentación del patrimonio cultural, destacando la importancia de las presentaciones electrónicas como herramientas clave para comunicar el valor de estos sitios. Se enfoca en principios esenciales como el acceso, permitiendo que las tecnologías faciliten la información sobre el patrimonio; la comprensión, utilizando herramientas interactivas y educativas para hacer la información más accesible y entendible; y la autenticidad, asegurando que las representaciones digitales sean fieles a los valores originales del patrimonio. También resalta la sostenibilidad, promoviendo el uso de tecnologías duraderas y accesibles a largo plazo, y la participación, involucrando a las comunidades locales y grupos de interés en el proceso de interpretación. Finalmente, la carta subraya la necesidad de continuar desarrollando tecnologías y metodologías innovadoras para mejorar la presentación, comprensión y preservación del patrimonio cultural.

La Declaración de Florencia de ICOMOS (2014) sobre el Patrimonio y el Paisaje como Valores Humanos ofrece varias perspectivas clave sobre el uso de las tecnologías

digitales aplicadas al patrimonio cultural. Destaca la importancia de que la implementación de tecnologías en el ámbito del patrimonio cultural esté alineada con objetivos claros y bien definidos, que aseguren su eficacia y respeto por los valores inherentes a estos bienes. En cuanto a la estandarización y simplificación, subraya la necesidad de desarrollar herramientas que sean reconocidas y aplicables a nivel internacional, garantizando así la precisión, fiabilidad y verificabilidad de los resultados obtenidos. Además, la declaración pone un énfasis particular en el desarrollo de tecnologías accesibles y de bajo costo, que faciliten su adopción y uso, especialmente en el ámbito de la documentación, conservación y monitoreo del patrimonio cultural, haciendo que estas herramientas sean viables para una amplia gama de usuarios. Finalmente, se resalta la importancia de la difusión del conocimiento a través de plataformas y herramientas que permitan compartir la información generada, con el objetivo de superar las desigualdades culturales y sociales y asegurar que el patrimonio cultural, en su diversidad, sea accesible para todos.

Los Principios de Sevilla de ICOMOS (2017), por su parte, resaltan la digitalización como una herramienta clave para la preservación del patrimonio cultural, enfocándose en el uso de tecnologías digitales para registrar, documentar y proteger los activos culturales europeos frente a diversas amenazas, como el deterioro y los desastres naturales. La participación digital y el acceso abierto son fundamentales en este proceso, ya que permiten democratizar el acceso al patrimonio, lo que promueve su uso y valoración en distintos sectores de la sociedad. La digitalización no solo mejora el acceso, sino que también favorece la interacción y la participación de la comunidad, permitiendo que más personas se involucren en la preservación y el disfrute del patrimonio cultural.

En 2019, influenciada por el incendio de la Catedral de Notre Dame de París, se redactó la Declaración de Cooperación para Avanzar en la Digitalización del Patrimonio Cultural, un documento que subraya la necesidad urgente de digitalizar en 3D artefactos, monumentos y sitios del patrimonio cultural, desafío que se presenta como el objetivo principal a alcanzar en la próxima década. La declaración refleja la urgencia de utilizar tecnologías digitales para registrar, documentar y preservar el patrimonio cultural europeo frente a amenazas como desastres naturales, contaminación, turismo masivo, deterioro, terrorismo y vandalismo, promoviendo además el acceso abierto a los recursos digitales.

En este sentido, las tecnologías emergentes, como el *Big Data*, la Inteligencia Artificial y la realidad extendida, abren nuevas posibilidades para procesar y utilizar el patrimonio digitalizado, ofreciendo herramientas potentes para la restauración, manejo y comprensión de los bienes culturales. En particular, las tecnologías 3D son cruciales para la preservación digital, ya que permiten modelar y restaurar de manera virtual los sitios y objetos, asegurando que se mantengan accesibles a las futuras generaciones. La implementación de principios éticos y la transparencia en el uso de visualizaciones tridimensionales son también esenciales para garantizar una intervención respetuosa y rigurosa en el patrimonio cultural, involucrando a las comunidades locales en el proceso.

La infraestructura interpretativa digital, que abarca desde instalaciones físicas hasta las nuevas tecnologías de interpretación, debe ser aprovechada para facilitar la comprensión

del patrimonio, integrando las estrategias tradicionales y las innovadoras. Además, la colaboración y cooperación entre los sectores de la cultura, el turismo y la comunidad local es crucial para promover el patrimonio digitalizado de manera sostenible, asegurando que atraiga visitantes sin comprometer sus valores culturales.

En cuanto a la sostenibilidad, es un eje central en la planificación de la interpretación del patrimonio, debiendo ser considerada tanto en los aspectos sociales como financieros y medioambientales, con el objetivo de minimizar el impacto adverso de las tecnologías digitales en los valores culturales y naturales de los sitios preservados. Además, se fomenta la reutilización de recursos digitalizados, movilizando redes nacionales y regionales para promover el uso innovador de estos recursos mediante las tecnologías supra citadas.

Los diferentes documentos antes enunciados, que justifican la aplicación de tecnologías digitales en la digitalización y preservación del patrimonio cultural, han sido fundamentales para adaptar la conservación del patrimonio a los retos del siglo XXI. Organismos como la UNESCO y el ICOMOS han impulsado el desarrollo de principios y directrices que han promovido el uso de tecnologías accesibles, sostenibles y transparentes, fomentando la participación de las comunidades locales y la cooperación global. Así, es posible constatar, por fin, que la digitalización ha trascendido su rol inicial de simple documentación para convertirse en una herramienta clave no solo para mejorar el acceso al patrimonio, sino también para su conservación, restauración y protección ante las diversas amenazas.

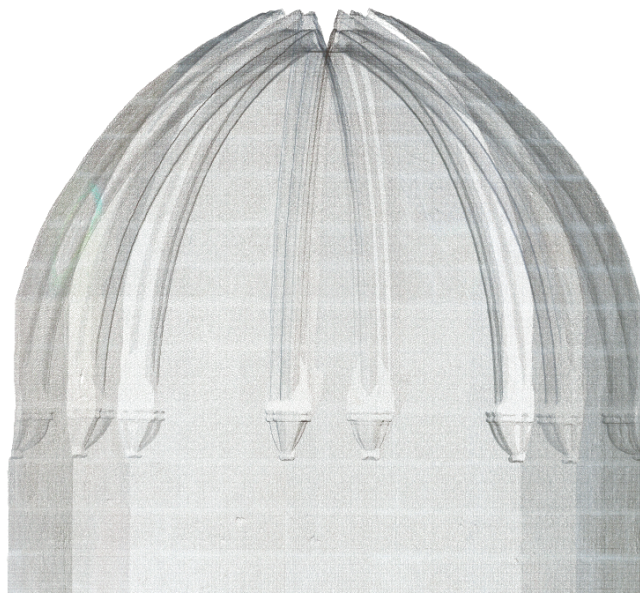
Referencias del Capítulo 2

- Alba, E. (2014). Catálogo e inventario como instrumentos para la gestión del patrimonio cultural. En R. López (Coord.), *Educación y entorno territorial de la Universitat de València* (pp. 67-93). <http://hdl.handle.net/10550/35409>
- Alegre Ávila, J. M. (1994). *Evolución y régimen jurídico del Patrimonio Histórico*. Madrid: Ministerio de Cultura.
- Boletín de la Real Academia de la Historia. (2008). *Ley relativa a los monumentos nacionales arquitectónicos artísticos (1915)*. Boletín de la Real Academia de la Historia, 66, Alicante: Biblioteca Virtual Miguel de Cervantes. Recuperado de <https://www.cervantesvirtual.com/nd/ark:/59851/bmccgq7d0>.
- Boletín de la Real Academia de la Historia. (2008). *Ley relativa a los monumentos nacionales arquitectónicos artísticos (1915)*. Biblioteca Virtual Miguel de Cervantes. <https://www.cervantesvirtual.com/nd/ark:/59851/bmccgq7d0>
- Boletín Oficial del Estado. (1915). *Ley relativa a los monumentos nacionales arquitectónicos artísticos*. Boletín Oficial del Estado, (64), 708-709. Recuperado de <https://www.boe.es/datos/pdfs/BOE/1915/064/A00708-00709.pdf>
- Carta de Londres. (2006). *La Carta de Londres para el uso de la visualización tridimensional en la investigación y divulgación del patrimonio cultural*.
- Casar Furió, M. E.; Broseta Palanca, M. T. (2023). *Introduction to urban planning and the basic concepts of legal architecture*. Tirant lo Blanch. ISBN 978-84-1197-470-7.
- Casar Furió, M. E. (2021). *La gestión de forma activa e integrada del patrimonio cultural*. En *X Congreso Internacional de Ordenación del Territorio: recuperación, transformación y resiliencia. El papel del territorio* (pp. 437-444). ISBN 978-84-9133-414-9.
- Choay, F. (2001). *The invention of the historic monument* (L. M. O'Connell, Trad.). Cambridge University Press. (Obra original publicada en 1992).
- Comisión Europea. (2006). *Recomendación de la Comisión, de 24 de agosto de 2006, relativa a la digitalización y la accesibilidad en línea del material cultural y a la conservación digital*. Recuperado de <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/PDF/?uri=CELEX:32006H0585&from=EN>
- Comisión Europea. (2011). *Recomendación de la Comisión, de 27 de octubre de 2011, sobre la digitalización y la accesibilidad en línea del material cultural y la preservación digital*. Recuperado de <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/PDF/?uri=CELEX:32011H0711&from=EN>
- Comisión Europea (2014). *Implementation of Commission Recommendation on the digitisation and online accessibility of cultural material and digital preservation. Progress report 2011-2013*. European Union.
- Comisión Europea (2016). *Implementation of Commission Recommendation on the digitisation and online accessibility of cultural material and digital preservation. Progress report 2013-2015*. European Union.
- Comisión Europea (2018). *Implementation of Commission Recommendation on the digitisation and online accessibility of cultural material and digital preservation. Consolidated progress report 2015-2017*. European Union.

- Comisión Europea (2019). *Declaración de Cooperación para avanzar en la digitalización del patrimonio cultural*.
- Comisión Europea (2021). *Recomendación (UE) 2021/1970 de la comisión de 10 de noviembre de 2021 relativa a un espacio común europeo de datos para el patrimonio cultural*.
- Comisión Europea (2022). *Study on quality in 3D digitisation of tangible cultural heritage: mapping parameters, formats, standards, benchmarks, methodologies, and guidelines. VIGIE 2020/654. Final Study Report*. Luxembourg: Publications Office of the European Union.
- Consejo de Europa (2022). *Convenio marco sobre el valor del patrimonio cultural para la sociedad*.
- Conselleria de Educación, Investigación, Cultura y Deporte. (2018). Orden 21/2018, de 16 de mayo, de la Conselleria de Educación, Investigación, Cultura y Deporte, por la que se establecen las bases reguladoras de las subvenciones para la elaboración de la sección de patrimonio cultural de catálogos de protecciones y la redacción de planes especiales de protección y de planes directores para intervención en bienes de interés cultural de la Comunitat Valenciana [2018/4920]. Diari Oficial de la Generalitat Valenciana, 8300, 20417–20427.
- España. (1931). *Constitución de la República Española (1931)*. Congreso de los Diputados. https://www.congreso.es/constitucion/ficheros/historicas/cons_1931.pdf
- España. (1993). *Novísima Recopilación de las Leyes de España: Tomo IV (Libros VIII y IX)*. Madrid: Agencia Estatal Boletín Oficial del Estado.
- Europeana. (s.f.). Europeana: Explora el patrimonio digital europeo. Recuperado el [fecha de consulta], de <https://www.europeana.eu/es>
- France. Commission des monuments historiques. (1793). *Compte rendu à la Convention nationale, par la Commission supprimée des monuments, et servant de réponse au rapport du Comité d'instruction publique*. De l'imprimerie de Brosselard.
- Gironde (France). Commission des monuments et documents historiques et des bâtiments civils. (1865). *Table alphabétique et analytique des matières contenues dans les Comptes-rendus de la Commission des monuments et documents historiques et bâtiments civils, de 1840 à 1855*. Imprimerie E. Bissei.
- Gobierno de España. (1985). Ley 16/1985, de 25 de junio, del Patrimonio Histórico Español. *Boletín Oficial del Estado (BOE)*, núm. 155, de 29 de junio de 1985. <https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-1985-12534>
- González-Varas, I. (1999). *Conservación de Bienes Culturales. Teoría, historia, principios y normas*. Manuales de Arte Cátedra.
- ICOMOS (2003). *Principios para la preservación, conservación y restauración de pinturas murales*.
- ICOMOS (2008). *Carta ICOMOS para Interpretación y Presentación de Sitios de Patrimonio Cultural*.
- ICOMOS (2014). *Declaración de Florencia sobre el Patrimonio y el Paisaje como Valores Humanos*.
- ICOMOS. (2017). *Principios de Sevilla: principios internacionales de la arqueología virtual*. Recuperado de <https://icomos.es/wp-content/uploads/2020/06/Seville-Principles-IN-ES-FR.pdf>
- Lampérez y Romea, V. (1907). *Bases y medios prácticos para hacer el inventario de los monumentos arquitectónicos de España: Memoria*. En IV Congreso Nacional de Arquitectos. Imprenta y Encuadernación de la Casa de Misericordia.
- Léon, P. (1951). *La vie des monuments français : destruction, restauration*. Daupeley-Gouverneur.

- Mérimée, P. A., & France. Commission des monuments historiques (Eds.). (1840). *Rapport au ministre de l'Intérieur / signé P. Mérimée ; Monuments historiques*. Impr. royale.
- Ministerio de Educación, Cultura y Deporte. (2015). *Plan Nacional de Catedrales*. Secretaría General Técnica, Subdirección General de Documentación y Publicaciones.
- Ministerio de Cultura y Deporte. (2025). *Códigos electrónicos: Patrimonio cultural de las Administraciones Públicas* (Ed. actualizada al 21 de marzo de 2025). Subdirección General de Patrimonio Cultural. Boletín Oficial del Estado.
- Muñoz Cosme, A. (2010). *Catálogos e inventarios del patrimonio en España*. En *El Catálogo Monumental de España (1900-1961). Investigación, restauración y difusión* (pp. 15-38). Ministerio de Cultura.
- O'Connell, L. M. (2022). Theorizing patrimoine: Reflections on Françoise Choay's textes instaurateurs. *Conversaciones con*, 10, 173-185. <https://revistas.inah.gob.mx/index.php/conversaciones/article/view/17682>
- Poulot, D. (2009). *Uma história do patrimônio no Ocidente* (T. Trad.). São Paulo: Estação Liberdade.
- Real Academia de la Historia. (1803). *Real Cédula de S.M. y Señores del Consejo, por la cual se aprueba y manda observar la Instrucción formada por la Real Academia de la Historia, sobre el modo de recoger y conservar los monumentos antiguos descubiertos o que se descubran en el Reino*. <https://www.cervantesvirtual.com/nd/ark:/59851/bmc1c3g4>
- Riegl, A. (1982). *The modern cult of monuments: Its character and its origin* (K. Bruckner, Trad.). *Oppositions*, 25, 21-51. (Obra original publicada en 1903).
- Ruskin, J. (1849). *The seven lamps of architecture*. Smith, Elder & Co.
- Theorizing patrimoine: reflections on Françoise Choay's textes instaurateurs. (2022). Lauren M. O'Connell. *Conversaciones con*, 10, 173-185. <https://revistas.inah.gob.mx/index.php/conversaciones/article/view/17682>
- Unión Europea. (2001). *Principios de Lund: conclusiones de la reunión de expertos, Lund, Suecia, 4 de abril de 2001*. Recuperado de https://www.iccu.sbn.it/export/sites/iccu/documenti/lund_principles-en.pdf
- UNESCO. (1972). Convención sobre la Protección del Patrimonio Mundial, Cultural y Natural. Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura. <https://whc.unesco.org/en/conventiontext/>
- UNESCO (2003). *Carta sobre la preservación del patrimonio digital*.
- UNESCO/UBC (2012). *Declaración de Vancouver. La Memoria del Mundo en la era digital: digitalización y preservación*.
- UNESCO. (2015). *Informe de síntesis sobre la aplicación de la recomendación relativa a la preservación del patrimonio documental, incluido el patrimonio digital, y el acceso al mismo*. Recuperado de <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000235305>
- UNESCO (2016). *Recomendación relativa a la preservación del patrimonio documental, comprendido el patrimonio digital, y el acceso al mismo*.

Capítulo 3. Planes Directores y su aplicación en la gestión patrimonial



Capítulo 3: Planes Directores y su aplicación en la gestión patrimonial

Presentación

Como se mencionó en el capítulo anterior, nos hemos centrado en el estudio del Plan Nacional de Catedrales (PNC) de España para luego analizar los Planes Directores de Catedrales implementados. Consideramos que esta estructura es completa y, mediante su simplificación, puede adaptarse a otros edificios históricos con características similares.

El PNC comenzó con un inventario de los edificios y conjuntos catedralicios para evaluar su estado de conservación. A partir de este diagnóstico, se establecieron lineamientos metodológicos generales y se diseñaron programas de intervención específicos para cada caso.

El objetivo del PNC es mejorar el estudio, conocimiento y difusión de las catedrales, además de coordinar las inversiones destinadas a su conservación. Dado que la legislación española delega a las Comunidades Autónomas la gestión del Patrimonio Cultural, el PNC, impulsado por el Ministerio de Educación, Cultura Y Deporte (MECD), busca establecer un marco de cooperación entre el Estado y las CCAA para garantizar la preservación de estos bienes.

En este contexto, los Planes Nacionales definen las directrices fundamentales para la elaboración de los Planes Directores, que son estudios detallados sobre los edificios, realizados por equipos multidisciplinares. Estos planes no solo analizan el estado del patrimonio, sino que también establecen estrategias de intervención y conservación a mediano plazo.

3.1. Los Planes Directores de los bienes culturales inmuebles

Un Plan Director para un edificio del patrimonio cultural es un documento técnico y estratégico que traza una hoja de ruta integral para su protección, conservación, restauración, puesta en valor y desarrollo sostenible. Este documento va más allá de ser un mero inventario o un catálogo de intervenciones aisladas, ya que aborda de manera simultánea todas las dimensiones del bien —material (inmueble y mueble) e inmaterial— y se orienta a mediano plazo.

Su objetivo fundamental es ofrecer un diagnóstico detallado del estado actual del edificio y, a partir de ello, definir las acciones precisas que aseguren su preservación y funcionalidad futura. La elaboración del plan requiere un enfoque interdisciplinar, integrando a expertos en arquitectura, arqueología, historia, restauración e ingeniería, entre otras disciplinas. De esta manera, se garantiza una visión global que considere tanto el valor patrimonial como las características constructivas y el entorno del inmueble.

Además, el proceso debe ser participativo, involucrando a todos los actores relacionados con el edificio —desde la administración pública y la propiedad hasta los usuarios y la comunidad local— para que las decisiones adoptadas sean sostenibles y respondan a las necesidades reales del contexto.

Finalmente, el Plan Director se estructura en un órgano de gestión cuya configuración varía según la complejidad del proyecto: puede ser un equipo reducido o una comisión mixta, pero en cualquier caso requiere un compromiso firme por parte de la administración. Así, este instrumento actúa como nexo entre los diversos agentes implicados y el monumento, facilitando la coordinación y el seguimiento de las intervenciones (Barceló de Torres, 2019).



Figura 3.1: Fundamentación de un Plan Director (elaboración propia).

El seguimiento y control del Plan Director resultan fundamentales, ya que se trata de un documento dinámico y adaptable que debe actualizarse conforme su órgano gestor redefine estrategias y explora nuevas oportunidades. A lo largo de los últimos años, esta flexibilidad ha permitido optimizar la obtención de recursos, atraer nuevos patrocinadores y mejorar la gestión administrativa de los expedientes. Aunque su constante actualización supone un reto, también lo convierte en una herramienta altamente efectiva, facilitando la evaluación de los avances y reforzando el compromiso de los agentes involucrados en la distribución de recursos, aspecto clave para el éxito del plan.

Además de estructurar la gestión y planificación, el Plan Director promueve una tutela activa del patrimonio cultural. Su alcance abarca la difusión del conocimiento, la gestión integral, la conservación de los bienes culturales, el impulso de la sostenibilidad

económica y el desarrollo de estrategias políticas que garanticen su preservación en el tiempo (Barceló de Torres, 2019).

De forma general, las fases esenciales de un Plan Director se pueden desglosar en los siguientes apartados:

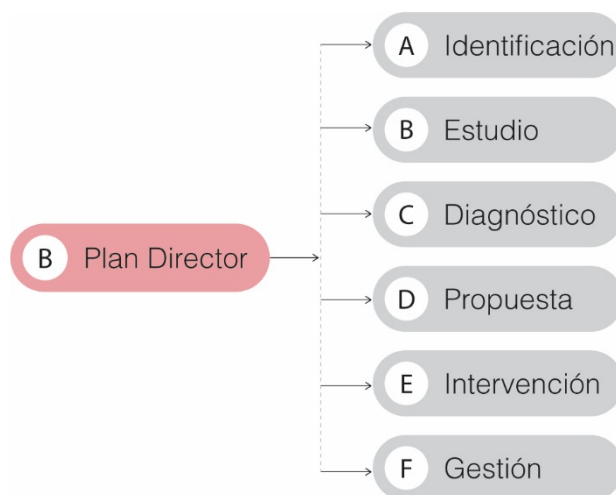


Figura 3.2: Fases generales de un Plan Director (elaboración propia).

Identificación del edificio: se trata de la recopilación de datos básicos sobre el inmueble, incluyendo su ubicación, contexto histórico, relevancia arquitectónica y cultural. Esta fase establece la base informativa que guiará el resto del plan.

Estudio: se trata del análisis detallado del edificio y su entorno. Se revisa la documentación existente, se realizan estudios técnicos (estructurales, materiales, ambientales) y se evalúa el estado actual. El objetivo es comprender en profundidad las características y condiciones del patrimonio.

Diagnóstico: corresponde a la evaluación del estado de conservación para identificar patologías, deficiencias y riesgos. Se determina cuáles son los problemas principales y se analizan sus causas y efectos, permitiendo establecer un punto de partida para las intervenciones.

Formulación de propuestas: comprende el desarrollo de estrategias y soluciones que respondan a las necesidades detectadas en el diagnóstico. En esta fase se definen objetivos, prioridades y acciones específicas para la conservación, restauración o mejora del edificio.

Diseño de la intervención: se trata de la elaboración del proyecto técnico que materializa las propuestas. Se detallan las técnicas de intervención, el cronograma de actividades, el presupuesto y otros aspectos operativos necesarios para ejecutar el plan de manera efectiva.

Gestión: corresponde a la organización, coordinación y seguimiento de la implementación del plan. Esta fase incluye la planificación de recursos, la asignación de responsabilidades y el control de calidad, asegurando que las intervenciones se realicen conforme a lo previsto y se logre la sostenibilidad a largo plazo del patrimonio.

Para asegurar el adecuado desarrollo de un Plan Director, la metodología general debe abordar, al menos, los siguientes interrogantes:



Figura 3.3: Fases generales de un Plan Director (elaboración propia).

3.2. Los Planes Directores como herramienta integral para la gestión digital del patrimonio edificado

En la era digital, los Planes Directores han evolucionado para convertirse en instrumentos estratégicos que integran tanto la planificación tradicional como las innovaciones tecnológicas en la gestión del patrimonio edificado. Estos planes no solo permiten realizar diagnósticos precisos y detallados del estado de los bienes culturales, sino que también facilitan el seguimiento continuo y la actualización de las intervenciones mediante el uso de herramientas digitales.

La integración de herramientas como GIS, el modelado 3D BIM, y las plataformas de gestión de datos posibilita la creación de bases de datos robustas y la generación de simulaciones predictivas, lo que contribuye a una toma de decisiones más informada y a la optimización de recursos. Además, esta convergencia entre lo digital y lo tradicional fomenta la transparencia y la participación de los actores involucrados, ofreciendo visualizaciones interactivas que acercan el patrimonio a la comunidad.

En la figura 3.4, es posible verificar como la incorporación de soluciones avanzadas, como GIS, BIM, SfM¹ y PCD, permite estructurar y analizar la información de manera dinámica y precisa:

¹ SfM: *Structure from Motion*.

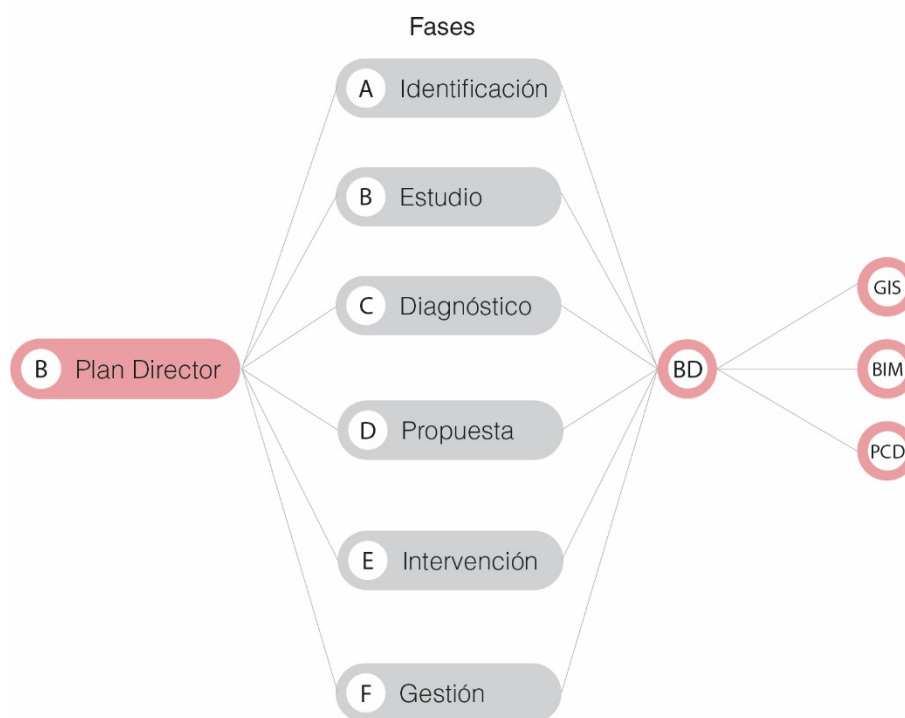


Figura 3.4: Relación entre las fases generales de un Plan Director y las bases de datos (elaboración propia).

3.3. El Plan Nacional de Catedrales (PNC)

El Plan Nacional de Catedrales fue el primero de los planes nacionales redactado por el Estado español, iniciado en 1987 y aprobado en 1990. En 2010, se identificó la necesidad de revisar los planes nacionales existentes, lo que llevó a la creación de una comisión para la revisión del Plan Nacional de Catedrales. Entre 2010 y 2011, esta comisión celebró tres reuniones con el objetivo de evaluar y actualizar sus directrices. (*Plan Nacional de Catedrales, 2015*).

El principal propósito del PNC es la preservación y conservación del patrimonio catedralicio, asegurando su protección y restauración a través de estrategias integradas. Para ello, busca coordinar las intervenciones en estos monumentos, estableciendo programas de mantenimiento continuo y definiendo criterios de restauración. Además, se plantea la necesidad de gestionar eficientemente los recursos, priorizando las intervenciones según las necesidades específicas de cada catedral y optimizando el uso de los fondos disponibles con estrategias de conservación a largo plazo.

Otro aspecto fundamental del plan es la articulación entre las diferentes entidades responsables, fomentando la colaboración entre administraciones públicas, cabildos catedralicios y otras instituciones. En este sentido, se busca facilitar la convergencia de iniciativas dedicadas a la protección y restauración, promoviendo un enfoque integral que garantice la conservación y puesta en valor de estos monumentos históricos.

El PNC define el Pliego de Condiciones Base para la elaboración de los Planes Directores de Catedrales, además de una ficha básica que recoge el estado de conservación de cada catedral. También destaca la importancia del Plan Director como una herramienta fundamental para la gestión coordinada de intervenciones entre las Comunidades Autónomas, la Iglesia y la Administración Central.

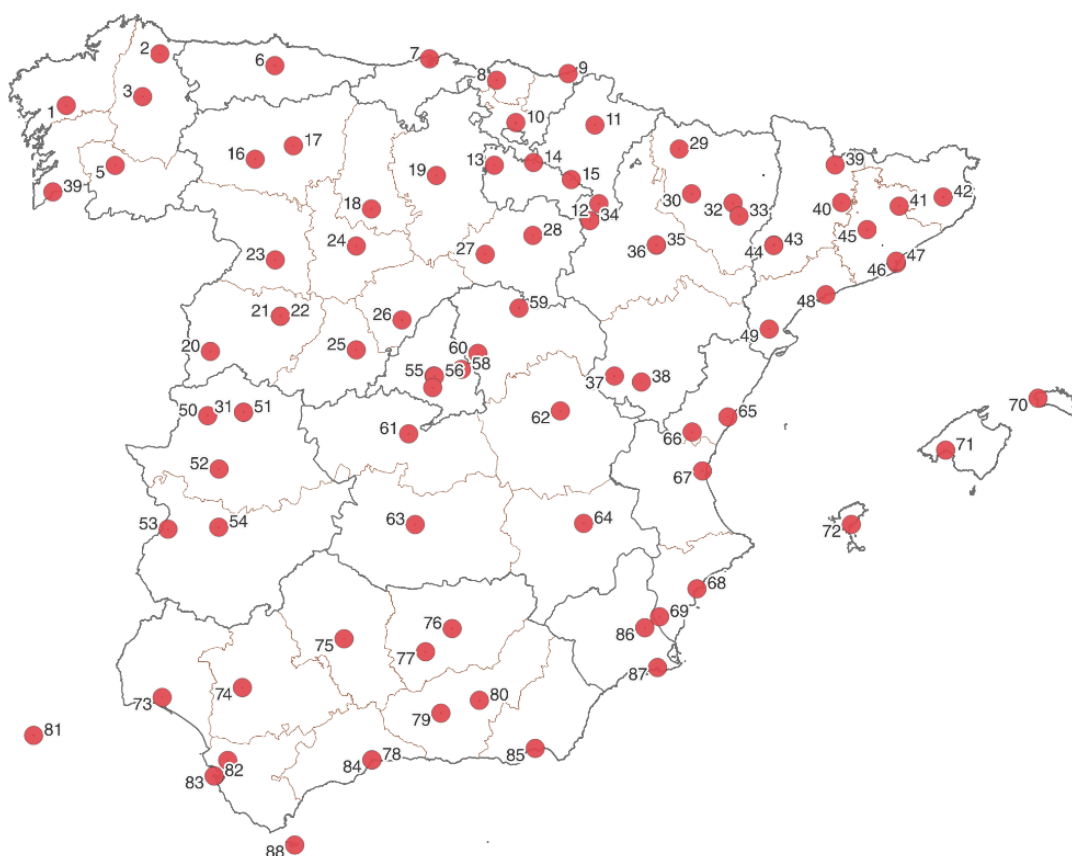
Los Planes Directores buscan alcanzar un alto nivel de conocimiento sobre el bien patrimonial, estableciendo un diagnóstico preciso de su estado actual con el fin de definir programas de actuación adecuados. En este contexto, el PNC establece los lineamientos fundamentales para su desarrollo y aplicación:

“Los Planes Directores consisten en un estudio lo más minucioso posible sobre el monumento, a fin de establecer, para un periodo de ocho a diez años, las posibles actuaciones en las materias antes señaladas (intervenciones e inversiones, mantenimiento, estudio y difusión). Deberán ser redactados por equipos pluridisciplinarios que pueden ser distintos en cada una de las fases. Concretamente, en la fase previa se puede establecer la conveniencia de su encargo a un técnico específico o estar realizado directamente por la Administración.” (PNC, 2015)

3.4. Los Planes Directores de Catedrales

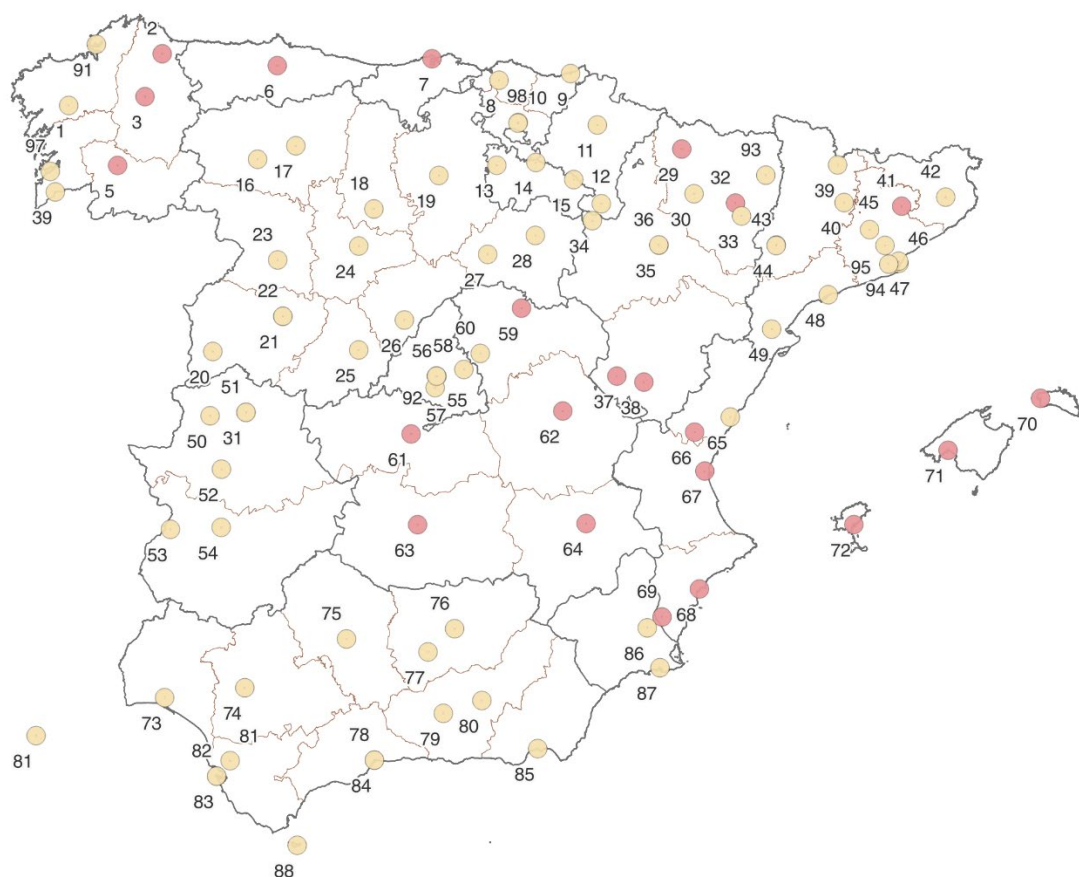
La existencia de los planes directores está relacionada con el hecho de que los recursos asignados a la intervención del patrimonio son finitos, lo que hace necesario un documento que racionalice dichas intervenciones. Esto implica que, ante los problemas detectados, los recursos disponibles deben asignarse de manera eficiente, priorizando lo más urgente. Por ello, es fundamental conocer el edificio en detalle para generar un diagnóstico que establezca, de forma jerárquica, las intervenciones en una línea temporal, comúnmente organizada en programas de actuación.

En España, la mayoría de los Planes Directores de Catedrales fueron redactados por las distintas catedrales a finales de la década de 1990, tras la firma del *Primer Acuerdo de Colaboración para el Desarrollo del Plan Nacional de Catedrales* en 1997. Las catedrales firmantes de este acuerdo fueron las primeras 90 enumeradas en la figura 3.5. Además, en la figura 3.6, en color rosa, se destacan aquellas que iniciaron su Plan Director entre 1997 y 2003, como vemos un reducido grupo de tan solo 25 catedrales.



Nº Catedral	Nº Catedral	Nº Catedral
1 Santiago de Compostela	31 Roda de Isábena	61 Toledo
2 Mondoñedo	32 Barbastro	62 Cuenca
3 Lugo	33 Monzón	63 Ciudad Real
4 Tuy	34 Tarazona	64 Albacete
5 Orense	35 Seo de Zaragoza	65 Castellón
6 Oviedo	36 Basílica del Pilar	66 Segorbe
7 Santander	37 Albarracín	67 Valencia
8 Bilbao	38 Teruel	68 Alicante
9 San Sebastián	39 Seo de Urgel	69 Orihuela
10 Vitoria	40 Solsona	70 Ciudadela, Menorca
11 Pamplona	41 Vic	71 Palma de Mallorca
12 Tudela	42 Girona	72 Ibiza
13 Santo Domingo de la Calzada	43 Seo de Lérida	73 Huelva
14 Logroño	44 Nueva de Lérida	74 Sevilla
15 Calahorra	45 Manresa	75 Córdoba
16 Astorga	46 Barcelona	76 Baeza
17 León	47 Sagrada Familia	77 Jaén
18 Palencia	48 Tarragona	78 Baza
19 Burgos	49 Tortosa	79 Granada
20 Ciudad Rodrigo	50 Coria	80 Guadix
21 Vieja de Salamanca	51 Plasencia	81 Jerez de la Frontera
22 Nueva de Salamanca	52 Cáceres	82 Nueva de Cádiz
23 Zamora	53 Badajoz	83 Vieja de Cádiz
24 Valladolid	54 Mérida	84 Málaga
25 Ávila	55 Madrid	85 Almería
26 Segovia	56 San Isidro, Madrid	86 Murcia
27 Burgo de Osma	57 Getafe	87 Cartagena
28 Soria	58 Alcalá de Henares	88 Ceuta
29 Jaca	59 Sigüenza	89 La Laguna
30 Huesca	60 Guadalajara	90 Las Palmas

Figura 3.5: Firmantes del acuerdo de Colaboración para el Desarrollo del Plan Nacional de Catedrales. (elaboración propia basado en el Plan Nacional de Catedrales, 2015).



Nº Catedral	Nº Catedral	Nº Catedral
1 Santiago de Compostela	33 Monzón	65 Castellón
2 Mondoñedo	34 Tarazona	66 Segorbe
3 Lugo	35 Seo de Zaragoza	67 Valencia
4 Tuy	36 Basílica del Pilar	68 Alicante
5 Orense	37 Albarracín	69 Orihuela
6 Oviedo	38 Teruel	70 Ciudadela, Menorca
7 Santander	39 Seo de Urgel	71 Palma de Mallorca
8 Bilbao	40 Solsona	72 Ibiza
9 San Sebastián	41 Vic	73 Huelva
10 Vitoria	42 Girona	74 Sevilla
11 Pamplona	43 Seo de Lérida	75 Córdoba
12 Tudela	44 Nueva de Lérida	76 Baeza
13 Santo Domingo de la Calzada	45 Manresa	77 Jaén
14 Logroño	46 Barcelona	78 Baza
15 Calahorra	47 Sagrada Familia	79 Granada
16 Astorga	48 Tarragona	80 Guadix
17 León	49 Tortosa	81 Jerez de la Frontera
18 Palencia	50 Coria	82 Nueva de Cádiz
19 Burgos	51 Plasencia	83 Vieja de Cádiz
20 Ciudad Rodrigo	52 Cáceres	84 Málaga
21 Vieja de Salamanca	53 Badajoz	85 Almería
22 Nueva de Salamanca	54 Mérida	86 Murcia
23 Zamora	55 Madrid	87 Cartagena
24 Valladolid	56 San Isidro, Madrid	88 Ceuta
25 Ávila	57 Getafe	89 La Laguna
26 Segovia	58 Alcalá de Henares	90 Las Palmas
27 Burgo de Osma	59 Sigüenza	91 Concatedral de Ferrol
28 Soria	60 Guadalajara	92 Castrense
29 Jaca	61 Toledo	93 Roda de Isábena
30 Huesca	62 Cuenca	94 San Feliú de Llobrega
31 Roda de Isábena	63 Ciudad Real	95 Tarrasa
32 Barbastro	64 Albacete	97 Concatedral de Vigo

Figura 3.6: Catedrales de España, en color rojo los Planes Directores de Catedrales realizados por el Ministerio de Cultura entre 1997 y 2003 (elaboración propia basado en el PNC, 2015).

3.4.1. Contenido y estructura de los Planes Directores de Catedrales

Los Planes Directores de Catedrales son documentos exhaustivos que recopilan información detallada y profunda sobre cada edificio. Dentro de esta estructura se integra la información sobre el reconocimiento del edificio, el estado de conservación y el diagnóstico sobre afecciones patológicas, propuestas de intervención y estrategias de gestión adaptadas a las necesidades específicas de cada catedral.

Para su redacción es necesario reunir un equipo multidisciplinar compuesto por arquitectos, arqueólogos, historiadores, topógrafos, restauradores, científicos, gestores culturales y, en la actualidad, especialistas en metodologías digitales como BIM y GIS, entre otros. Esta colaboración interdisciplinar permite abordar el estudio desde una perspectiva integral, combinando análisis técnicos, históricos y de conservación con tecnologías digitales.

El Plan Nacional de Catedrales establece una metodología de actuación basada en cinco etapas, enumeradas a continuación:

- A. Identificación de los bienes
- B. Protección de los bienes
- C. Estudio de los bienes
- D. Establecimiento de diagnósticos y estrategias generales
- E. Proyectos, actuaciones y procesos continuos de documentación, conservación preventiva, difusión, etc.

Además, establece una estructura tipo para estos documentos:

- Bloque general
- Bloque patrimonio inmueble
- Bloque patrimonio mueble
- Bloque patrimonio inmaterial
- Análisis y evaluación de riesgos
- Diagnóstico y criterios generales de intervención
- Plan de protección y conservación preventiva
- Plan de mantenimiento
- Plan de conservación y restauración
- Plan de documentación e investigación
- Plan de actuaciones formativas, de accesibilidad y de difusión
- Plan de propuestas de gestión
- Cronograma de aplicación de los planes propuestos

Fuente: (Plan Nacional de Catedrales, 2015)

Dentro de la estructura de los Planes Nacionales, para identificar de forma general cada inmueble, el PNC establece una serie de informaciones mínimas a través de la Ficha Básica del Estado de Desarrollo del Plan Nacional de Catedrales, la cual, a su vez, se estructura en los siguientes apartados:

Sección	Contenido
Identificación	
Nombre de la catedral	[Nombre]
Grado de protección	[Grado]
Ubicación	[Ubicación]
Entorno (incluyendo su delimitación)	[Descripción]
Planos y fotos indicativos	[Adjuntar]
Plan Director	
Fecha de redacción	[Fecha]
Equipo redactor	[Equipo]
Horizonte temporal de programación	[Años]
Horizonte económico de programación	[Presupuesto]
Diagnóstico del estado actual	
Grado de cumplimiento del Plan	
Relación de actuaciones realizadas	[Fecha, intervención, coste]
Relación de actuaciones pendientes	[Intervención, coste estimado]
Estado de conservación	
Patrimonio inmueble	[Descripción]
Patrimonio mueble	[Descripción]
Patrimonio inmaterial	[Descripción]
Necesidades urgentes	[Descripción]
Existencia y cumplimiento de programas de:	
Conservación preventiva	[Sí/No - Estado]
Accesibilidad física	[Sí/No - Estado]
Accesibilidad a la información y al conocimiento (difusión)	[Sí/No - Estado]
Usos actuales	[Descripción]
Visita pública	
Horarios	[Horarios]
Zonas visitables	[Zonas]
Zonas no visitables	[Zonas]

Figura 3.7: Estructura de datos de la Ficha básica del estado de desarrollo del Plan Nacional de Catedrales (elaboración propia basado en el PNC, 2015).

Con estas tres estructuras de información, que son la metodología, estructura tipo y la ficha básica, el PNC define y desarrolla los contenidos mínimos que deben incluir estos planes, lo que resulta fundamental para el estudio y la estructuración de los datos relacionados con los bienes patrimoniales correspondientes a las catedrales.

3.4.2. Experiencias de redacción e implementación de los Planes Directores de Catedrales en España

A partir de la estructura mínima de información establecida por el Plan Nacional de Catedrales, se ha revisado cómo se ha aplicado y organizado la información en los planes redactados para distintas catedrales. Se realizará un estudio comparativo, con el objetivo de obtener una estructura optimizada.

El Plan Director de la Catedral de Valencia (2001)

El Plan Director de la Catedral de Valencia es un documento estratégico redactado en 2001 que establece las directrices para la conservación, gestión y puesta en valor del edificio y su entorno. Presenta distintos bloques temáticos que abarcan aspectos legales, arquitectónicos, patrimoniales y de gestión, y se estructura de la siguiente forma:

- **Situación Legal:** analiza el marco jurídico y urbanístico de la Catedral, considerando la propiedad, normativas de protección y su contexto urbano.
- **Inmueble:** incluye un análisis detallado del edificio desde el punto de vista arquitectónico, histórico y estructural.
- **Bienes Muebles:** se documenta el patrimonio mueble vinculado a la Catedral, su historia, estado de conservación y necesidades de intervención.
- **Entorno:** se estudia la relación de la Catedral con su contexto, analizando su impacto en la conservación y percepción del edificio.
- **Planes de Actuación:** define estrategias para la conservación, gestión y difusión del patrimonio. En este sentido abarca diferentes tipos de planes:
 - Plan de gestión: organización y administración del conjunto catedralicio.
 - Plan de usos: definición de actividades compatibles con su conservación.
 - Plan de estudios e investigaciones: estrategias para el conocimiento del bien.
 - Plan de intervenciones: actuaciones de restauración y conservación.
 - Plan de mantenimiento: tareas rutinarias de conservación preventiva.
 - Plan de difusión: accesibilidad, visitas y divulgación.
 - Programación de inversiones: priorización y planificación económica.
- **Documentación gráfica:** se trata de un completo levantamiento de planos del monumento.

Este Plan Director, como es posible verificar, no está orientado tanto al análisis y diagnóstico, sino al reconocimiento del edificio en sus dimensiones legales, históricas, su entorno y la propuesta de los diferentes planes de actuación.

El Plan Director de la Catedral de Santiago de Compostela (2010-2013)

La estructura del Plan Director de la Catedral de Santiago de Compostela, elaborado entre 2010 y 2013, sigue una organización metódica y detallada, propia de los procesos de reconocimiento, análisis, diagnóstico e intervención. El documento se divide en los siguientes apartados:

- **Planimetría:** incluye el levantamiento topográfico, la actualización y corrección de planos existentes, y el análisis de las infraestructuras de electricidad, fontanería y recogida de aguas pluviales.
- **Estudio de las patologías en las fábricas:** examina el estado de conservación de diferentes partes del edificio, como fachadas, cubiertas, torres, el interior del templo y el claustro.
- **Estudio de los bienes muebles, retablos y pinturas murales:** evalúa el estado y conservación del patrimonio artístico y mobiliario de la Catedral.
- **Estudio de los usos en el edificio claustral:** analiza acabados, usos actuales, conflictos en recorridos y propone medidas de ordenación y optimización del espacio.
- **Estudio de las medidas de seguridad:** se centra en los sistemas de prevención contra incendios, antirrobo y vigilancia en el templo y el claustro.
- **Programa de actuaciones:** establece un plan de intervenciones clasificadas en cuatro niveles de prioridad: prioritarias, secundarias, de remate y de mantenimiento.
- **Memoria documentada:** recopila la información generada en los estudios anteriores para fundamentar las intervenciones propuestas.

Esta estructura permite un análisis integral del estado del monumento, estableciendo el orden de prioridad de las actuaciones sobre el edificio.

El Plan Director de la Mezquita-Catedral de Córdoba (2020)

La estructura del Plan Director que presenta sigue un esquema integral y detallado, organizado en tres grandes bloques (Análisis, Propuesta y Programación), cada uno con apartados específicos que abarcan desde el diagnóstico hasta la ejecución económica. Esta organización refleja un enfoque multidisciplinar y holístico, típico de los planes directores contemporáneos, con énfasis en la conservación preventiva, la gestión sostenible y la vinculación social. A continuación, se explica su estructura:

I. ANÁLISIS

1. Estado de conservación, uso y gestión: evalúa el estado actual del patrimonio y su gestión, dividido en:

- **Patrimonio inmueble:** componentes estructurales (cimentación, muros, cubiertas, techumbres, pavimentos, instalaciones) y entorno. Objetivo: identificar patologías físicas y necesidades técnicas.
- **Patrimonio mueble:** catalogación de bienes artísticos (pintura, retablos, escultura, orfebrería). Enfoque: conservación material y artística.
- **Patrimonio arqueológico:** elementos arqueológicos vinculados al sitio.
- **Patrimonio documental y bibliográfico:** documentos históricos (manuscritos, incunables, libros de coro, pergaminos, negativos).
- **Patrimonio inmaterial:** tradiciones vivas (música litúrgica, toques de campana, procesiones).
- **Uso:** balance entre uso religioso, cultural y turístico.
- **Gestión:** órganos responsables, recursos, transparencia y control de calidad.

2. Evaluación de riesgos: analiza las amenazas que afectan al patrimonio, incluyendo los factores de deterioro (estructurales, ambientales, antrópicos) para el patrimonio material, así como los riesgos para el patrimonio inmaterial, como la pérdida de tradiciones.

3. Diagnóstico y criterios de intervención: establece pautas técnicas para intervenir en cada tipología patrimonial (inmueble, mueble, arqueológico, documental, inmaterial), priorizando el uso de métodos científicos y garantizando una mínima intrusión en los bienes.

II. PROPUESTA

Plantea acciones concretas para la protección, conservación y difusión:

1. Protección y Conservación preventiva: incluye planes de emergencia (incendios, pandemias), mantenimiento rutinario, formación del personal y difusión de resultados. Destaca el Plan de Contingencias frente a pandemias, innovador y adaptado a los contextos actuales.

2. Conservación y restauración: abarca intervenciones específicas según la tipología patrimonial.

3. Documentación e investigación: contempla el uso de tecnologías (GIS, planimetría 3D) y creación de centros de información.

4. Accesibilidad y difusión: abarca estrategias para democratizar el patrimonio, incluyendo accesibilidad física y digital (web, redes sociales), difusión a través de musealización, actividades culturales y colaboración con medios. Innovación: uso de YouTube, reportajes fotográficos y diseño de contenidos digitales.

5. Uso y gestión: trata del equilibrio entre los distintos usos (religioso, cultural, turístico) y creación de órganos asesores (Consejo de Fábrica). Se destaca la alineación con estándares internacionales (UNESCO, Agenda 2030).

III. PROGRAMACIÓN

Programación económica: corresponde a un presupuesto detallado con previsión de gastos (restauraciones, mantenimiento) e ingresos (turismo, donaciones). Enfoque: viabilidad financiera y sostenibilidad a largo plazo.

Así, se identifica que el Plan Director de la Mezquita-Catedral de Córdoba (2020) presenta una estructura coherente y bien organizada, que refleja un enfoque integral y multidisciplinario en la gestión del patrimonio. Sus tres grandes bloques contienen apartados específicos que cubren todos los aspectos relevantes para la conservación, gestión y difusión del bien.

El Plan Director de la Catedral de Huesca (2021)

En 2021 el IPCE publica el *Pliego de prescripciones técnicas que han de regir para la elaboración del Plan Director de la Catedral de Huesca*. Este documento contiene una estructura desarrollada y actualizada para la elaboración de un Plan Director de Catedrales. Se trata de una estructura exhaustiva que permite el análisis integral del monumento en sus dimensiones material, funcional y cultural. Su organización está orientada a la evaluación, conservación y gestión del patrimonio, estructurándose en los siguientes bloques:

- **Bloque General:** contiene información sobre el contexto legal y patrimonial del bien, incluyendo su grado de protección, descripción general (inmueble, mueble e inmaterial), memoria histórica y cronológica, y un análisis crítico de intervenciones previas. También abarca un estudio jurídico sobre la propiedad y otros aspectos legales.
- **Bloque Patrimonio Inmueble:** describe la evolución arquitectónica de la Catedral, recopila documentación histórica y bibliográfica, y analiza su contexto urbano y estado de conservación. Se elabora un diagnóstico de la situación del patrimonio inmueble.
- **Bloque Patrimonio Mueble:** incluye un inventario detallado de los bienes muebles asociados al monumento, como retablos, esculturas, documentos y mobiliario litúrgico. Se contextualizan sus usos y se analiza su estado de conservación.
- **Bloque Patrimonio Inmaterial:** se centra en las prácticas, tradiciones y elementos intangibles vinculados a la Catedral. Se realiza una catalogación documental y se plantean medidas para su salvaguardia.

- **Análisis y Evaluación de Riesgos:** identifica los riesgos que afectan al bien, evalúa su impacto y propone medidas de mitigación.
- **Plan de Conservación Preventiva:** define estrategias para el mantenimiento del monumento, incluyendo planes de emergencia y protocolos de seguimiento.
- **Plan de Conservación y Restauración:** plantea intervenciones en el patrimonio inmueble, mueble e inmaterial, con estudios previos y estimaciones económicas.
- **Plan de Documentación e Investigación:** propone estrategias para la investigación y preservación de archivos y fondos documentales.
- **Plan de Actuaciones Formativas, Accesibilidad y Difusión:** busca garantizar el acceso al conocimiento del patrimonio y mejorar su accesibilidad física e informativa.
- **Plan de Gestión:** establece mecanismos administrativos y organizativos para la implementación de las estrategias de conservación.
- **Cronograma de Aplicación de los Planes Propuestos:** define la temporalización de las acciones contempladas en el Plan Director.
- **Documentación Planimétrica:** contiene planos del estado actual del monumento y de las propuestas de intervención.
- **Documentación Fotográfica:** incluye reportajes generales, detalles de patologías y ortofotos de bienes muebles.
- **Documentación Sonora:** registra sonidos ambientales, litúrgicos y vinculados a la tradición inmaterial.
- **Otra Documentación:** recopila información complementaria relevante para la gestión del bien patrimonial.

Esta estructura permite una visión integral del monumento, abordando aspectos técnicos, históricos, documentales y de gestión.

3.4.3. Comparación sobre la estructura de los Planes Directores de Catedrales

Al analizar los Planes Directores de Catedrales, se observa una variedad de metodologías, prioridades y enfoques, que, a pesar de sus diferencias, presentan elementos comunes. Estos documentos no solo son informes técnicos, sino que también cumplen una función importante en la conservación del patrimonio, facilitando la conexión entre el pasado y el futuro. Al comparar planes de distintas épocas, se evidencian algunas diferencias clave. Los planes más recientes, como el de Huesca (2021), amplían su alcance al incorporar el patrimonio inmaterial —como las tradiciones orales— y documentación multimedia, que incluye ortofotos digitales y grabaciones de ambientes sonoros. En comparación, el plan de Valencia (2001) pone énfasis en la integración de la Catedral en su entorno urbano, regulando los impactos visuales y los flujos turísticos, mientras que el plan de Santiago

(2010) se enfoca en lo estructural, con medidas para reforzar los cimientos debido al paso del tiempo.

Asimismo, la gestión participativa también ha cambiado. Los planes de Huesca y Valencia incorporan estrategias de difusión, como aplicaciones interactivas y rutas temáticas, y promueven la accesibilidad universal. En cambio, el plan de Santiago se centra en la seguridad física. De manera innovadora, el plan de Huesca incluye formación para guías locales y talleres ciudadanos, buscando involucrar a la comunidad en la conservación del patrimonio.

En cuanto al ámbito legal, los planes más recientes muestran un mayor nivel de detalle y transparencia. El de Huesca, por ejemplo, especifica la propiedad, las responsabilidades administrativas y los marcos legales aplicables, reflejando un enfoque más claro en la rendición de cuentas.

Algunos planes también destacan por incluir aspectos novedosos, como el plan de Huesca, que introduce la documentación sonora, registrando el eco en las naves y los cantos litúrgicos, reconociendo el valor del patrimonio sensorial. Además, este plan cataloga tradiciones inmateriales, como rituales que han quedado en el olvido, mientras que el plan de Santiago se centra más en el patrimonio tangible. Por su parte, los planes de Valencia y Huesca vinculan el turismo con la cultura, buscando crear experiencias que van más allá de la simple visita, mientras que el de Santiago refuerza su enfoque en la preservación física del monumento.

3.4.4. Optimización de la estructura de un Plan Director de Catedrales

A continuación, se enumera una estructura optimizada para la elaboración de un Plan Director Catedrales, basada en el Plan Nacional de Catedrales y en las estructuras de aquí analizadas:

PLAN DIRECTOR DE CATEDRAL

1. INTRODUCCIÓN

- Objetivos del Plan Director.
- Justificación y alcance.
- Equipo redactor y metodología.
- Horizonte temporal y económico.

2. CONTEXTO HISTÓRICO Y JURÍDICO

- Memoria histórica y evolución del edificio.
- Grado de protección y normativa aplicable.
- Situación urbanística y régimen de propiedad.

3. ANÁLISIS DEL PATRIMONIO

3.1. Patrimonio Inmueble

- Descripción arquitectónica y fases constructivas.
- Levantamiento planimétrico y estudios gráficos.
- Estado de conservación y diagnóstico estructural.

- Análisis de patologías y daños.
- 3.2. Patrimonio Mueble**
- Inventario y catalogación de bienes muebles.
 - Estado de conservación y diagnóstico.
 - Intervenciones previas y criterios de restauración.
- 3.3. Patrimonio Inmaterial**
- Tradiciones y usos vinculados a la Catedral.
 - Sonidos sacros y tradiciones: música litúrgica, toques de campana y procesiones.
 - Documentación sonora y audiovisual.
- 4. ANÁLISIS DE RIESGOS Y CONSERVACIÓN**
- Identificación de riesgos estructurales y ambientales.
 - Evaluación de impacto de agentes externos (turismo, clima, contaminación).
 - Estrategias de conservación preventiva.
- 5. PLANES DE ACTUACIÓN**
- 5.1. Plan de Mantenimiento**
- Acciones periódicas de conservación.
 - Programación y recursos necesarios.
- 5.2. Plan de Conservación y Restauración**
- Intervenciones en elementos arquitectónicos, muebles e inmateriales.
 - Priorización y valoración económica.
- 5.3. Plan de Documentación e Investigación**
- Estrategias para el registro y digitalización del patrimonio.
 - Colaboraciones con instituciones académicas.
- 5.4. Plan de Gestión y Usos**
- Organización de actividades religiosas, culturales y turísticas.
 - Coordinación entre administraciones y entidades gestoras.
- 5.5. Plan de Accesibilidad y Difusión**
- Estrategias para mejorar la accesibilidad física y digital.
 - Programas de educación patrimonial y divulgación.
- 6. PROGRAMACIÓN Y SEGUIMIENTO**
- Cronograma de implementación del Plan.
 - Indicadores de evaluación y control de calidad.
 - Estrategias de financiación y sostenibilidad.
- 7. DOCUMENTACIÓN ANEXA**
- Planimetría detallada del estado actual y propuestas de intervención.
 - Reportaje fotográfico y audiovisual.
 - Fichas de inventario y documentación complementaria.

3.4.5. Conclusiones sobre los Planes Directores

Los Planes Directores son herramientas clave para la gestión del patrimonio cultural, destacándose por las siguientes características:

- **Modelo flexible y coherente:** cada Plan Director se adapta a las necesidades específicas del patrimonio, manteniendo una estructura común que abarca

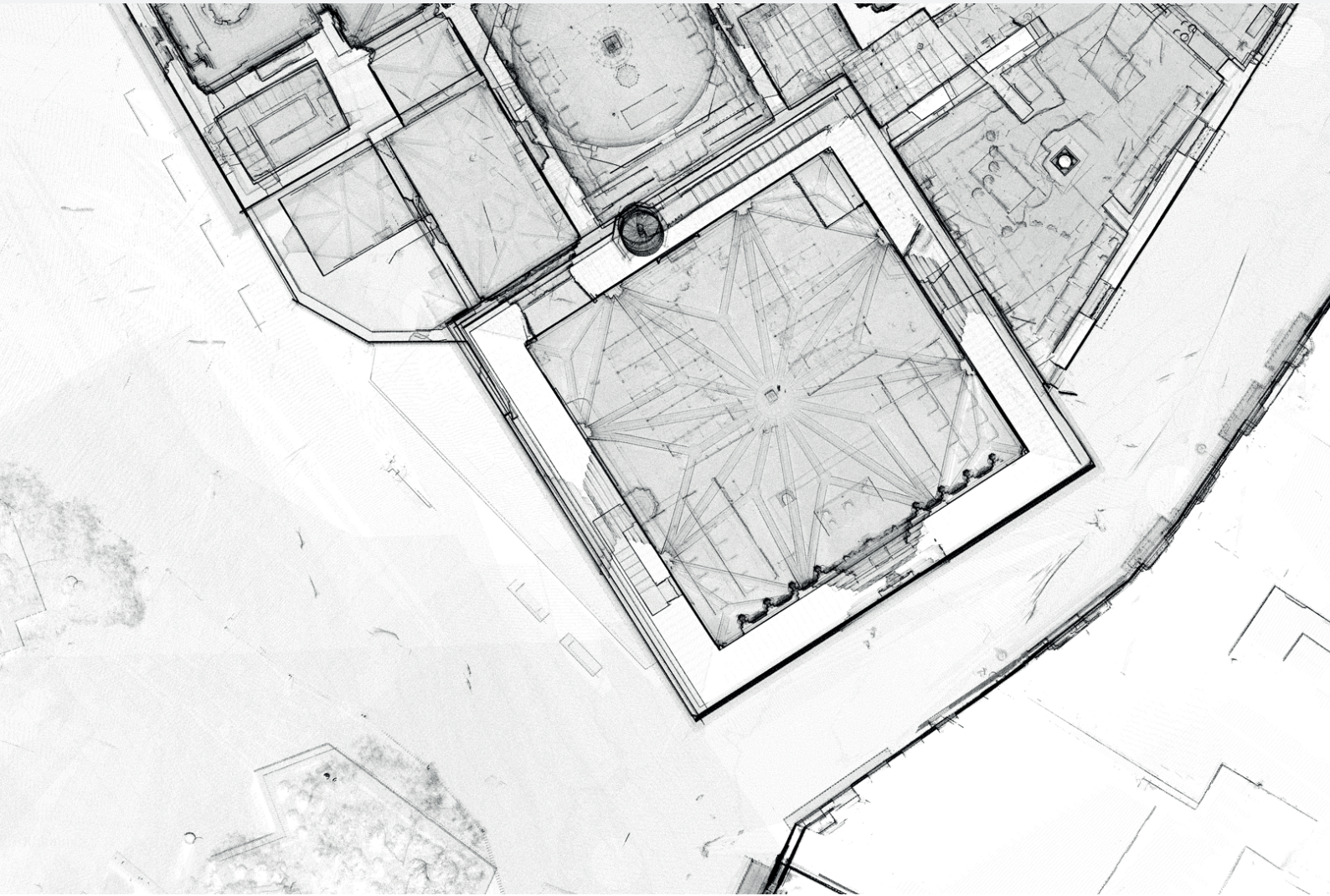
diagnóstico, conservación y gestión, lo que garantiza su efectividad en contextos diversos.

- **Enfoque integral:** los planes recientes incorporan no solo los aspectos físicos del patrimonio, sino también dimensiones inmateriales, sociales y digitales. Este enfoque permite una gestión más completa y basada en una visión global del patrimonio.
- **Enfoque en sostenibilidad:** la conservación preventiva es una estrategia central, que busca minimizar intervenciones invasivas y optimizar recursos, asegurando la preservación del patrimonio a largo plazo.

Referencias del Capítulo 3

- Barceló de Torres, E. (2019). El plan director para la recuperación del patrimonio cultural de Lorca. En *Congreso Internacional "Patrimonio Cultural y Catástrofes, Lorca como referencia"* (pp. 215-224). Murcia. ISBN 978-84-8181-740-9.
- Benito, F., Fernández-Posse, D., & Navascués, P. (2002). El Plan Nacional de Catedrales. *Bienes culturales: Revista del Instituto del Patrimonio Histórico Español*, 1.
- Consorcio de Santiago. (2014). *A Catedral de Santiago, corazón de Compostela. Plan Director*. Agencia Gráfica Gallega S.L. ISBN: 978-84-939061-1-5.
- García, J. M. B. (1999). La legislación española sobre patrimonio histórico, origen y antecedentes. La ley del patrimonio histórico andaluz. V *Jornadas sobre Historia de Marchena. El Patrimonio y su conservación*.
- Hoz Martínez, J. de D. (2006). Aspectos a considerar en la redacción del Plan Director de un monumento. Dos décadas de Planes Directores en España. *XVII Jornadas de Patrimonio Histórico. Intervenciones en el Patrimonio Arquitectónico, Arqueológico y Etnográfico de la Región de Murcia*.
- Junta de Andalucía, Consejería de Cultura. (2012). *III Plan General de Bienes Culturales: Documento para el debate* [Monografías; Planificación]. Sevilla.
- Latorre, P. (2012). El monumento como un todo: El plan director de restauración. *Informes de la Construcción*, 64(Extra), 45-56.
- Lavila Arquitectos. (s. f.). *Planes directores de catedrales, castillos y monasterios*. Recuperado el 7 de marzo de 2025, de <http://www.arquitectoslavila.com/que-hacemos/planes-directores-de-catedrales-castillos-y-monasterios/>
- Maldonado Ramos, L. (2005). El plan director como articulador de los estudios previos en el campo de la restauración arquitectónica. En *Los estudios preliminares en la restauración del patrimonio arquitectónico*. Mairera.
- Ministerio de Educación, Cultura y Deporte. (2015). *Plan Nacional de Catedrales*. Secretaría General Técnica, Subdirección General de Documentación y Publicaciones.
- Ministerio de Cultura y Deporte, Instituto del Patrimonio Cultural de España. (2021). *Pliego de prescripciones técnicas que han de regir para la elaboración del Plan Director de la Catedral de Huesca*. Madrid, España.
- Segura Segura, S. (2015). *El Plan Director como instrumento de gestión para la recuperación y conservación del patrimonio: el caso del Plan Director de San Juan del Hospital de Valencia*. <http://hdl.handle.net/10251/60163>.
- Vegas, F., Mileto, C., & Cristini, V. (2010). Planificar un plan: Etapas y desarrollo del plan director del castillo de Monzón-Huesca. *ARCHÉ. Publicación del Instituto Universitario de Restauración del Patrimonio de la UPV*, 4-5.
- Vera Botí, A. (1996). Plan Director de la Catedral de Murcia. De la teoría metodológica. *Loggia, Arquitectura & Restauración*, 4, 48-55. <https://doi.org/10.4995/loggia.1996.5484>

Capítulo 4. Herramientas digitales para la gestión del patrimonio



Capítulo 4: Herramientas digitales para la gestión del patrimonio

Presentación

En las últimas décadas, la gestión del patrimonio cultural ha experimentado una profunda transformación gracias a la incorporación de herramientas digitales. La digitalización de la información, el modelado tridimensional y los sistemas de análisis geoespacial han revolucionado la manera en que se documentan, estudian y conservan los bienes patrimoniales. En la actualidad, estas tecnologías no solo están optimizando los procesos de registro y conservación, sino que también facilitan el acceso a la información y fomentan nuevas estrategias de investigación y divulgación.

Este capítulo explora las principales herramientas digitales utilizadas en la gestión del patrimonio arquitectónico. En primer lugar, se analizan las bases de datos digitales como instrumentos fundamentales para la estructuración y acceso a la información patrimonial. A continuación, se presentan las tecnologías más relevantes aplicadas a los bienes inmuebles, desde los sistemas *Computer-Aided Design* (CAD) y *Building Information Modeling* (BIM) hasta los *Geographic Information Systems* (GIS) y la captura de datos mediante nubes de puntos. Finalmente, se aborda el papel de los visores digitales en la difusión y gestión del patrimonio, destacando su potencial para la accesibilidad y la conservación preventiva.

La integración de estas herramientas en los procesos de gestión patrimonial no solo responde a la necesidad de optimizar recursos y mejorar la precisión de los registros, sino que también abre nuevas perspectivas en el análisis y valorización del patrimonio. La combinación de bases de datos estructuradas, modelado digital y análisis geoespacial permite abordar los desafíos contemporáneos en la conservación de bienes culturales, impulsando estrategias más eficientes, sostenibles e innovadoras.

4.1. Las bases de datos digitales

Las bases de datos digitales han emergido como herramientas esenciales para la organización, almacenamiento y gestión eficiente de grandes volúmenes de información. En los campos de la arquitectura y la gestión del patrimonio, su aplicación permite la sistematización de datos sobre edificios, materiales, entorno, bienes inmuebles y análisis espaciales, facilitando procesos complejos como la conservación del patrimonio histórico.

De forma general, una base de datos digital puede entenderse como un conjunto organizado y estructurado de información interrelacionada, almacenada en sistemas computacionales. Estos sistemas permiten organizar los datos en tablas y establecer relaciones entre diferentes elementos, lo que facilita el acceso y la manipulación de la información de manera rápida y precisa.

En primer lugar, las bases de datos digitales optimizan el acceso y la manipulación de grandes volúmenes de datos, lo que facilita enormemente los procesos de investigación y gestión. Esta eficiencia es crucial cuando se manejan grandes cantidades de información sobre edificios históricos, materiales de construcción o planes urbanos. Además, al reducir la dependencia de los métodos manuales de gestión, las bases de datos digitales aumentan la fiabilidad de los proyectos, minimizando los errores y garantizando la precisión en el manejo de datos críticos para el éxito de los proyectos arquitectónicos y de conservación del patrimonio.

Por último, la capacidad de las bases de datos digitales para permitir el trabajo de equipos multidisciplinarios, en el cual profesionales como arquitectos, urbanistas, arqueólogos y conservadores del patrimonio compartan información de manera eficiente es otro factor clave. En proyectos complejos de restauración y diseño urbano, donde intervienen profesionales de diferentes disciplinas, esta colaboración es esencial para asegurar que todos los involucrados tengan acceso a la misma información actualizada y puedan tomar decisiones informadas.

El concepto de las bases de datos ha experimentado una evolución significativa a lo largo de las décadas, transformándose desde sus primeras formas en los años 60 hasta convertirse en sistemas complejos y distribuidos, que son fundamentales en la gestión de grandes volúmenes de información en la actualidad. En la década de 1960, los primeros sistemas jerárquicos como el IMS¹ de IBM marcaron el inicio de la era de las bases de datos. Estos sistemas primitivos permitieron almacenar información de manera estructurada, pero con limitaciones en cuanto a flexibilidad y eficiencia en su manejo.

Durante la década de 1970, Edgar F. Codd revolucionó el campo al introducir el modelo relacional, un enfoque que utilizaba tablas bidimensionales para organizar los datos. Este modelo no solo mejoró la flexibilidad, sino también la eficiencia en la manipulación de la información, permitiendo realizar operaciones más complejas de manera sencilla.

¹ IMS: *Information Management System*.

A lo largo de la década de 1980, los sistemas gestores de bases de datos relacionales (SGBD²), como Oracle y SQL Server, comenzaron a ganar popularidad, consolidándose como el estándar para la gestión de bases de datos en una amplia variedad de sectores. Estos sistemas ofrecían una plataforma robusta y escalable para manejar datos estructurados.

En los años 90, la evolución continuó con la aparición de bases de datos orientadas a objetos y NoSQL, que respondían a la necesidad de gestionar datos no estructurados o semiestructurados, como los que se encuentran en archivos de texto, imágenes o documentos. Estos enfoques permitieron una mayor flexibilidad en el almacenamiento y recuperación de información que no se ajustaba fácilmente a las estructuras tabulares tradicionales.

Hoy en día, las tecnologías de bases de datos en la nube y *Big Data* han cambiado por completo el panorama, permitiendo gestionar grandes volúmenes de datos con alta escalabilidad y accesibilidad global. La capacidad de procesar y almacenar información masiva de manera eficiente ha transformado la forma en que se manejan y se analizan los datos en múltiples disciplinas, incluido el campo de la arquitectura y la conservación del patrimonio (Zhu et al., 2019).

Para entender el funcionamiento de las bases de datos, es esencial familiarizarse con algunos conceptos clave, entre los cuales se destaca el uso de SQL (*Structured Query Language*), así como el manejo de tablas y relaciones dentro de bases de datos relacionales. SQL es un lenguaje de programación diseñado específicamente para gestionar bases de datos relacionales. Su capacidad para ejecutar operaciones como insertar, consultar, actualizar y eliminar datos lo convierte en una herramienta indispensable en diversos campos, incluido el de la arquitectura. En particular, SQL se utiliza para realizar consultas sobre inventarios de edificios o materiales, permitiendo acceder a la información de manera eficiente y precisa. Además, su versatilidad permite llevar a cabo análisis complejos, como la identificación de patrones espaciales a través de consultas avanzadas, que facilitan la exploración de relaciones complejas entre los distintos conjuntos de datos relacionados con el patrimonio arquitectónico.

Por otro lado, las tablas y las relaciones son componentes fundamentales de las bases de datos relacionales. Estas bases organizan los datos en tablas, donde las filas representan registros individuales y las columnas describen atributos específicos (Fig. 4.1). La capacidad de establecer relaciones entre diferentes tablas es crucial para la organización eficiente de la información. Por ejemplo, en una base de datos relacionada con el patrimonio arquitectónico, se puede tener una tabla llamada “Edificios” que se vincula con otra tabla, “Muros”, y esta a su vez con una tabla llamada “Materiales”, mediante claves primarias y externas (Fig. 4.2). Este tipo de relaciones permite una gestión más estructurada y coherente de los datos, facilitando el acceso y análisis de la información relevante para proyectos de conservación y restauración.

² SGBD (del inglés *Database Management System* o DBMS) es un software para gestionar bases de datos.

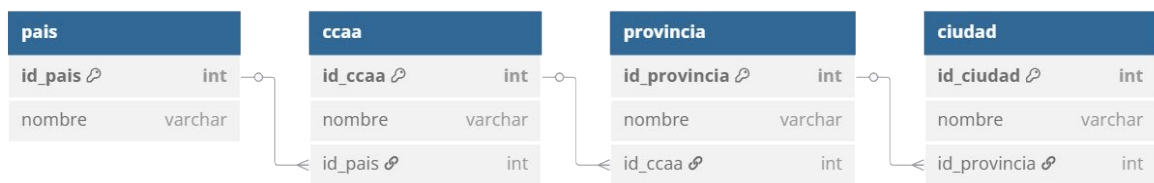


Figura 4.1: Esquema de base de datos relacional de país, CCAA, provincia y ciudad (elaboración propia).



Figura 4.2: Esquema de base de datos relacional de edificios, muros y materiales (elaboración propia).

Las bases de datos pueden materializarse de diferentes formas como a partir de los gestores de bases de datos como Microsoft Access, SQL Server, MySQL y PostgreSQL, entre otros, siendo la clave su capacidad para manejar grandes volúmenes de datos, su escalabilidad y la complejidad de las operaciones que pueden realizar. Cada uno de estos sistemas tiene ventajas y limitaciones que los hacen adecuados para diferentes tipos de proyectos, especialmente en el contexto de la arquitectura y la gestión del patrimonio.

Microsoft Excel permite organizar, analizar y visualizar datos en hojas de cálculo, siendo una herramienta ampliamente utilizada debido a su facilidad de uso y su interfaz intuitiva con respecto a los gestores de base de datos. Es ideal para manejar cantidades pequeñas o medianas de datos, donde las relaciones entre los mismos no son demasiado complejas. Sin embargo, Excel tiene limitaciones en términos de escalabilidad, ya que no está diseñado para gestionar grandes volúmenes de datos ni para establecer relaciones entre diferentes conjuntos de información de manera eficiente. Además, no ofrece un control avanzado sobre la integridad de los datos ni herramientas robustas de consulta, lo que puede llevar a errores si no se usa correctamente.

Por otro lado, Access ofrece la capacidad de crear tablas interrelacionadas y realizar consultas complejas, lo que lo convierte en una opción adecuada para proyectos de mayor envergadura que requieren una gestión más estructurada de los datos. Sin embargo, su escalabilidad es limitada en comparación con los SGBD SQL, y su uso suele ser más adecuado para proyectos pequeños o medianos. Access también proporciona una interfaz más amigable que otros sistemas de bases de datos, lo que facilita su adopción por parte de usuarios no técnicos.

Los sistemas de bases de datos relacionales como MySQL, PostgreSQL o SQL Server son herramientas extremadamente poderosas y escalables. Estos sistemas están diseñados para manejar grandes volúmenes de datos y realizar consultas avanzadas con alta eficiencia. La principal ventaja de los sistemas SQL es su capacidad para gestionar

relaciones complejas entre tablas, lo que permite integrar y consultar grandes cantidades de información de manera efectiva. Además, ofrecen control total sobre la seguridad, la integridad de los datos y las operaciones de mantenimiento. Si bien requieren conocimientos técnicos para su implementación y administración, los sistemas SQL son ideales para proyectos a gran escala, como la gestión de inventarios de patrimonio arquitectónico o el análisis de grandes conjuntos de datos espaciales.

Así, en síntesis, se verifica que Excel resulta ideal para proyectos pequeños o para realizar análisis rápidos y visualización de datos, Access es una opción intermedia para gestionar datos con relaciones sencillas, y los sistemas SQL son la opción más adecuada para proyectos grandes y complejos que requieren un manejo robusto de datos e integridad estructural. La elección de la herramienta depende de la escala del proyecto, la complejidad de los datos y las necesidades específicas de gestión y análisis.

4.2. Aplicaciones de las bases de datos en los bienes inmuebles del patrimonio cultural

Una de las primeras aplicaciones de las bases de datos en este ámbito fue la creación de inventarios digitales a finales de los años 90, utilizando herramientas como Microsoft Excel y Microsoft Access. Estas bases de datos permitieron registrar de manera sistematizada características clave de edificios históricos: desde detalles estructurales y materiales constructivos hasta la ubicación geográfica y el historial de intervenciones. Este enfoque no solo facilitó la gestión de la información, sino que también optimizó el análisis técnico y la toma de decisiones en proyectos de conservación.

En la década de 2000, con el avance de la web semántica y las tecnologías geoespaciales, se incorporaron funcionalidades más sofisticadas. Surgieron sistemas que integraban múltiples inventarios de bienes inmuebles en plataformas unificadas, junto con visores GIS. Estos últimos permitían vincular datos tabulares (como fechas de construcción o tipologías arquitectónicas) a elementos georreferenciados (puntos, polígonos o áreas), ofreciendo una visión espacial del patrimonio (Tamborrino & Rinaudo, 2015).

En la actualidad, la evolución ha sido disruptiva gracias a tecnologías como el BIM y las nubes de puntos 3D. El BIM utiliza bases de datos dinámicas para integrar modelos tridimensionales con información técnica detallada: propiedades de materiales, costos estimados, procesos constructivos y hasta simulaciones estructurales. En el contexto de la gestión del patrimonio histórico, las bases de datos digitales juegan un papel crucial al permitir una serie de aplicaciones avanzadas que optimizan tanto la preservación como la restauración de edificios históricos. Una de las principales ventajas de estas herramientas es la capacidad de simular el comportamiento de los edificios ante fenómenos naturales, como terremotos o cambios de humedad. Esta simulación permite predecir cómo afectarán estos factores a la estructura y, en consecuencia, facilita la toma de decisiones más informadas para la conservación.

Además, las bases de datos digitales permiten planificar las restauraciones de manera colaborativa, integrando datos tanto históricos como técnicos. Esto significa que arquitectos, ingenieros y restauradores pueden trabajar de forma conjunta, compartiendo información sobre la edificación, sus materiales y sus características, lo que mejora la precisión y la efectividad de las intervenciones. La integración de estos datos en plataformas digitales facilita la visualización de los proyectos y ayuda a identificar posibles problemas antes de que ocurran.

Otro aspecto fundamental es la capacidad de las bases de datos para reducir los riesgos durante las intervenciones. Gracias a la precisión de los modelos virtuales, los restauradores pueden prever con antelación las posibles complicaciones y establecer estrategias para mitigarlas. Este enfoque no solo protege la integridad del patrimonio, sino que también optimiza los recursos y el tiempo de trabajo. Así, estas aplicaciones tecnológicas no solo mejoran la conservación, sino que también incrementan la seguridad y la efectividad de las intervenciones, facilitando un manejo más eficiente y sostenible del patrimonio arquitectónico.

Por su parte, las nubes de puntos —generadas mediante escaneos láser o fotogrametría— han revolucionado la creación de bases de datos espaciales. Estas no solo capturan la geometría exacta de un inmueble, sino que también almacenan atributos como texturas, degradación de materiales o alteraciones históricas, permitiendo análisis comparativos a lo largo del tiempo.

4.2.1. Las bases de datos del patrimonio cultural

En la actualidad, la preservación y la gestión del patrimonio arquitectónico han evolucionado significativamente gracias a la incorporación de herramientas digitales avanzadas. La digitalización de la información, la modelización 3D y los sistemas de gestión de datos han permitido un análisis más preciso de los bienes culturales, facilitando su conservación y difusión.

La transformación digital en la gestión del patrimonio cultural ha revolucionado la forma en que las instituciones documentan, preservan y comparten sus colecciones. En este contexto, las bases de datos han emergido como infraestructuras esenciales para la investigación, conservación y divulgación, permitiendo un acceso sin precedentes a los recursos culturales, pero también presentando desafíos complejos en términos de preservación e interoperabilidad.

La digitalización de la información sobre el patrimonio cultural ha experimentado una transformación significativa desde sus inicios. Los primeros esfuerzos se centraron en sistemas básicos de catalogación digital, que consistían principalmente en registros de metadatos simples e imágenes de baja resolución. Estos sistemas iniciales eran bases de datos aisladas, específicas de cada institución, con capacidades limitadas de interoperabilidad. A medida que avanzaban las tecnologías digitales, las instituciones del

patrimonio cultural reconocieron la necesidad de enfoques más sofisticados para gestionar sus crecientes colecciones digitales.

El desarrollo de bases de datos para el patrimonio cultural ha sido impulsado por varios factores convergentes, como el crecimiento exponencial del contenido digital, la creciente demanda de acceso público a los recursos culturales y los avances tecnológicos que han facilitado la gestión de datos complejos. En este proceso, se ha producido un cambio significativo: la digitalización ha pasado de ser un mero proceso de documentación a convertirse en un enfoque transformador que genera nuevas formas de patrimonio cultural en el ámbito digital.

Un hito crucial en este recorrido ha sido el desarrollo de ontologías y modelos de datos especializados en la información patrimonial. Entre estos, el CIDOC CRM (*Conceptual Reference Model*), un marco de referencia fundamental. Desarrollado por un comité del Consejo Internacional de Museos (ICOM), CIDOC CRM proporciona un vocabulario estandarizado y un marco para describir e intercambiar información sobre objetos patrimoniales, independientemente del sistema de gestión utilizado (Liu et al. 2023). Este modelo basado en objetos trata cada elemento de la colección como una entidad única con propiedades específicas y relaciones con otros objetos, lo que permite una representación contextual rica de los datos patrimoniales.

El surgimiento de plataformas internacionales de gran escala, como Europeana, ha representado otro avance significativo en este campo. Estas plataformas reúnen colecciones digitalizadas de diversas instituciones en puntos de acceso unificados, ampliando enormemente el alcance y la utilidad de los recursos digitales sobre patrimonio cultural. El desarrollo de estos agregadores ha coincidido con la creciente adopción de los principios de *Linked Open Data*, transformando la estructura y el intercambio de información patrimonial y permitiendo conexiones dinámicas entre distintos conjuntos de datos e instituciones.

En relación con la infraestructura tecnológica que sustenta las bases de datos digitales del patrimonio, también ha evolucionado drásticamente, incorporando herramientas y metodologías diversas que mejoran la documentación, el análisis y la presentación de la información. Los avances actuales incluyen imágenes 3D y de 360°, tecnologías GPS, fotografía con drones y fotogrametría, todas ellas revolucionando la forma en que se captura y representa digitalmente el patrimonio cultural. Estas tecnologías permiten documentar artefactos y sitios con altos niveles de detalle y precisión.

Tecnologías como el escaneo láser 3D ha emergido como una herramienta especialmente valiosa para la documentación patrimonial, permitiendo la creación de réplicas digitales precisas de artefactos y estructuras. Esta tecnología apoya la conservación al proporcionar documentación detallada que informa sobre trabajos de restauración, al tiempo que mejora las capacidades de investigación mediante análisis no destructivos. Los modelos digitales generados a partir de estos escaneos sirven como referencia para monitorear cambios en el estado de conservación a lo largo del tiempo (Ababneh, 2024).

Las tecnologías de Realidad Virtual (VR) y Realidad Aumentada (AR) han transformado la interacción del público con el patrimonio cultural, ofreciendo experiencias inmersivas que contextualizan el significado histórico y cultural de los sitios patrimoniales. Estas herramientas permiten a los visitantes experimentar entornos históricos reconstruidos o examinar artefactos en detalle sin importar su ubicación física, democratizando el acceso a recursos patrimoniales que, de otro modo, podrían ser inaccesibles por razones geográficas, físicas o de conservación (Ababneh, 2024).

Los GIS se han convertido en herramientas esenciales para el análisis espacial y el mapeo de sitios patrimoniales, integrando datos geográficos con información histórica y cultural. Además, las imágenes de alta resolución y las técnicas como *Reflectance Transformation Imaging* (RTI) permiten capturar detalles de la superficie de artefactos que pueden ser invisibles al ojo humano, revelando inscripciones, patrones de desgaste y técnicas de manufactura que informan la investigación académica y las decisiones de conservación.

La Inteligencia Artificial (IA) y el Aprendizaje Automático (ML), por su parte, representan la frontera de los avances tecnológicos en este ámbito. Estas tecnologías se aplican cada vez más en la detección de patrones, la clasificación automática y la modelización predictiva de datos patrimoniales. Investigaciones recientes (Croce et al., 2021; Croce, 2023) destacan el potencial del ML para la exploración arqueológica, permitiendo búsquedas eficientes de sitios en ubicaciones diversas y facilitando el análisis de grandes volúmenes de datos que serían imposibles de procesar manualmente.

Los métodos de preservación digital, tal como se definen en la Carta de la UNESCO (2003) y la Declaración de Cooperación para Avanzar en la Digitalización del Patrimonio Cultural (2019), justifican el uso de estas tecnologías para registrar, conservar y facilitar el acceso al significado cultural e histórico de los sitios y objetos patrimoniales. En general, estos enfoques se destacan por su naturaleza no destructiva, su conveniencia y su autenticidad, además de permitir el intercambio de datos en tiempo real entre profesionales del patrimonio y el público.

4.3. Los modelos de datos y las ontologías

La organización de la información sobre el patrimonio cultural requiere modelos de datos especializados que puedan representar la complejidad y riqueza de los objetos culturales y sus contextos. A lo largo del tiempo, han surgido diferentes modelos que se han convertido en estándares en el campo, cada uno con enfoques y aplicaciones distintas para la documentación de los bienes patrimoniales.

El CIDOC CRM es uno de los modelos de datos más influyentes en el ámbito del patrimonio cultural. Basado en un enfoque orientado a objetos, proporciona un vocabulario estandarizado y un marco semántico para describir información sobre el patrimonio cultural. Su fortaleza radica en su capacidad para representar relaciones complejas entre objetos, personas, lugares, eventos y conceptos a lo largo del tiempo. Su flexibilidad le permite adaptarse a diversos tipos de datos patrimoniales, manteniendo una

estructura coherente que facilita la interoperabilidad entre distintos sistemas e instituciones.

El *Europeana Data Model* (EDM) representa otro marco significativo, diseñado específicamente para la agregación de metadatos de diversas instituciones de patrimonio cultural en Europa. A diferencia de otros modelos, EDM gestiona los datos a través de un sistema de base de datos centralizada, lo que garantiza la preservación y accesibilidad del contenido digitalizado a lo largo del tiempo. Este modelo es particularmente notable por su promoción de los principios de *Linked Open Data* (LOD), que permiten la vinculación y reutilización de datos patrimoniales en la web, mejorando la accesibilidad de la información y fomentando el desarrollo de nuevas aplicaciones.

El modelo Sampo, a su vez, es un enfoque más reciente para la modelización de datos patrimoniales, basado en tecnologías de la web semántica y grafos de conocimiento. Este modelo pone énfasis en las interconexiones entre distintas entidades del patrimonio cultural y permite realizar consultas avanzadas en conjuntos de datos heterogéneos. Su implementación ha sido particularmente influyente en los países nórdicos, demostrando el potencial de estructuras de datos semánticamente ricas en aplicaciones de patrimonio cultural (Liu, 2023).

Estos modelos de datos todavía siguen evolucionando en respuesta a nuevas necesidades y tecnologías. Los desarrollos recientes incluyen adaptaciones para el patrimonio inmaterial, integración con GIS y un mayor soporte para contenido multimedia. La elección del modelo de datos más adecuado depende de los requisitos específicos de la colección patrimonial, el contexto institucional y las aplicaciones previstas para los datos.

4.4. Estándares de interoperabilidad y tecnologías semánticas

La interoperabilidad, entendida como la capacidad de diferentes sistemas para funcionar conjuntamente sin problemas, constituye un desafío y una oportunidad clave en las bases de datos de patrimonio digital. A medida que las instituciones patrimoniales desarrollan sus recursos digitales de manera independiente, garantizar que estos diversos sistemas puedan comunicarse eficazmente es fundamental para la creación de una red global de conocimiento coherente.

Las tecnologías semánticas han surgido como herramientas esenciales para mejorar la integración e interoperabilidad de los datos patrimoniales. Estas tecnologías permiten establecer conexiones significativas entre diferentes fuentes de datos mediante estándares que expresan relaciones y significados de manera uniforme. La literatura reciente destaca la importancia de estos enfoques para mejorar la utilidad y accesibilidad de la información sobre el patrimonio cultural.

Los principios de LOD han adquirido especial relevancia en este contexto. Mediante la publicación de datos estructurados con estándares abiertos como RDF (*Resource*

Description Framework) y la creación de enlaces entre conjuntos de datos, las instituciones patrimoniales pueden construir un ecosistema de información más interconectado y fácilmente accesible. Europeana ha sido una de las principales impulsoras del uso de LOD en el sector del patrimonio cultural, facilitando la vinculación y reutilización de datos en la web (Isaac & Haslhofer, 2013).

El *International Image Interoperability Framework* (IIIF) es otro estándar fundamental para la interoperabilidad, centrado específicamente en recursos de imagen. IIIF proporciona métodos estandarizados para describir y distribuir imágenes en la web, permitiendo a investigadores comparar y analizar materiales visuales de diferentes colecciones sin dificultades. No obstante, la implementación de estos servicios de imagen supone un desafío técnico para muchas instituciones (Appleby, 2024).

Los puntos de consulta (*query endpoints*) representan un componente esencial en los sistemas patrimoniales interoperables, ya que permiten el acceso computacional a las bases de datos subyacentes. A través de estas interfaces, los investigadores pueden realizar consultas complejas que no serían viables mediante interfaces web tradicionales. Sin embargo, para su implementación es necesario contar con datos estructurados que sigan estándares generales de consulta y principios de datos enlazados. Cada vez más instituciones patrimoniales reconocen el valor de proporcionar estos puntos de acceso, ya que facilitan metodologías de investigación avanzadas y la integración de datos (Dressen, 2025).

El desarrollo de la base de datos H-SeTIS (*Heritage Semantic Tools Information System*) ilustra los esfuerzos en curso para abordar los desafíos de interoperabilidad. Este recurso tiene como objetivo recopilar y describir sistemáticamente diversas herramientas semánticas aplicadas al ámbito del patrimonio. Un análisis preliminar de los datos en H-SeTIS revela que muchas de las herramientas semánticas diseñadas para el patrimonio no cumplen con los requisitos mínimos de accesibilidad y reutilización, lo que indica un área clave para futuras mejoras. Este hallazgo resalta la necesidad de establecer estándares y mejores prácticas en el desarrollo de herramientas semánticas para aplicaciones patrimoniales (Scarpa & Valente, 2024).

4.5. Aplicaciones de las bases de datos digitales del patrimonio

Las bases de datos digitales del patrimonio están transformando las metodologías de investigación, permitiendo formas de análisis y descubrimiento que antes eran imposibles. A medida que estos recursos se vuelven más sofisticados e interconectados, sus aplicaciones en la investigación continúan expandiéndose, abriendo nuevas posibilidades de estudio.

La posibilidad de consultar colecciones a través de puntos de consulta computacionales permite identificar patrones, conexiones y anomalías que, de otro modo, permanecerían ocultos en vastos conjuntos de datos. Esto se ha visto reflejado en el campo de la arqueología ya que las técnicas de aprendizaje automático se aplican con cada vez más

frecuencia a los datos arqueológicos, facilitando la búsqueda y análisis de sitios en diversas ubicaciones. Los métodos de documentación digital han revolucionado las prácticas de registro en campo, proporcionando un nivel de detalle y precisión sin precedentes en la captura de contextos arqueológicos. En cuanto a la integración de datos geográficos mediante GIS, mejora el análisis espacial y la comprensión de los paisajes culturales, lo que permite interpretaciones más detalladas de los sitios y regiones arqueológicas (Baratin et al., 2015).

El uso de las ontologías posibilita relacionar la información de forma compleja y el cruzamiento entre colecciones de datos, que permite a los investigadores rastrear conexiones entre objetos y prácticas culturales. Además, el desarrollo de herramientas e interfaces especializadas facilita estas metodologías de investigación al permitir una exploración y visualización de datos más sofisticadas. Estas herramientas posibilitan la formulación de consultas complejas que serían imposibles mediante búsquedas tradicionales en catálogos, revelando relaciones y patrones previamente desconocidos dentro de los datos del patrimonio cultural.

De manera general estos recursos digitales proporcionan fuentes primarias válidas para los investigadores, ofreciendo una riqueza de información. Al contextualizar los bienes patrimoniales dentro de redes de relaciones e información, las bases de datos del patrimonio cultural apoyan enfoques de datos densos (*thick data*), situando los objetos culturales en contextos históricos y sociales más amplios.

Las bases de datos digitales del patrimonio se han convertido en herramientas esenciales para los profesionales de la conservación, apoyando los procesos de documentación, monitoreo, planificación e intervención. Los registros digitales detallados que se mantienen en estos sistemas proporcionan referencias críticas para evaluar cambios en el estado de conservación y diseñar estrategias que minimicen los riesgos para los artefactos culturales irremplazables.

En este sentido, para mejorar la planificación de la conservación se beneficia enormemente de la integración de diversos conjuntos de datos dentro de los sistemas digitales de patrimonio. Al combinar evaluaciones de estado, documentación histórica, análisis de materiales y datos de monitoreo ambiental, los conservadores pueden desarrollar estrategias de preservación más completas y efectivas. Las herramientas de simulación digital apoyan aún más este trabajo, permitiendo a los profesionales probar virtualmente intervenciones antes de aplicarlas a materiales patrimoniales insustituibles.

Las capacidades de monitoreo a largo plazo que ofrecen las bases de datos digitales del patrimonio son particularmente valiosas para los enfoques de conservación preventiva. La documentación regular utilizando metodologías consistentes permite detectar a tiempo procesos de deterioro e implementar medidas preventivas para mitigar riesgos. Este cambio hacia la prevención, en lugar de la intervención reactiva, representa un avance significativo en la filosofía de la conservación, facilitado por la documentación digital y las herramientas de gestión de información.

El desarrollo de bases de datos específicas para el patrimonio cultural responde a la necesidad de registrar, sistematizar y difundir el conocimiento sobre los bienes patrimoniales. Estas bases pueden ser de acceso público o restringido, y se estructuran en torno a diversos criterios como tipología arquitectónica, estado de conservación, ubicación geográfica o nivel de protección legal. Ejemplos de bases de datos relevantes incluyen el *Inventario General de Bienes del Patrimonio Histórico Español* y la *Base de Datos de Patrimonio Mundial de la UNESCO*, que permite gestionar información detallada sobre edificios y sitios patrimoniales a nivel global.

4.6. Tecnologías digitales aplicadas a los bienes inmuebles

4.6.1 Los inicios del CAD

La evolución del Diseño Asistido por Computadora (CAD) ha marcado una de las mayores revoluciones tecnológicas en los campos de la arquitectura e ingeniería. Este software permite crear representaciones digitales en dos y tres dimensiones, lo que reduce significativamente los tiempos del tradicional dibujo a mano. Desde sus inicios como sistemas experimentales en los laboratorios de investigación, hasta convertirse en plataformas avanzadas que integran Inteligencia Artificial y facilitan la colaboración en la nube, las tecnologías CAD han transformado radicalmente los procesos de diseño en múltiples industrias. La historia del CAD se remonta a 1955, cuando comenzó en el Lincoln Laboratory del Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT) (Ye et al., 2004).

En 1962, Ivan Sutherland, en el mismo laboratorio del MIT, creó Sketchpad, considerado el precursor del CAD moderno. Se trataba de un sistema revolucionario que introdujo la interacción gráfica con computadoras mediante un lápiz óptico y un teclado, permitiendo seleccionar, posicionar y dibujar en una pantalla. Además, estableció principios fundamentales de las interfaces gráficas de usuario y aplicó conceptos pioneros de programación orientada a objetos en gráficos computacionales (Sutherland, 1963). Para el año 1963, Sketchpad ya se utilizaba en entornos universitarios, resolviendo problemas como la visualización de líneas ocultas en objetos tridimensionales. Esto representó un salto cualitativo en la tecnología de representación, posibilitando la creación y manipulación de modelos tridimensionales con un realismo sin precedentes.

El CAD pasó de la investigación al ámbito comercial en 1965, con la introducción del primer sistema de CAD en el mercado con altos costos. A lo largo de la década del 70, los costos de los sistemas CAD comenzaron a disminuir, lo que favoreció su adopción en otros sectores como la construcción. Además, en los últimos años de esta etapa, Charles M. Eastman introdujo el concepto de *Building Product Model*, precursor del BIM (Eastman et al., 2011).

Los años 80 marcaron la masificación del CAD gracias a la llegada de la computación personal. En 1982 hubo la fundación de Autodesk por John Walker y su equipo, quienes desarrollaron AutoCAD con el objetivo de ofrecer un programa asequible para computadoras personales, revolucionando el mercado al hacer el CAD accesible a

pequeñas empresas y profesionales independientes. En 1992, AutoCAD lanzó su versión para plataformas Sun, expandiendo su compatibilidad en 1995 con AutoCAD 12 para Microsoft Windows, facilitando su uso en un entorno familiar para la mayoría de los usuarios.

4.6.2. La incorporación de BIM

El concepto de BIM, que había comenzado a gestarse en los años 70, tomó forma a finales de los 90 y principios de los 2000. Jerry Laiserin popularizó el término BIM, diferenciándolo del CAD tradicional y destacando su capacidad para integrar información y coordinar disciplinas en un modelo digital unificado (Fig. 4.3).

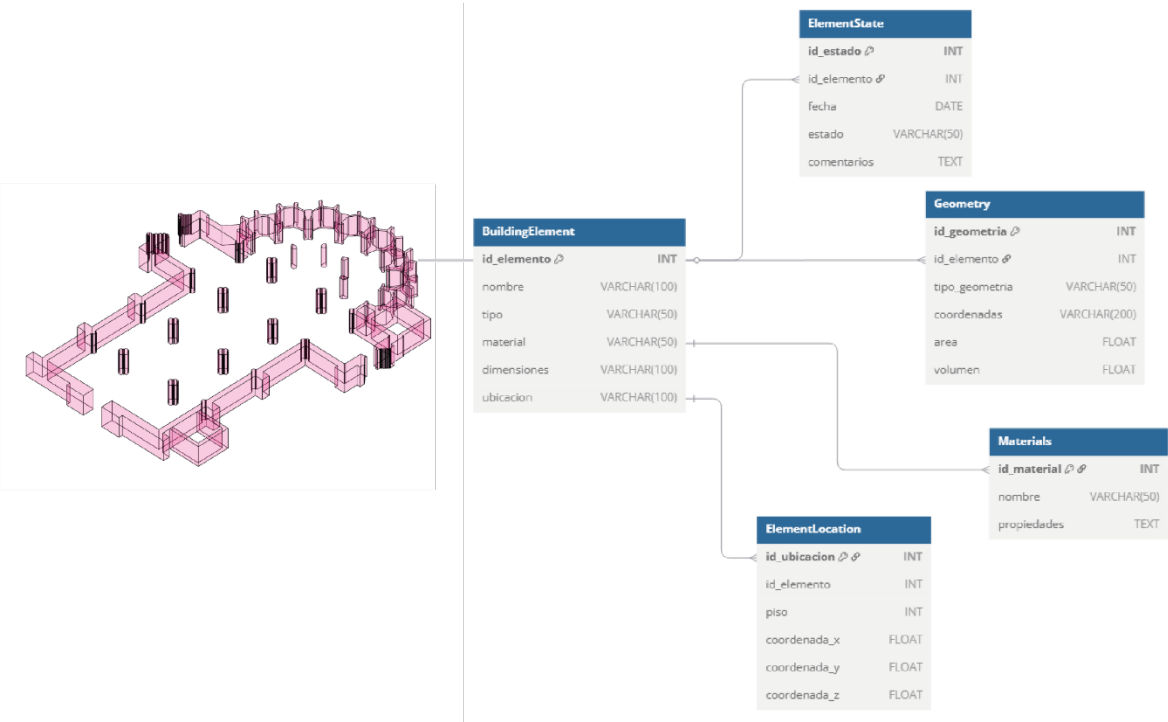


Figura 4.3: Integración de información geométrica con tablas de datos (elaboración propia).

Mientras que el CAD se centraba en la representación geométrica de los diseños, el BIM dio un paso adelante al incorporar información adicional sobre materiales, propiedades y las relaciones entre los distintos elementos constructivos. Este enfoque innovador mejoró notablemente la precisión del diseño, facilitó la colaboración entre equipos multidisciplinarios y permitió una gestión más eficiente de los proyectos a lo largo de todo su ciclo de vida.

Con el tiempo, la conversión de proyectos CAD a BIM se consolidó como un servicio clave en los campos de la arquitectura e ingeniería. Los avances tecnológicos, como el escaneo láser, posibilitaron la digitalización precisa de edificios existentes mediante nubes de puntos, lo que abrió la puerta a la creación de modelos BIM detallados y enriquecidos con información de diversas disciplinas.

En la última década, el CAD ha experimentado una significativa evolución con la integración de tecnologías emergentes como la Inteligencia artificial, el diseño generativo, la realidad aumentada y la colaboración en la nube. La colaboración en tiempo real ha pasado de ser una necesidad a una herramienta indispensable, especialmente en proyectos de gran escala y distribuidos globalmente. Esta transformación ha impulsado la migración del CAD a plataformas en la nube, lo que no solo mejora la accesibilidad, sino que también facilita el uso de recursos computacionales avanzados para llevar a cabo simulaciones y análisis más complejos.

Desde su introducción en los campos de la arquitectura e ingeniería, el CAD ha evolucionado constantemente para abordar los desafíos específicos de la construcción. Un estudio publicado en 1988 en la revista *Informes de la Construcción* ya anticipaba la necesidad de integrar procesos de análisis, evaluación y coordinación interdisciplinaria en los sistemas de diseño asistido por computadora, lo que marcó el inicio de una tendencia hacia un enfoque más integrado y colaborativo (Recuero, 1988).

La transición del CAD al BIM ha sido especialmente relevante en disciplinas como la ingeniería estructural y las instalaciones MEP (Mecánicas, Eléctricas y Plomería), optimizando la planificación, coordinación y ejecución de estos sistemas dentro de los proyectos arquitectónicos. Además, los avances en visualización han revolucionado la forma en que se representan los proyectos, pasando de simples modelos alámbricos a impresionantes renderizados fotorrealistas. Estas herramientas no solo mejoran la comprensión de los diseños por parte de los clientes, sino que también facilitan una toma de decisiones más informada y eficiente.

4.6.3. HBIM

El *Heritage Building Information Modeling* (HBIM) es una metodología específica que adapta el BIM para la conservación de edificios históricos, integrando datos de escaneo láser y fotogrametría. Se ha posicionado como una herramienta esencial en la gestión y análisis de la información asociada al patrimonio arquitectónico. A partir de la metodología BIM tradicional, que se centra en la creación de modelos digitales tridimensionales y en la integración de datos técnicos y constructivos, el HBIM adapta estas técnicas para abordar las particularidades de los edificios históricos. Esta adaptación implica no solo la representación gráfica de la edificación, sino también la incorporación de información detallada sobre su evolución, materiales, patologías y relaciones espaciales, lo que resulta fundamental para la conservación preventiva y la planificación de restauraciones.

La transición de un enfoque meramente gráfico, basado en el CAD, hacia un modelo de información que integra datos actualizables ha marcado un antes y un después en la forma en que se documenta y gestiona el patrimonio. En este sentido, el HBIM permite capturar y organizar de manera coherente tanto la información geométrica como la descriptiva, haciendo posible que los modelos 3D sean también contenedores dinámicos de datos históricos y técnicos. Este proceso se ha visto reforzado por el avance de tecnologías complementarias, como el escaneo láser y la fotogrametría, que posibilitan la

creación de nubes de puntos precisas y detalladas, fundamentales para la elaboración de modelos digitales robustos.

Además, el HBIM ofrece ventajas significativas en términos de colaboración interdisciplinaria, ya que facilita la integración de aportaciones de especialistas en conservación, historia del arte, ingeniería y arquitectura. La capacidad de actualizar el modelo conforme se realicen intervenciones o se produzcan cambios en el estado del edificio, y la posibilidad de compartir información en tiempo real, optimizan la toma de decisiones y la planificación de proyectos de restauración.

Esta metodología no solo mejora la representación y documentación del patrimonio, sino que también se configura como una herramienta estratégica para la gestión integral del entorno construido, permitiendo analizar la evolución del edificio a lo largo del tiempo y prever su comportamiento futuro. La adopción del HBIM en diversas iniciativas de conservación y restauración evidencia, así, su relevancia como solución innovadora que integra el conocimiento técnico con la preservación del legado histórico (Castellano Román, 2017; Murphy et al., 2007; Armisen et al., 2018).

4.6.4. GIS

Los GIS son herramientas digitales esenciales que facilitan la captura, almacenamiento, manipulación, análisis, modelización y visualización de datos geográficos. Estos sistemas están diseñados específicamente para resolver problemas complejos relacionados con la planificación y gestión del territorio, al conectar los datos con mapas que integran la ubicación (dónde se encuentran los elementos) con todo tipo de información descriptiva (cómo son esos elementos). Este proceso permite obtener una comprensión profunda de los patrones espaciales, las relaciones entre los elementos y el contexto geográfico en el que se encuentran.

El uso de GIS mejora la comunicación y la eficiencia en los proyectos, optimiza la gestión y facilita la toma de decisiones. Además, permite el análisis de datos para construir conocimiento, resolver problemas complejos y ofrecer un gran potencial para aprovechar al máximo los datos mediante visualizaciones detalladas, análisis espaciales automatizados, modelización, uso de *Big Data* e integración con IA y el Internet de las Cosas (IoT) (Geertman et al., 2021). Esto se puede hacer de forma colaborativa y en tiempo real, lo que optimiza la productividad y precisión de los proyectos.

4.7. GIS en el patrimonio cultural y las construcciones históricas

En el ámbito del patrimonio cultural, en particular las construcciones históricas, GIS desempeña un papel fundamental en la documentación, conservación y gestión de sitios y elementos patrimoniales. Estas herramientas permiten integrar, analizar y visualizar datos geoespaciales con el objetivo de preservar el patrimonio cultural de manera más efectiva. Algunas de las aplicaciones clave de los GIS en este contexto son las siguientes:

- La captura y almacenamiento de datos geográficos permite almacenar información precisa sobre la ubicación de sitios históricos, construcciones y restos arqueológicos mediante técnicas como la geocodificación. Esto integra los datos espaciales con descripciones detalladas de los elementos patrimoniales, facilitando su gestión y seguimiento.
- La manipulación y análisis de datos espaciales es otra aplicación importante, ya que permite estudiar la distribución de los elementos patrimoniales y sus relaciones topológicas, como la adyacencia o la conectividad entre sitios. Este análisis puede ayudar a identificar patrones de comportamiento en el contexto histórico, revelando información valiosa sobre cómo interactuaban estos elementos en el pasado.
- Los GIS también posibilitan la modelización temporal, lo que permite realizar análisis sobre la evolución de sitios históricos a lo largo del tiempo. Esto facilita la creación de modelos predictivos que pueden ayudar en la planificación de la conservación, proporcionando información sobre cómo los sitios pueden cambiar en el futuro.
- La visualización geoespacial es una de las herramientas más poderosas de los GIS. A través de la creación de mapas y representaciones visuales de los datos, los GIS mejoran la comprensión de la ubicación, tamaño y características de los objetos patrimoniales en la superficie terrestre, como los restos de una construcción histórica o la extensión de un sitio arqueológico (Álvarez et al., 2018; Lehner & Dorffner, 2020).

Además, los GIS facilitan el análisis de proximidad y superposición. Estos análisis permiten estudiar la relación entre elementos cercanos a un sitio histórico y cruzar información de diferentes capas geográficas, como la relación entre construcciones históricas y tipos de suelo o cambios en el uso del suelo a lo largo del tiempo. Este tipo de análisis ayuda a comprender mejor el contexto de los sitios patrimoniales.

El análisis de redes históricas también es fundamental en el estudio del patrimonio, ya que permite examinar la conectividad de caminos, rutas o redes históricas, proporcionando información crucial sobre la infraestructura y los desplazamientos en tiempos pasados.

En cuanto a la gestión del patrimonio y la respuesta a eventos espaciales, los GIS permiten gestionar los riesgos que pueden afectar al patrimonio cultural, como desastres naturales o cambios en el entorno. También facilitan la planificación de medidas de protección y la respuesta ante situaciones de emergencia (Ramírez Eudave & Ferreira, 2021; Ravankhah et al., 2019).

La evaluación de la calidad de los datos geográficos mediante estándares como la ISO 19157³ garantiza que los datos geoespaciales utilizados sean precisos y de alta calidad, lo cual es esencial para la conservación y gestión eficaz del patrimonio.

³ Información geográfica. Calidad de datos. (ISO 19157:2013).

Finalmente, los GIS permiten la integración de imágenes satelitales y la modelización de terrenos, lo que facilita el estudio de sitios arqueológicos o la evolución del paisaje histórico. Además, el uso de los *Digital Elevation Models* (DEM) para el análisis del terreno posibilita estudiar el impacto visual y paisajístico, y realizar estudios sobre la interacción entre los sitios patrimoniales y su entorno físico (Rahman, 2022; Orozco Carpio et al., 2023; Orozco Carpio et al., 2024).

En resumen, los GIS ofrecen un conjunto de herramientas poderosas que no solo mejoran la documentación y conservación del patrimonio cultural, sino que también optimizan su gestión y protección mediante el análisis geoespacial avanzado.

4.7.1. Softwares GIS

La gestión del patrimonio cultural, especialmente en su dimensión espacial, requiere herramientas tecnológicas capaces de integrar, analizar y visualizar datos geográficos con precisión. Entre las plataformas más utilizadas en este ámbito se destacan ArcGIS y QGIS, dos sistemas GIS que, aunque difieren en su enfoque y accesibilidad, comparten un objetivo común: facilitar la conservación, estudio y difusión del patrimonio cultural a través del análisis espacial.

ArcGIS es una plataforma integral para análisis avanzados, desarrollada por Esri y reconocida por su robustez y versatilidad. En el ámbito del patrimonio cultural, ArcGIS permite la creación de mapas temáticos, georreferenciando edificios históricos, yacimientos arqueológicos o rutas culturales, y asociando capas de información como cronologías, estilos arquitectónicos o niveles de deterioro. Además, con herramientas como Spatial Analyst o 3D Analyst, se pueden realizar análisis espaciales avanzados para evaluar riesgos como inundaciones o erosión, así como estudiar las relaciones contextuales, como la visibilidad de un monumento en su entorno. ArcGIS también se integra con otras tecnologías como BIM y nubes de puntos, facilitando la superposición de modelos 3D con datos geográficos para planificar restauraciones de manera precisa.

Por otro lado, QGIS es una plataforma de código abierto que ha ganado popularidad por su flexibilidad y coste cero. Esta opción resulta especialmente valiosa para instituciones con presupuestos limitados o proyectos colaborativos. QGIS permite gestionar datos vectoriales y raster, lo que facilita la creación de inventarios patrimoniales detallados, como catálogos de fachadas históricas o registros de materiales constructivos. También se puede personalizar mediante *plugins* como QuickMapServices o LidarViewer, que amplían sus capacidades, permitiendo trabajar con mapas base o nubes de puntos. Además, QGIS promueve el trabajo colaborativo, ya que permite compartir proyectos en formatos estándar como GeoJSON o KML y colaborar en plataformas como QGIS Cloud.

Así, se verifica que ambas plataformas ofrecen potentes herramientas adaptables que permiten a los profesionales del patrimonio cultural tomar decisiones informadas, optimizar la conservación y facilitar la difusión de sitios y objetos históricos.

4.8. Nubes de puntos (PCD)

Las nubes de puntos son una representación digital en tres dimensiones compuesta por una gran cantidad de puntos, cada uno definido por coordenadas (x , y , z) que indican su posición en el espacio. Estas nubes capturan la forma y la geometría de objetos o entornos, ofreciendo una descripción detallada y precisa que es fundamental para la creación de modelos 3D.

Se obtienen mediante técnicas como el escaneo láser y la fotogrametría. En el primer caso, dispositivos como los sistemas LIDAR emiten pulsos de luz y miden el tiempo que tarda en reflejarse, determinando la distancia a cada punto de la superficie escaneada. Por otro lado, la fotogrametría utiliza múltiples imágenes superpuestas para reconstruir la geometría de un objeto o escena, generando un conjunto de puntos basado en la coincidencia de características visuales entre las imágenes.

La estructura de una nube de puntos es, en esencia, un conjunto de datos sin conectividad explícita entre los puntos; es decir, cada punto es independiente, aunque en conjunto formen la representación completa de la superficie. Además, estos puntos pueden incluir información complementaria, como el color, la intensidad de la señal o las normales a la superficie, lo que enriquece el modelo y permite un análisis más detallado. La densidad y distribución de los puntos determinan el nivel de detalle y precisión del modelo, y mediante técnicas de procesamiento estas nubes pueden convertirse en modelos digitales estructurados y utilizables en aplicaciones en arquitectura, ingeniería y conservación del patrimonio.

4.8.1. Tecnologías para la adquisición de PCD

Como antes mencionado, existen principalmente dos formas de obtener una nube de puntos: el escaneo láser y la fotogrametría. En el primer caso, se utilizan dispositivos LIDAR (*Light Detection and Ranging*) que emiten pulsos de luz láser, los cuales, al reflejarse en las superficies, permiten calcular distancias con gran precisión. Esta técnica es capaz de capturar detalles intrincados en interiores mediante escáneres terrestres, revelando elementos tan sutiles como tallas en madera o grietas en muros, mientras que, en aplicaciones a mayor escala, los sistemas LIDAR aéreos permiten mapear extensas áreas arqueológicas o paisajes culturales (Liu et al., 2023).

Por otro lado, la fotogrametría se basa en la captura de cientos de fotografías superpuestas tomadas desde múltiples ángulos. Mediante algoritmos avanzados, como los basados en *Structure from Motion* (SfM), se identifican puntos comunes entre las imágenes para reconstruir la geometría en tres dimensiones. Esta técnica resulta ideal para proyectos con presupuestos limitados o en entornos de difícil acceso, como cuevas con pinturas rupestres, donde la portabilidad de los equipos de captura es crucial. Ambas metodologías ofrecen alternativas complementarias para generar modelos 3D precisos que pueden ser utilizados en diversas aplicaciones, desde la conservación del patrimonio hasta la planificación y análisis en el ámbito de la arquitectura (Escudero et al., 2024).

4.8.2. Estructura de datos

Como previamente fue aclarado, una nube de puntos es un conjunto masivo de datos sin una malla o conectividad predefinida. Cada punto actúa como un testigo independiente de la superficie escaneada, pero en conjunto revelan la morfología completa del objeto. Además de las coordenadas espaciales, estos puntos pueden almacenar información adicional:

- **Color (RGB):** Obtenido de cámaras integradas, permite diferenciar materiales (piedra vs. ladrillo) o identificar alteraciones cromáticas.
- **Intensidad:** Útil para detectar humedades en muros, ya que superficies húmedas reflejan menos luz láser.
- **Normales:** Vectores que indican la orientación de la superficie, clave para simulaciones estructurales o estudios de erosión.

La densidad de puntos (puntos por metro cuadrado) determina el nivel de detalle: desde modelos generales (10 pts/m²) para análisis urbanísticos hasta capturas ultra-densas (10,000 pts/m²) para documentar ornamentos barrocos.

4.8.3. Procesamiento de datos crudos a modelos

El procesamiento de nubes de puntos es fundamental para transformar datos crudos en modelos digitales útiles. Inicialmente, se realiza un filtrado y limpieza de la información para eliminar el ruido, como la presencia de personas o vehículos, utilizando algoritmos de segmentación que aseguran que solo se conserve la geometría relevante. Una vez depurados, los datos se registran, es decir, se alinean múltiples escaneos en un único sistema de coordenadas, lo que resulta esencial en el caso de edificios grandes que se escanean por secciones. A partir de esta base, se genera una malla poligonal y se aplica un texturizado fotorrealista, dando lugar a modelos 3D navegables y de alta calidad visual. Estos modelos se pueden integrar con plataformas BIM mediante la conversión a formatos estandarizados, como IFC (*Industry Foundation Classes*), lo que permite enriquecerlos con información patrimonial, por ejemplo, cronologías de intervenciones. Además, la integración con sistemas GIS facilita la utilización de estos modelos en análisis espaciales y en la gestión integral del patrimonio cultural.

En síntesis, el flujo de trabajo se estructura de la siguiente manera:

Filtrado y limpieza > Registro > *Mesh* y texturizado > Integración BIM / GIS

4.8.4. Aplicaciones transformadoras en el patrimonio cultural

El uso de PCD en el ámbito del patrimonio cultural ofrece aplicaciones transformadoras que abarcan desde el diagnóstico estructural hasta la difusión interactiva. Por ejemplo, en el diagnóstico estructural, la comparación de nubes de puntos capturadas en diferentes momentos permite cuantificar de forma precisa las deformaciones en elementos arquitectónicos, como bóvedas o columnas, evidenciado en casos como la Basílica del Pilar en Zaragoza. Esta capacidad de medir cambios a lo largo del tiempo resulta fundamental para planificar intervenciones de restauración.

Además, la reconstrucción virtual se beneficia enormemente de las nubes de puntos, ya que posibilita recrear elementos desaparecidos, como ocurrió con el retablo de la Catedral de Valencia, utilizando vestigios escaneados para generar modelos digitales detallados que recuperan, al menos de forma virtual, partes del patrimonio perdido. En términos de conservación preventiva, los modelos 3D enriquecidos con datos de intensidad láser permiten simular el impacto de vibraciones urbanas sobre frescos medievales, ofreciendo una herramienta poderosa para anticipar y mitigar daños en piezas de gran valor histórico.

Plataformas como Sketchfab permiten la difusión interactiva a partir de exploración de las nubes de puntos en entornos de realidad virtual. Acercan el patrimonio cultural a un público global y ofrecen experiencias inmersivas que facilitan la comprensión y apreciación de estos bienes históricos.

4.8.4. Aplicación de IA y automatización

Los avances en Inteligencia Artificial están transformando el análisis de nubes de puntos al optimizar su procesamiento e interpretación mediante algoritmos de ML. Estos algoritmos permiten clasificar automáticamente los materiales, diferenciando, por ejemplo, entre piedra caliza y granito, lo que resulta crucial para la evaluación y documentación del patrimonio. Además, la Inteligencia Artificial facilita la detección de patrones de deterioro, como la aparición de grietas o colonias biológicas, en tiempos récord, lo que posibilita intervenciones preventivas antes de que se produzcan daños mayores. Asimismo, mediante simulaciones basadas en datos históricos y ambientales, estos algoritmos son capaces de predecir riesgos potenciales, ofreciendo una herramienta poderosa para la planificación de estrategias de conservación y la mitigación de posibles daños en el patrimonio cultural.

4.9. Visores digitales

Los visores digitales están facilitando el acceso y difusión del patrimonio cultural, permitiendo a especialistas y al público general explorar modelos tridimensionales e información detallada de monumentos y edificios históricos. Herramientas como Google Arts & Culture, Sketchfab o plataformas desarrolladas por instituciones patrimoniales han democratizado el acceso al conocimiento sobre bienes culturales, promoviendo su estudio y conservación. Además, la integración de tecnologías como la realidad

aumentada y la realidad virtual ha abierto nuevas posibilidades para la interpretación y divulgación del patrimonio.

En España, el patrimonio cultural se gestiona a través de una diversa red de plataformas digitales que integran sistemas GIS, bases de datos y herramientas interactivas para documentar, gestionar y difundir el legado histórico. Estas soluciones tecnológicas, desarrolladas por diversas Comunidades Autónomas, combinan innovación y accesibilidad para democratizar el acceso a la herencia cultural.

En Aragón, el Sistema de Información del Patrimonio Cultural Aragonés (SIPCA), creado en 2006, se ha consolidado como un referente nacional al integrar aproximadamente 18.000 fichas del Catálogo de Patrimonio Arquitectónico Aragonés. Esta plataforma permite realizar búsquedas por geolocalización, tipología o periodo histórico, ofreciendo además acceso a documentación técnica, fotografías históricas y normativas de protección, e innovando al vincular bienes culturales con archivos sonoros, como campanas y tradiciones orales.

Andalucía cuenta con la Guía Digital del Patrimonio Cultural, una plataforma que alberga 30.000 registros, desde dólmenes neolíticos hasta casas-palacio barrocas, y que incorpora un visor GIS con diversas capas temáticas, facilitando el filtrado por municipio, época o estilo artístico. Esta herramienta se integra con el Catálogo General de Patrimonio Histórico Andaluz y destaca por incluir rutas virtuales, como la Ruta de los Castillos, que aportan información contextualizada.

En Asturias, el Sistema de Información Territorial e Infraestructura de Datos Espaciales (SITPA) se distingue por ser una infraestructura integral de datos espaciales, integrando capas de patrimonio arquitectónico, industrial y etnográfico con información urbanística y ambiental. Gracias a esta plataforma, es posible consultar bienes protegidos, calcular áreas de protección y realizar análisis espaciales avanzados, como el mapeo 3D de la cueva de Tito Bustillo con datos de sus pinturas rupestres.

La Comunidad de Madrid, a través de su Geoportal, se especializa en la documentación de 5.000 edificios protegidos, que abarcan desde palacios del Siglo de Oro hasta fábricas modernistas. Esta herramienta permite buscar por dirección, estilo o grado de protección y facilita el acceso a informes técnicos y planes especiales de conservación, integrando además modelos BIM de monumentos emblemáticos, como el Palacio de Cibeles.

En la Comunidad Valenciana, el Visor GVA Patrimonio se centra en los Bienes de Interés Cultural, mostrando delimitaciones exactas y zonas de amortiguación. Esta plataforma permite visualizar expedientes de declaración BIC desde 1985 y, mediante capas de riesgo como inundaciones e incendios, monitorizar monumentos costeros, tal como la Lonja de la Seda en Valencia, Patrimonio Mundial de la UNESCO.

Cantabria ofrece un portal unificado, Patrimonio y Cultura, que combina la documentación del patrimonio material, ejemplificado por cuevas como Altamira, con el patrimonio inmaterial, reflejado en el folclore montañés. Este portal incluye visores 3D para

yacimientos romanos, como Julióbriga, y fomenta proyectos de ciencia ciudadana para documentar tradiciones orales, ampliando la visión del patrimonio regional.

Cataluña, por su parte, pone a disposición el Cercador de l'Inventari del Patrimoni Arquitectònic de Catalunya, que contiene 25.000 registros que abarcan desde iglesias románicas hasta colonias industriales. Esta herramienta permite búsquedas por comarca, municipio o tipología, y facilita el acceso a fichas con planos históricos y estudios dendrocronológicos, además de vincularse con el Arxiu Nacional de Catalunya para enriquecer la información con datos documentales.

Otras comunidades autónomas también han desarrollado soluciones destacadas. En Galicia, el Sistema de Información do Patrimonio Cultural (SIPCG) integra petroglifos, castros y pazos, y cuenta con un visor 3D del Camino de Santiago. Castilla y León, a través de SINFORA, registra más de 15.000 bienes con énfasis en la arquitectura románica y el patrimonio industrial, evidenciado en los modelos LiDAR de las murallas de Ávila. Por su parte, el País Vasco dispone de GeoEuskadi, que incluye capas específicas para el patrimonio industrial y marítimo, y se destaca por la implementación de realidad aumentada en el Museo Guggenheim Bilbao.

Estos visores de patrimonio cultural demuestran cómo la integración de tecnología, datos geográficos y plataformas interactivas está revolucionando el acceso y la gestión del legado histórico en España. Al facilitar la documentación, el análisis y la difusión de la herencia cultural, estas herramientas no solo enriquecen la investigación y la conservación, sino que también promueven la participación ciudadana y aseguran la preservación de este valioso patrimonio para las futuras generaciones.

4.10. Contribuciones recientes en España

Investigaciones recientes han proporcionado valiosas perspectivas sobre la aplicación de tecnologías digitales en la documentación y conservación del patrimonio cultural, especialmente en el contexto español. En particular, el uso de tecnologías como HBIM y GIS ha abierto nuevas posibilidades para la gestión y preservación del patrimonio arquitectónico, proporcionando herramientas más precisas y eficaces para abordar los retos específicos de conservación en España.

La integración de HBIM en el ámbito del patrimonio cultural español ha cobrado relevancia en los últimos años debido a su capacidad para modelar digitalmente edificios históricos, permitiendo una representación detallada de sus características geométricas y constructivas (Angulo Fornos, 2019). Este enfoque se ha consolidado como una herramienta clave en la preservación y rehabilitación de edificaciones históricas, facilitando la intervención en estructuras complejas mediante la creación de modelos 3D que no solo incluyen datos espaciales, sino también información sobre materiales, condiciones estructurales y la evolución del edificio.

En este contexto, la tesis de Nieto Julián (2014) aborda la necesidad de replantear las metodologías tradicionales de documentación y análisis en el ámbito del patrimonio cultural. Su enfoque se centra en la adopción de técnicas gráficas innovadoras y avanzadas en manipulación de imágenes para la obtención de modelos geométricos de alta precisión. Estos modelos permiten una comprensión más profunda de los procesos relacionados con la arquitectura y la arqueología, superando las limitaciones de los métodos convencionales. La propuesta de la tesis es integrar tecnologías BIM, con énfasis en el desarrollo de HBIM, como una solución para fomentar la interoperabilidad entre los diversos agentes involucrados en la conservación del patrimonio. Así, se planteaba un modelo unificado de información que mejora la gestión, documentación y toma de decisiones en los procesos de rehabilitación y conservación arquitectónica.

La tesis de Manuel Castellano Román (2017), por su parte, se centra en el desarrollo de un modelo digital de información patrimonial adaptado al patrimonio histórico mediante la metodología BIM. Utilizando la Cartuja de Jerez como caso de estudio, la investigación busca integrar diferentes áreas del conocimiento—histórico, geométrico, estructural, estilístico, documental—en un único modelo gráfico digital. Este enfoque pretende optimizar la gestión integral de la tutela patrimonial, promoviendo la interoperabilidad entre especialistas y administraciones públicas, y estableciendo las bases para un Plan Director de gestión patrimonial que facilite la conservación, protección, investigación y difusión de bienes culturales.

En la tesis de Jordan Palimar (2018), se propone un protocolo de HBIM para gestionar intervenciones en edificios históricos, involucrando a todos los actores del patrimonio. A través del diseño de una plataforma web HBIM, se facilita el intercambio de información entre los diferentes actores interdisciplinarios. Los objetivos de la investigación incluyen comprender las necesidades de los involucrados en proyectos patrimoniales, identificar problemas y soluciones en la aplicación del HBIM, y desarrollar un protocolo (BIMlegacy) junto con una plataforma web para la sincronización de datos.

El trabajo realizado por Ferreira-López (2018) constituye una contribución relevante en la aplicación de Modelos Digitales de Información al ámbito del patrimonio cultural, integrando tecnologías SIG y estructuras de grafos desde una perspectiva transversal y científica. Su propuesta se articula en torno a la creación de una base de datos patrimonial escalable, orientada al análisis multiescalar, la protección y conservación del patrimonio, así como a la generación de sinergias interdisciplinarias.

Por otro lado, investigaciones como la de Quintanilla Castan (2022) se enfocan en el desarrollo de un sistema georreferenciado para el inventario del Patrimonio Arquitectónico. La tesis propone una metodología para documentar el Patrimonio Arquitectónico mediante la creación de un Modelo de Información del Edificio Histórico. Este modelo tridimensional integraría datos provenientes de diversas disciplinas, como la arquitectura, arqueología e historia, y permitiendo así un flujo eficiente y coherente de información entre los agentes involucrados en el proceso.

Recientemente, la tesis de Bertacchi (2022) aborda la dificultad de unificar las acciones de adquisición, procesamiento y conservación de datos digitales en el ámbito del patrimonio cultural, dada la diversidad de disciplinas involucradas. La investigación resalta varias problemáticas, tales como la falta de estándares comunes a nivel nacional e internacional, la ausencia de buenas prácticas y regulaciones para el uso adecuado de recursos públicos, y las diferencias en los niveles de competencia y conocimiento de los usuarios.

En conjunto, las investigaciones analizadas reflejan un panorama dinámico y en constante evolución en el ámbito del patrimonio cultural en España, donde la aplicación de tecnologías digitales como HBIM, GIS, las nubes de puntos y la estructuración de la información está transformando las metodologías tradicionales de documentación, análisis y conservación. Estas aportaciones destacan no solo el potencial de dichas herramientas para mejorar la precisión, la interoperabilidad y la gestión de la información patrimonial, sino también la necesidad de establecer marcos metodológicos sólidos y colaborativos que integren distintos saberes y disciplinas. Este enfoque multidimensional no solo enriquece la comprensión del patrimonio construido, sino que también sienta las bases para una conservación sostenible, adaptada a los retos contemporáneos y futuros.

Referencias del Capítulo 4

- Ababneh, A. (2024). Digital solutions for cultural heritage: preservation, interpretation, and engagement in line with the Venice charter principles. VIPERC.
- Álvarez, M., Raposo, J. F., Miranda, M., & Bello, A. B. (2018). Metodología de generación de modelos virtuales urbanos 3D para ciudades inteligentes. *Informes de la Construcción*, 70(537), 237. <https://doi.org/10.3989/id.56528>
- American Institute of Architects (AIA). (2013). *AIA G202-2013 Building Information Modeling Protocol Form*. American Institute of Architects.
- Angulo Fornos, R. (2019). Desarrollo de modelos digitales de información como base para el conocimiento, la intervención y la gestión en el patrimonio arquitectónico. De la captura digital al modelo HBIM [Tesis doctoral, Universidad de Sevilla, Departamento de Expresión Gráfica Arquitectónica].
- Appleby, M., Crane, T., Sanderson, R., Stroop, J., & Warner, S. (2024). *IIIF Presentation API 3.0*. International Image Interoperability Framework. Recuperado de <https://iiif.io/api/presentation/3.0/>
- Baratin, L., Bertozzi, S., & Moretti, E. (2015). GIS intelligence for a cutting-edge management of 3D cities. *Digital Heritage International Congress*, 2, 93–96. <https://doi.org/10.1109/DigitalHeritage.2015.7419460>
- Bertacchi, G. (2022). Guidelines for the Management of Cultural Heritage Using 3D Models for the Insertion of Heterogeneous Data [Tesis doctoral, Alma Mater Studiorum – Università di Bologna, en cotutela con Universitat Politècnica de València].
- Billi, D., Croce, V., Bevilacqua, M. G., Caroti, G., Pasqualetti, A., Piemonte, A., & Russo, M. (2023). Machine learning and deep learning for the built heritage analysis: Laser scanning and UAV-based surveying applications on a complex spatial grid structure. *Remote Sensing*, 15(8), 1961. <https://doi.org/10.3390/rs15081961>
- Castellano Román, M. (2015). Generación de un modelo de información del patrimonio inmueble en el momento de su protección jurídica. *EGA Expresión Gráfica Arquitectónica*, 20(26), 266-277. <https://doi.org/10.4995/ega.2015.4060>
- Castellano Román, M. (2017). La Cartuja de Nuestra Señora de la Defensa en Jerez de la Frontera: Un modelo digital de información para la tutela de bienes inmuebles del patrimonio cultural [Tesis doctoral, Universidad de Sevilla, Departamento de Expresión Gráfica Arquitectónica].
- Comisión Europea (2019). Declaración de Cooperación para avanzar en la digitalización del patrimonio cultural.
- Croce, V., Caroti, G., De Luca, L., Piemonte, A., Véron, P., & Bevilacqua, M. G. (2021). Tra Intelligenza Artificiale e H-BIM per la descrizione semantica dei beni culturali: la Certosa di Pisa. En A. Arena, M. Arena, D. Mediat, & P. Raffa (Eds.), *CONNETTERE. Un disegno per annodare e tessere. Linguaggi Distanze Tecnologie* (pp. 608-625). Franco Angeli. <https://dx.doi.org/10.3280/oa-693.33>
- Croce, V. (2023). Digital heritage classification via machine learning and H-BIM. *Nexus Network Journal*, 25(Suppl 1), 415–421. <https://doi.org/10.1007/s00004-023-00725-0>
- Croce, V., Manuel, A., Caroti, G., Piemonte, A., De Luca, L., & Véron, P. (2023). Semi-automatic classification of digital heritage on the Aioli open source 2D/3D annotation platform via machine

- learning and deep learning. *Journal of Cultural Heritage*, 62, 187-197. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2023.05.017>
- Dressen, A. (2025). Cultural heritage data for research – An introduction. *Open Library of Humanities Journal*, 10(2)–11(1). <https://olh.openlibhums.org/issue/905/info/>
- Eastman, C. M. (1999). *Building product models: Computer environments supporting design and construction* (1st ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781315138671>
- Eastman, C., Teicholz, P., Sacks, R., & Liston, K. (2011). *BIM handbook: A guide to building information modeling for owners, managers, designers, engineers and contractors*. John Wiley & Sons.
- Farin, G. E., Hoschek, J., & Kim, M.-S. (2002). *Handbook of Computer Aided Geometric Design*. North-Holland.
- Ferreira-Lopes, P. (2018). *Modelos digitales de información-sig y grafos- aplicados en el patrimonio: la fábrica edilicia en el antiguo reino de Sevilla en el tránsito a la edad moderna* [Tesis doctoral, Universidad de Sevilla, Departamento de Expresión Gráfica Arquitectónica].
- Ferreira-Lopes, P., Pinto Puerto, F. S. (2017). Creación de un modelo de información relacional de la red tardogótica. *Avances, problemáticas y soluciones. Obra Congrua. Estudios sobre la construcción gótica peninsular y europea* Ed. Instituto Juan Herrera, Madrid, 2017, pp. 365-377. ISBN: 978-84-9728-565-0.
- Geertman, S. C. M., Pettit, C., Goodspeed, R., & Staffans, A. (Eds.). (2021). *Urban informatics and future cities*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-76059-5>
- Isaac, A., & Haslhofer, B. (2013). Europeana Linked Open Data - data.europeana.eu. *Semantic Web Journal*, 4(3), 275–277. <https://doi.org/10.3233/SW-120092>
- Lehner, H., & Dorffner, L. (2020). Digital geoTwin Vienna: Towards a digital twin city as geodata hub. *PFG – Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Geoinformation Science*, 88, 63–75. <https://doi.org/10.1007/s41064-020-00101-4>
- Liu, J., Azhar, S., Willkens, D., & Li, B. (2023). Static terrestrial laser scanning (TLS) for heritage building information modeling (HBIM): A systematic review. *Virtual Worlds*, 2, 90–114. <https://doi.org/10.3390/virtualworlds2020006>
- Liu, F., Hindmarch, J., & Hess, M. (2023). A review of the cultural heritage linked open data ontologies and models. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLVIII-M-2, 943–950. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-M-2-2023-943-2023>
- Moya Muñoz, J. (2022). *Molinos aceiteros y olivar histórico de Écija (Sevilla): Identificación y transformación diacrónica a través de los modelos digitales SIG y HBIM* [Tesis doctoral, Universidad de Sevilla, Departamento de Expresión Gráfica Arquitectónica].
- Nieto Julián, J. E. (2014). *Generación de modelos de información para la gestión de una intervención en el patrimonio arquitectónico* [Tesis doctoral, Universidad de Sevilla].
- 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 the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, II-5/W1, 215–221. <https://doi.org/10.5194/isprsannals-II-5-W1-215-2013>
- Orozco Carpio, P. R., Viñals, M. J., & López-González, M. C. (2024). 3D point cloud and GIS approach to assess street physical attributes. *Smart Cities*, 7(3), 991–1006. <https://doi.org/10.3390/smartcities7030042>

- Orozco Carpio, P. R., Viñals, M. J., Escudero, P. A., & Rolim, R. C. V. S. (2023). Geospatial tools for determining visitor carrying capacity in tourist streets and public spaces of historic centres. *Heritage*, 6, 7100–7114. <https://doi.org/10.3390/heritage6110370>
- Palomar, I. J. (2019). Protocol to manage heritage-building interventions using Heritage Building Information Modelling (HBIM) [Tesis doctoral, Universitat Politècnica de València].
- Quintilla Castán, M. (2022). Inventario gráfico digital del patrimonio arquitectónico Mudéjar en Aragón / Digital Graphic Inventory of the Mudejar Architectural Heritage in Aragon [Tesis doctoral, Universidad de Zaragoza, Departamento de Arquitectura, Escuela de Ingeniería y Arquitectura].
- Rahman, A. (2022). A GIS-based, microscale walkability assessment integrating the local topography. *Journal of Transport Geography*, 103, 103405. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2022.103405>
- Ramírez Eudave, R., & Ferreira, T. M. (2021). On the suitability of a unified GIS-BIM-HBIM framework for cataloguing and assessing vulnerability in Historic Urban Landscapes: A critical review. *International Journal of Geographical Information Science*, 35(10), 2047–2077. <https://doi.org/10.1080/13658816.2020.1844208>
- Ravankhah, M., De Wit, R., Argyriou, A. V., Chliaoutakis, A., Revez, M. J., Birkmann, J., Žuvela-Aloise, M., Sarris, A., Tzigounaki, A., & Giapitsoglou, K. (2019). Integrated assessment of natural hazards, including climate change's influences, for cultural heritage sites: The case of the historic centre of Rethymno in Greece. *International Journal of Disaster Risk Science*, 10(3), 343–361. <https://doi.org/10.1007/s13753-019-00235-z>
- Recuero, A. (1988). Sistema CAD integrado para la edificación. *Informes De La Construcción*, 40(398), 129–133. <https://doi.org/10.3989/ic.1988.v40.i398.1583>
- Scarpa, E., & Valente, R. (2024). A resource hub for interoperability and data integration in heritage research: The H-SeTIS database. *Archeologia e Calcolatori*, 35(1), 543-562. <https://doi.org/10.19282/ac.35.1.2024.32>
- Sutherland, I. E. (1963). Sketchpad: A Man-Machine Graphical Communication System (Tesis doctoral). Massachusetts Institute of Technology.
- Succar, B. (2008). Building information modelling framework: A research and delivery foundation for industry stakeholders. University of Newcastle, Australia.
- Tamborrino, R., & Rinaudo, F. (2015). Digital urban history as an interpretation key of cities' cultural heritage. *2015 Digital Heritage*, Granada, Spain, 235-242. <https://doi.org/10.1109/DigitalHeritage.2015.7419503>
- UNESCO (2003). Carta sobre la preservación del patrimonio digital.
- Ye, X., Peng, W., & Wang, D. (2004). Computer-Aided Design: The First Fifty Years. *Computer-Aided Design*, 36(4), 381-390.
- Zhu, F., Yu, R., Wang, B., Ning, Y., & Tang, T. (2019). Big data analytics in intelligent transportation systems: A survey. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 20(1), 383-398. <https://doi.org/10.1109/TITS.2018.2815678>

Capítulo 5. Organización del conocimiento del patrimonio arquitectónico



Capítulo 5: Organización del conocimiento del patrimonio arquitectónico

Presentación

La evolución de los sistemas de clasificación de la información aplicados al campo del patrimonio arquitectónico ha pasado de métodos tradicionales basados en taxonomías y registros manuscritos a herramientas digitales avanzadas como HBIM y GIS. La combinación de los modelos de clasificación estructurados, indización semántica y algoritmos de clasificación automática está favoreciendo una gestión más eficiente y un análisis detallado del patrimonio arquitectónico, facilitando la gestión para su conservación y el acceso a la información.

En este capítulo, se explora la evolución de los sistemas tradicionales de clasificación de la información, desde su estructuración histórica hasta la transición hacia sistemas digitales complejos como tesauros y la web semántica con ontologías. Además, se indaga cómo la Inteligencia Artificial está transformando la gestión y recuperación de datos en el ámbito del patrimonio arquitectónico (Fig. 5.1).



Figura 5.1: Mapa conceptual de los conceptos abordados en este capítulo (elaboración propia).

5.1. Sistemas tradicionales de clasificación de la información en el patrimonio arquitectónico

La clasificación de la información ha sido una necesidad fundamental en la organización del conocimiento, permitiendo la estructuración y acceso eficiente a los documentos y registros históricos. En el ámbito del patrimonio arquitectónico, la clasificación cobra especial relevancia para la conservación, restauración y análisis de los bienes culturales. Desde la antigüedad, se han desarrollado distintos sistemas para documentar y categorizar la arquitectura, adaptándose a las necesidades de cada época y contexto cultural.

Según Maniez (1993), la clasificación es el proceso de distribuir objetos en distintas clases en función de características comunes, mientras que la ordenación se refiere a la disposición secuencial de estos objetos siguiendo un criterio determinado. En la documentación del patrimonio arquitectónico, esto se traduce en la identificación y agrupación de edificios y estructuras según criterios cronológicos, estilísticos, funcionales o geográficos.

Un elemento clave en este proceso es la signatura topográfica, utilizada en bibliotecas y archivos para identificar documentos mediante símbolos (letras, números o signos) que permiten su ubicación dentro de un sistema de organización documental. En el caso del patrimonio arquitectónico, sistemas similares han sido empleados en catálogos de monumentos y registros de los bienes culturales.

5.1.1 Principales sistemas de clasificación en la documentación

A lo largo de la historia, diversos modelos de clasificación han sido desarrollados con enfoques y metodologías distintas, muchos de los cuales han sido adaptados para la documentación de edificios históricos. Por ejemplo, en el siglo I a.C., en su tratado *De Architectura*, Vitruvio clasificó los edificios en función de su uso, distinguiendo entre edificios públicos, viviendas domésticas y militares, estableciendo principios que influyeron en la documentación arquitectónica posterior.

En el siglo XV, Leon Battista Alberti, en *De re aedificatoria*, propuso una clasificación basada en la función y los materiales de construcción, influyendo en la sistematización de la arquitectura renacentista.

Durante el siglo XVIII, en los Inventarios de la Ilustración, gobiernos y academias comenzaron a catalogar monumentos históricos mediante criterios estilísticos y cronológicos, sentando las bases para registros modernos como el *Inventaire général des monuments et des richesses artistiques de la France*.

En el siglo XIX, Eugène Viollet-le-Duc, en su *Dictionnaire raisonné de l'architecture française*, desarrolló un sistema descriptivo para la arquitectura medieval, combinando análisis tipológico y técnico. En el mismo siglo, en su *Précis des leçons d'architecture*

(1809), Durand propuso una metodología sistemática para el diseño de edificios, enfocándose en la clasificación tipológica y funcional.

En la actualidad, muchos países han establecido registros nacionales de monumentos que clasifican y protegen edificios históricos según criterios específicos. Por ejemplo, en Estados Unidos, el *National Register of Historic Places* organiza los monumentos por periodos históricos, estilos arquitectónicos y usos. En España, el *Catálogo de Bienes de Interés Cultural* cumple una función similar, protegiendo y catalogando el patrimonio arquitectónico del país.

5.1.2 Clasificación e indización en la documentación arquitectónica

En el ámbito del patrimonio arquitectónico, la clasificación documental es fundamental para la gestión y conservación de bienes culturales. El *Vocabulaire de la Documentation* de la *Association Française de Normalisation* (AFNOR, 1985) introduce una distinción clave entre dos procesos complementarios en la organización de la información. Emplea el término *indización* para referirse a dos tipos de operaciones: el *lenguaje de clasificación* (clasificación en sí) y el *lenguaje combinado* (indización propiamente dicha) (Maniez, 1993):

- **Lenguaje de clasificación:** utilizado en bases de datos de patrimonio, este sistema jerárquico permite distribuir edificios y elementos arquitectónicos en clases y subclases (por ejemplo, según el estilo arquitectónico: románico, gótico, barroco).
- **Lenguaje combinado (indización):** se basa en la asignación de términos clave a los documentos sin una estructura jerárquica fija, facilitando la búsqueda temática en catálogos digitales. Por ejemplo, en los sistemas GIS, la indización permite asociar metadatos a cada edificación georreferenciada. También en una base de datos de patrimonio arquitectónico, una catedral gótica del siglo XIII podría estar clasificada jerárquicamente dentro de un sistema de clasificación, pero además indexada con términos como "estructura de piedra", "bóveda de crucería", "estilo gótico", "siglo XIII", permitiendo búsquedas más flexibles.

5.1.3 Clasificación automática y su aplicación en el patrimonio arquitectónico

Con los avances en el campo de la informática, han surgido métodos de clasificación automática, como el Aprendizaje Automático, *Clustering* y el Aprendizaje Profundo (DL), que aplican técnicas algorítmicas para organizar la información de manera eficiente. Estas herramientas han facilitado la digitalización de archivos históricos, la creación de modelos 3D y la automatización en la gestión del conocimiento patrimonial. Algunas estrategias incluyen:

- **Clasificación por proximidad:** se trata de algoritmos que agrupan elementos similares según sus características geométricas o tipológicas en bases de datos arquitectónicas. Por ejemplo, en BIM, es posible agrupar elementos estructurales con propiedades similares.

- **Fragmentación en subgrupos:** divide grandes conjuntos de datos en clústeres más pequeños según criterios estadísticos o semánticos. En la digitalización de patrimonio, esta técnica es clave para la segmentación de nubes de puntos en escaneos 3D.
- **Sistemas de inferencia semántica:** utilizados en la web semántica, permiten relacionar información arquitectónica dispersa en distintos documentos, facilitando su análisis en plataformas digitales interconectadas.

Estos métodos han optimizado la organización de grandes volúmenes de información sobre el patrimonio arquitectónico, sentando las bases para sistemas más avanzados, como la Inteligencia Artificial aplicada a la conservación y restauración de monumentos.

5.2. Glosarios y Vocabularios Controlados

Los glosarios y vocabularios controlados son herramientas fundamentales en la organización de la información, ya que permiten una representación consistente y precisa de los conceptos dentro de un dominio específico. Un vocabulario controlado se define como una estructura organizada de palabras y frases utilizadas para indexar contenido y facilitar su recuperación mediante la navegación o búsqueda. Por lo general, incluyen términos preferidos y variantes, lo que contribuye a una indización más efectiva y a una recuperación de información más eficiente.

La importancia de utilizar vocabularios controlados radica en la necesidad de evitar ambigüedades y asegurar la coherencia en la categorización y etiquetado sistemático de la información. Al emplear una lista definida de términos, se facilita la organización y recuperación de datos, mejorando la precisión en las búsquedas.

Además, los vocabularios controlados pueden variar en complejidad, desde listas simples de términos claramente definidos hasta estructuras más elaboradas como tesauros, que incorporan relaciones jerárquicas y asociativas entre los términos.

La creación de los glosarios y diccionarios ha sido el primer paso para la estandarización de la terminología utilizada en la descripción y catalogación de elementos en el campo del patrimonio arquitectónico. Esta estandarización facilita la gestión y preservación de la información, y también mejora la accesibilidad y comprensión por parte de diversos usuarios, desde investigadores hasta el público en general. En el ámbito de la conservación del patrimonio, el uso de vocabularios controlados permite una documentación precisa de términos constructivos, materiales, estilos arquitectónicos y técnicas de intervención.

A medida que la conciencia sobre la necesidad de preservar los monumentos históricos creció, especialmente después de la Revolución Francesa y durante el auge del romanticismo, los glosarios y diccionarios se fueron perfeccionando y ampliando para incluir técnicas de restauración, materiales y metodologías que hoy forman la base del campo. Así, a lo largo de la historia, se han desarrollado diversos glosarios y vocabularios

controlados para facilitar la documentación y estudio del patrimonio arquitectónico. Estos instrumentos han sido fundamentales para establecer un lenguaje técnico común y promover la conservación y restauración de monumentos históricos.

En el siglo XIX, la preservación de monumentos históricos comenzó a ser vista como una disciplina formal, especialmente en Europa. Eugène Viollet-le-Duc elaboró el antes mencionado *Dictionnaire raisonné de l'architecture française du XIe au XVIe siècle* (1854-1868), obra que se convirtió en una referencia fundamental para arquitectos y restauradores de los siglos XIX y XX, abarcando términos técnicos relacionados con la arquitectura y la restauración, muchos de los cuales aún se utilizan hoy en día.

Aunque no fue un glosario formal en sí, John Ruskin, en sus escritos sobre la conservación y el restaurado de monumentos, introdujo muchos términos técnicos y conceptos clave para el tratamiento de monumentos históricos. Sus obras *The Seven Lamps of Architecture* (1849) y *The Stones of Venice* (1851-1853) abordaron la necesidad de proteger los monumentos históricos de la intervención desmedida, planteando una filosofía de conservación que influyó en generaciones posteriores.

En las últimas décadas, los glosarios técnicos han desempeñado un papel fundamental en la documentación y gestión del patrimonio arquitectónico, tanto a nivel nacional como internacional. En América Latina, destacan los esfuerzos pioneros del Instituto Nacional de Antropología e Historia (INAH) de México, quien publicó en 1971 el *Glosario de términos arquitectónicos*, que incluía un instructivo para el catálogo de monumentos. Este documento no solo estandarizó conceptos clave, sino que también facilitó metodologías para la documentación sistemática del patrimonio. Más tarde fue elaborado por el Museo Nacional de Antropología de México el *Diccionario de términos básicos para describir y catalogar las colecciones arqueológicas* (1984). Este trabajo se enfocó en unificar terminología relacionada con arquitectura y monumentos históricos, y sentó las bases para establecer un lenguaje técnico común en estudios de patrimonio e intervenciones, siendo un referente para académicos y profesionales de la conservación.

A estos esfuerzos se suman iniciativas similares en otros países y contextos como:

- **Glosario de Arquitectura del Instituto Nacional de Patrimonio Cultural (Ecuador, 2010):** funciona como herramienta normativa para inventarios y catalogación de bienes culturales, garantizando uniformidad en la descripción de elementos arquitectónicos.
- **Glosario de Términos Urbanísticos del Plan Maestro (Cuba, 1998):** unifica definiciones en gestión patrimonial urbana, promoviendo diálogo entre especialistas y comunidades locales.
- **Glosario de ICOMOS:** desarrollado por el Consejo Internacional de Monumentos y Sitios, proporciona definiciones consensuadas a nivel global, esenciales para la cooperación transnacional.

Estos instrumentos ayudan a optimizar la precisión en la documentación, favoreciendo la accesibilidad y el intercambio de conocimiento. Al crear marcos terminológicos comunes, no solo se preserva la integridad conceptual del patrimonio, sino que se fortalece la colaboración interdisciplinaria e internacional.

5.3. Taxonomías en la organización de la información

La taxonomía, entendida como el estudio sistemático de la clasificación, proporciona un marco teórico-metodológico para estructurar el conocimiento mediante relaciones jerárquicas y asociativas. Su aplicación en el patrimonio arquitectónico permite organizar información compleja —desde estilos históricos hasta técnicas constructivas— en categorías interconectadas, facilitando su documentación, análisis y preservación.

Una taxonomía se estructura como una jerarquía conceptual, donde las categorías generales (nodos padres) se subdividen en subcategorías específicas (nodos hijos). Por ejemplo, bajo el nodo "Estilos arquitectónicos", podrían desprenderse subnodos como "Barroco" o "Modernismo", cada uno con atributos diferenciadores (época, geografía, elementos decorativos).

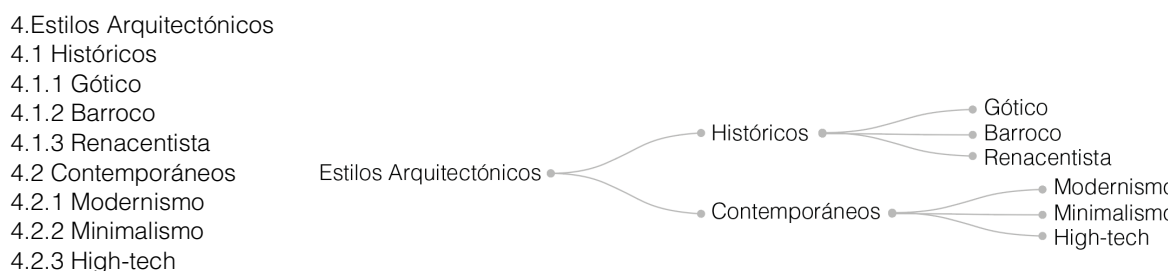


Figura 5.2: Ejemplo de una estructura taxonómica.

Desde la década de 1950, las taxonomías se han integrado en sistemas informáticos para gestionar grandes volúmenes de datos. Se trata siempre de relaciones jerárquicas que buscan ordenar y clasificar las unidades conceptuales del lenguaje natural para su procesamiento por los ordenadores, con el objetivo de facilitar la indización y la recuperación de la información. Estas estructuras se basan en sistemas de organización clásicos, como la Clasificación Decimal Universal (CDU). Por ejemplo, en 1971, la UNESCO desarrolló UNISIST, un proyecto que buscaba establecer un sistema mundial de información científica (Urbano, 2024).

En 1973, la UNESCO desarrolló la Nomenclatura Internacional para los campos de Ciencia y Tecnología. Se trata de un sistema de clasificación taxonómica ampliamente utilizado en la organización de proyectos de investigación y en la catalogación de tesis doctorales, proporcionando una estructura jerárquica para la clasificación del conocimiento. La nomenclatura se organiza en tres niveles: los campos, disciplinas y las subdisciplinas, que representan las divisiones más específicas dentro de una disciplina, correspondiendo a actividades concretas en Ciencia y Tecnología y estando codificadas con seis dígitos (UNESCO, 1974).

5.4. Los tesauros en la organización del conocimiento del patrimonio arquitectónico

Los tesauros son herramientas clave para la documentación especializada del patrimonio cultural, ya que transforman el lenguaje natural en vocabularios controlados, resolviendo ambigüedades terminológicas y garantizando coherencia en la descripción de bienes arquitectónicos. A diferencia de las taxonomías —que priorizan jerarquías rígidas—, los tesauros establecen relaciones semánticas flexibles (jerárquicas, asociativas y de equivalencia), lo que los hace ideales para abordar la complejidad histórica, técnica y contextual del patrimonio, ya que optimizan las búsquedas semánticas (Currás, 2005).

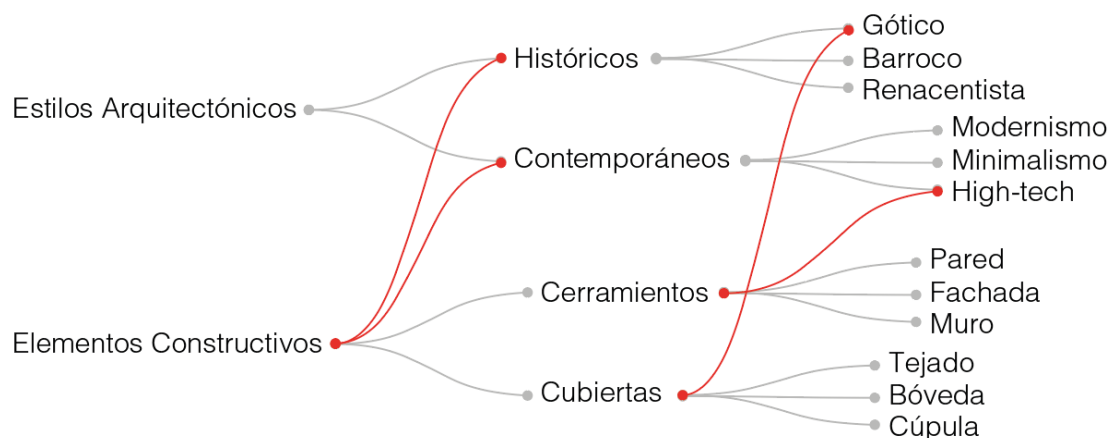


Figura 5.3: Ejemplo de estructura y relaciones en tesauros.

5.4.1 Características y estructura de los tesauros aplicados al patrimonio

En el ámbito de la arquitectura patrimonial, los tesauros permiten:

- **Normalizar términos estilísticos:** Por ejemplo, agrupar denominaciones regionales como “gótico isabelino” y “gótico flamígero” bajo el descriptor general “gótico tardío”.
- **Establecer vínculos contextuales:** Relacionar un movimiento arquitectónico (ej.: “Barroco”) con sus elementos característicos (“columna salomónica”, “cornisa moldurada”) y figuras influyentes (“Borromini”, “Churriguera”).
- **Normalizar términos constructivos:** Agrupar variantes regionales o terminología técnica bajo un término unificado, como “muro de carga” y “pared portante” bajo el descriptor general “estructura portante”.
- **Vincular elementos constructivos con su función:** Relacionar componentes arquitectónicos con su función y tipología, por ejemplo, “bóveda de cañón” con “techado de iglesias” o “techo de madera” con “estructuras residenciales de época medieval”.

5.4.2 Las relaciones de tesauros

Los tesauros facilitan la transición del lenguaje natural a un lenguaje normalizado mediante términos especializados y controlados con fines documentales. Estos términos establecen relaciones jerárquicas, asociativas y de equivalencia, además de incluir descriptores y términos equivalentes.

— **Relaciones jerárquicas (verticales):**

Arquitectura eclesiástica → Catedrales medievales → Gótico.

— **Relaciones asociativas (horizontales):**

“Estructura metálica” (material) se vincula con “arquitectura High-tech” (movimiento).

— **Relaciones de equivalencia:**

“Estilo Internacional” (término académico) = “Modernismo racionalista” (descriptor preferido).

Entre los tesauros más desarrollados en el ámbito del patrimonio cultural se encuentra el *UNESCO Thesaurus* (1977), una herramienta fundamental para la clasificación y recuperación de información en el contexto del patrimonio mundial.

En España, un ejemplo destacado es el Tesoro de Patrimonio Histórico Andaluz (TPHA) de 1998, que reúne más de 12.000 términos para la descripción de bienes culturales. Este tesoro abarca desde elementos constructivos, como “almena” o “arcobotante”, hasta tipologías arquitectónicas, como “alhóndiga” o “alcazaba”, facilitando así la documentación y el estudio del patrimonio.

Asimismo, el *Art & Architecture Thesaurus® Online* del Getty Research Institute es un referente en la catalogación del patrimonio arquitectónico y artístico. Su estructura basada en facetas permite clasificar un mismo elemento desde múltiples perspectivas, como “Materiales” (piedra volcánica), “Función original” (palacio virreinal) y “Estilo” (neoclásico), lo que favorece una mayor precisión en la indexación y recuperación de información.

5.4.3 Normas y estándares para tesauros en patrimonio cultural

La interoperabilidad a nivel global requiere la adopción de marcos estandarizados como SKOS¹, empleado en iniciativas como Europea de la Unión Europea para conectar tesauros nacionales. Asimismo, las normas ISO 25964² proporcionan un estándar internacional para la gestión de tesauros, aplicado en sistemas como el Vocabulario Controlado del ICOMOS, que unifica términos en inglés, francés y español.

¹ SKOS (*Simple Knowledge Organization System*) es un modelo basado en la web semántica para representar y gestionar esquemas de organización del conocimiento, como tesauros y vocabularios controlados, facilitando la interoperabilidad entre sistemas.

² UNE-ISO 25964-1:2014: Información y documentación. Tesauros e interoperabilidad con otros vocabularios. Parte 1: Tesauros para la recuperación de la información.

5.5. Ontologías en la organización del conocimiento del patrimonio arquitectónico

Las ontologías, construidas con una estructura jerárquica y relaciones complejas basadas en lógica formal, garantizan precisión y coherencia. Este modelo avanzado supera las capacidades de tesauros, taxonomías, diccionarios y glosarios, integrando y relacionando sus conceptos de manera más sofisticada. Así, pueden modelar relaciones complejas entre conceptos y propiedades, ofreciendo una base robusta para el análisis y la colaboración interdisciplinaria. Las ontologías son modelos formales que permiten representar y estructurar el conocimiento dentro de un dominio específico. Su desarrollo está ligado a la evolución de las ciencias de la información y la documentación, así como al avance de las tecnologías informáticas y la web semántica (Currás, 2005). En el ámbito patrimonial, representan un avance significativo, ya que posibilitan la modelización no solo de elementos físicos (edificios, materiales), sino también de contextos históricos, agentes sociales y procesos de deterioro. Su aplicación resulta clave para abordar la multidimensionalidad del patrimonio arquitectónico en la era digital.

Desde 1996, el desarrollo de ontologías en informática ha cobrado impulso con la irrupción de la web semántica, una evolución de la *World Wide Web Consortium* (W3C) propuesta por Tim Berners-Lee. Su objetivo es estructurar los datos para que puedan ser comprendidos y procesados automáticamente por máquinas, lo que favorece una mayor interoperabilidad y reutilización de la información en distintos dominios del conocimiento (Currás, 2005). En este contexto, las ontologías son un componente esencial, ya que permiten modelar formalmente el conocimiento mediante lenguajes y estándares como RDF³ y OWL⁴, facilitando la interpretación, vinculación y procesamiento automatizado de datos por aplicaciones y agentes inteligentes.

5.5.1 Las relaciones ontológicas

Las relaciones son la clave de las ontologías, ya que describen cómo se conectan las entidades (clases o instancias). Estas relaciones son fundamentales para estructurar el conocimiento y permitir inferencias automáticas, siendo de los siguientes tipos:

- **Relaciones jerárquicas:** estas relaciones definen jerarquías entre conceptos, clases y subclases.
- **Relaciones equivalentes:** indican que dos conceptos o propiedades representan lo mismo, dos o más clases que se relacionan por una propiedad de equivalencia.
- **Relaciones semánticas básicas:** estas relaciones describen conexiones significativas entre clases o instancias: de tipo, Parte de, Tiene atributo, conexión funcional.

³ RDF (*Resource Description Framework*): representa los datos en forma de tripletas (sujeto-predicado-objeto), permitiendo describir recursos en la web.

⁴ OWL (*Web Ontology Language*): extiende RDF con capacidades avanzadas para definir vocabularios, establecer restricciones y expresar relaciones complejas entre conceptos.

- **Relaciones de propiedad (*Object vs. Data*):** las propiedades en OWL se dividen en dos tipos principales: propiedades de objeto (*Object Properties*), que conectan dos entidades (clases o individuos), y propiedades de datos (*Data Properties*), que conectan una entidad con un valor literal (números, texto, fechas).
- **Relaciones espaciales y temporales:** estas son comunes en ontologías de GIS o HBIM. Las relaciones espaciales se definen, por ejemplo, como: dentro de, toca, intersecta; y las relaciones temporales se definen, por ejemplo, como: construido en, restaurado en, declarado patrimonio.
- **Relaciones causales:** Indican una conexión causa-efecto.
- **Relaciones de inferencia y restricciones (OWL):** estas relaciones permiten inferencias automáticas sobre los datos.
- **Restricciones de clases:** todos los valores de una propiedad deben pertenecer a una clase específica. Al menos un valor de una propiedad pertenece a una clase.
- **Cardinalidad:** mínimo número de relaciones y máximo número de relaciones.

5.5.2 Normas y estándares para ontologías

Los estándares y las ontologías desempeñan un papel clave en la mejora de la interoperabilidad, la búsqueda avanzada y el razonamiento automático sobre grandes volúmenes de información, optimizando así la gestión y conservación del conocimiento en el ámbito patrimonial. Estas herramientas permiten una integración más eficaz de datos dispersos y mejoran la accesibilidad y el análisis de la información.

- **OWL-Time:** Este estándar modela las dimensiones temporales, como la cronología de ampliaciones en un convento colonial, facilitando la representación de eventos históricos en el tiempo.
- **CRMInf:** Es una extensión del CIDOC-CRM que se centra en la documentación de procesos de deterioro, como la relación entre la humedad y los daños en murales, proporcionando un marco estructurado para describir estos fenómenos en el patrimonio.

Este enfoque de normalización y estandarización es fundamental para el desarrollo de sistemas más eficientes y efectivos en la conservación y el análisis del patrimonio cultural.

5.5.3 Definición y principios básicos en el contexto patrimonial

En el ámbito del patrimonio arquitectónico, una ontología organiza y estructura el conocimiento sobre los edificios históricos y su contexto, estableciendo relaciones jerárquicas y no jerárquicas entre conceptos. Esto facilita la interconexión de diversas áreas de información y permite consultas avanzadas y precisas. Las ontologías enriquecen las bases de datos de edificios históricos, estructurando el conocimiento de

manera comprensible para las máquinas, lo que potencia aplicaciones de Inteligencia Artificial, mejorando el análisis, la interoperabilidad y la toma de decisiones.

En el ámbito del patrimonio, una ontología es un modelo formal que define:

- **Entidades:** edificios, elementos constructivos (arcos, bóvedas), estilos (gótico, art déco).
- **Propiedades:** año de construcción, técnica utilizada (sillería, tapial), estado de conservación.
- **Relaciones:** *"La Catedral de México fue construida usando tezontle"* (edificio → material), *"El Palacio de Bellas Artes pertenece al estilo art nouveau"* (edificio → estilo).

La ontología del CIDOC-CRM normalizada por la ISO 21127⁵, utilizada por UNESCO, ICOMOS y en España implementada por el Museo del Prado permite vincular bienes patrimoniales con eventos históricos (restauraciones), agentes (arquitectos, gremios) y fuentes documentales (planos del siglo XVIII).

5.5.4 Ontologías y web semántica para el Patrimonio Arquitectónico

La web semántica ha impulsado el desarrollo de proyectos en los que las ontologías permiten la integración de datos dispersos en el ámbito del patrimonio arquitectónico. Algunos ejemplos destacados incluyen:

- Arches Heritage Platform: utiliza RDF/OWL para vincular la información sobre monumentos. Se trata de una plataforma de software de código abierto desarrollada por el Getty Conservation Institute y el World Monuments Fund para la gestión de datos del patrimonio cultural.
- La iniciativa Europea combina los estándares SKOS y CIDOC-CRM para establecer relaciones entre edificios europeos y los movimientos culturales que los influenciaron. Por ejemplo, un edificio vinculado a la Bauhaus puede asociarse con la Revolución Industrial y el uso del acero en la construcción.
- La ontología MONDIS (*Monument Damage Information System*) es una aplicación informática basada en el conocimiento que modela aspectos específicos de la conservación monumental. Su Ontología de Daños y Fallas de los Monumentos proporciona una representación formalizada de términos y relaciones relacionadas con el deterioro de bienes patrimoniales (Blaško et. al, 2012).

⁵ ISO 21127:2023: *Information and documentation. A reference ontology for the interchange of cultural heritage information.*

Estos proyectos evidencian el potencial de las ontologías y la web semántica para mejorar la gestión, preservación y acceso a la información del patrimonio arquitectónico a nivel global.

5.5.5 Aplicaciones recientes de ontologías en el patrimonio arquitectónico: experiencias y casos de estudio

Acierno (2017) presenta un modelo basado en ontologías para la gestión del conocimiento arquitectónico enfocado en la conservación. El objetivo es conceptualizar y proporcionar una base de conocimiento para la representación de la arquitectura, apoyando las fases de diseño de la conservación. La metodología se centra en la definición de clases y relaciones entre ellas, permitiendo una descripción detallada de los edificios históricos. La ontología facilita la integración de información proveniente de diversas fuentes y proporciona una base para el razonamiento automático sobre el conocimiento arquitectónico. El modelo propuesto busca mejorar la comprensión y gestión del patrimonio arquitectónico, facilitando la toma de decisiones en los procesos de conservación.

Zalamea Patino (2018) presenta el desarrollo de una ontología para la conservación preventiva del Patrimonio Cultural Construido. La ontología integra modelos existentes como CIDOC-CRM, Geneva CityGML y MONDIS, expandiéndolos con nuevas clases y propiedades. El objetivo es crear un marco semántico para mejorar la gestión de información sobre el BCH, facilitando la integración de datos de diversas fuentes. La metodología "*On-To-Knowledge*" fue usada para crear esta ontología que tiene 143 clases. La ontología fue aplicada a un caso de uso relacionado con la Nueva Catedral de Cuenca, Ecuador, para demostrar sus ventajas sobre otros sistemas (Zalamea Patino et. al, 2018).

5.5.6 Ontologías vs. taxonomías y tesauros en la organización de datos del patrimonio

Las ontologías, tesauros, taxonomías, diccionarios y glosarios son diferentes tipos de estructuras de conocimiento que organizan y definen términos y conceptos dentro de un dominio específico. Las ontologías pueden integrar todos estos elementos, ya que proporcionan un marco más amplio para representar conceptos, sus definiciones y las relaciones entre ellos de manera más detallada y formal.

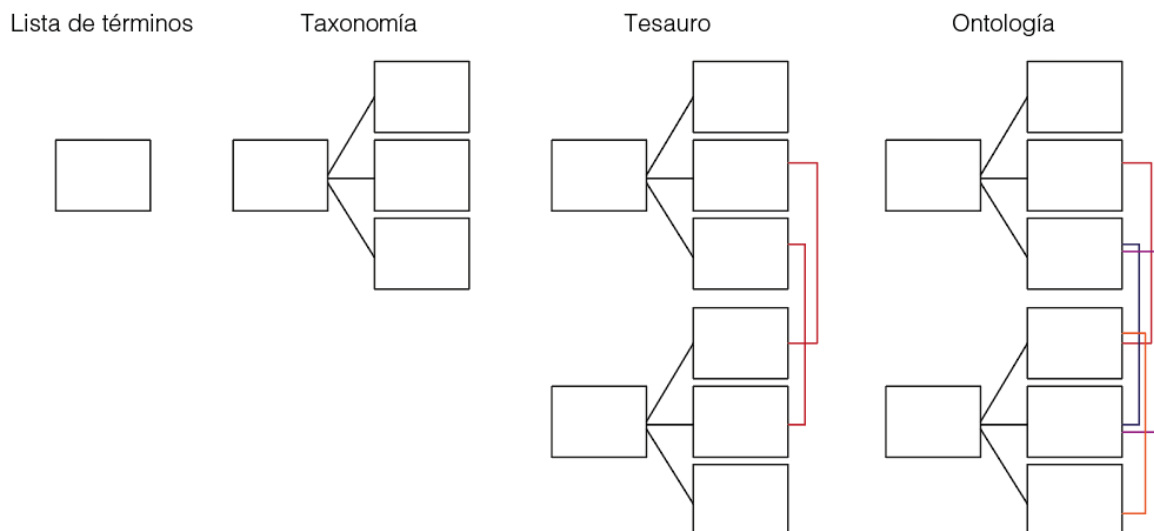


Figura 5.4: Esquema de diferencias entre estructuras y relaciones (elaboración propia).

Tabla 5.1: comparación entre estructuras y relaciones (elaboración propia).

Herramienta	Aporte al patrimonio arquitectónico	Limitación en contexto patrimonial
Taxonomías	Jerarquizan estilos (ej: <i>Neoclásico</i> → <i>Neocolonial</i>)	Rigidez para vincular técnicas y contextos
Tesauros	Unifican términos (ej: " <i>calicanto</i> " = " <i>mampostería mixta</i> ")	Relaciones básicas (jerarquía/asociación)
Ontologías	Modelan " <i>El uso de cantera rosa en fachadas barrocas mexicanas depende de condiciones geológicas del altiplano</i> " (relaciones multicapa)	Complejidad técnica de implementación

5.6. La web semántica y la Inteligencia Artificial: sinergias en la gestión del patrimonio arquitectónico

Los conceptos estudiados anteriormente constituyen las referencias primarias para comprender y utilizar ontologías en el ámbito de la web semántica y la Inteligencia Artificial. La web semántica combinada con la IA constituye un binomio transformador para la gestión del conocimiento patrimonial. Mientras la web semántica estructura datos mediante estándares como RDF y OWL, la IA aprovecha estas representaciones para automatizar procesos complejos, desde el análisis de nubes de puntos hasta la toma de decisiones en conservación (Berners-Lee et al., 2023).

La web semántica proporciona un marco para dotar de significado a los datos mediante ontologías, permitiendo que los ordenadores "entiendan" relaciones entre entidades (ejemplo: vincular un estilo arquitectónico con sus materiales históricos). Este enfoque ha sido esencial para desarrollar sistemas de IA en ámbitos como:

- **Procesamiento del lenguaje natural (PLN):** entrenar modelos para extraer términos técnicos de informes de restauración, usando tesauros patrimoniales como el *Getty AAT*.
- **Búsqueda inteligente:** motores como Semantic Scholar utilizan grafos semánticos para conectar investigaciones sobre técnicas constructivas vernáculas con estudios de vulnerabilidad sísmica.
- **Automatización del conocimiento:** plataformas como Arches Heritage integran ontologías (CIDOC-CRM) con redes neuronales para predecir patrones de deterioro en edificios históricos.
- **Visualización enriquecida:** la aplicación de ontologías combinado con PCD, CAD, BIM y GIS enriquece la visualización de los modelos digitales del patrimonio arquitectónico, la diversidad de clases y relaciones facilita la aplicación de filtros de visualización más precisos.

5.7. Integración de ontologías y modelos de IA en el análisis de geometrías digitales

La combinación de datos geométricos como los generados con PCD, CAD, HBIM y GIS (2D-3D) permiten ser relacionados a partir de ontologías semánticas posibilitando, por ejemplo:

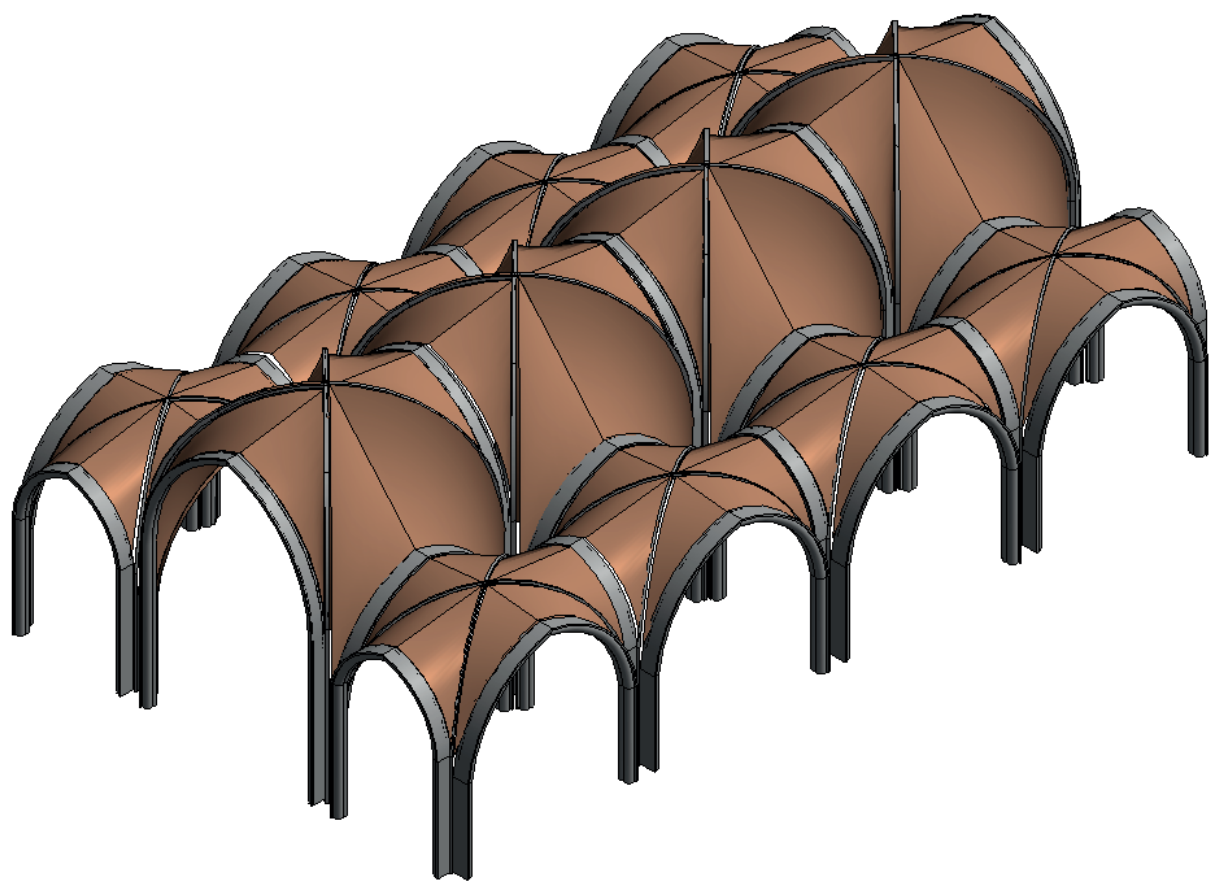
- **Interoperabilidad de datos:** uso de RDF para unificar modelos 3D, registros estratigráficos y normativas legales en repositorios.
- **Reconocimiento de patrones:** redes neuronales entrenadas con ontologías de materiales (ejemplo: *MONDIS*) identifican grietas en escaneos láser y las correlacionan con factores ambientales.
- **Clasificación automática:** algoritmos de *machine learning* segmentan nubes de puntos en elementos arquitectónicos (arcos, bóvedas) usando taxonomías basadas en OWL.

Un ejemplo aplicado puede ser un modelo HBIM con IA que pueda identificar automáticamente tipologías arquitectónicas góticas a partir de un escaneo 3D, cruzando datos con ontologías temporales (OWL-Time) para determinar las fases constructivas del edificio.

Referencias del Capítulo 5

- Acierno, M., Cursi, S., Simeone, D., & Fiorani, D. (2017). Architectural heritage knowledge modelling: An ontology-based framework for conservation process. *Journal of Cultural Heritage*, 24, 124-133.
- Berners-Lee, T., Hendler, J.A., & Lassila, O. (2023). The Semantic Web: A New Form of Web Content that is Meaningful to Computers will Unleash a Revolution of New Possibilities. Linking the World's Information.
- Blaško, M., Cacciotti, R., Křemen, P., & Kouba, Z. (2012). Monument Damage Ontology. En M. Ioannides, D. Fritsch, J. Leissner, R. Davies, F. Remondino & R. Caffo (Eds.), *Progress in Cultural Heritage Preservation. EuroMed 2012* (Vol. 7616, pp. 179-187). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-34234-9_22
- Castillo Tejero, N., & Flores García, L. (2017). *Diccionario de términos básicos para catalogar e inventariar las colecciones arqueológicas de México*. Instituto Nacional de Antropología e Historia.
- Currás, E. (2005). *Ontologías, taxonomía y tesauros* (3ra ed.). Trea.
- Getty Research Institute. (s.f.). *Art & Architecture Thesaurus® Online*. Recuperado el 31 de marzo de 2025, de <https://www.getty.edu/research/tools/vocabularies/aat/>
- ICOMOS. (s.f.). *Glosario ilustrado de formas de deterioro de la piedra*. Recuperado el 31 de marzo de 2025, de https://openarchive.icomos.org/2089/1/spanish_glossary.pdf
- ICOMOS. (s.f.). *Glosario*. Recuperado el 31 de marzo de 2025, de <https://www.icomos.org/en/2016-11-10-13-53-13/icomos-and-the-world-heritage-convention-4>
- INPC Ecuador. (2010). *Glosario de Arquitectura*. Instituto Nacional de Patrimonio Cultural. Recuperado de <https://www.patrimoniocultural.gob.ec/glosario-de-arquitectura/>
- Maniez, J. (1993). *Los lenguajes documentales y de clasificación: Concepción, construcción y utilización en los sistemas documentales*. Fundación Germán Sánchez Ruipérez.
- Oficina del Historiador de la Ciudad de La Habana. (1998). *Glosario de Términos Urbanísticos del Plan Maestro*. Recuperado el 31 de marzo de 2025, de <http://www.planmaestro.ohc.cu/index.php/instrumentos/glosario>
- UNESCO. (1974). *Nomenclatura Internacional Normalizada para los Campos de Ciencia y Tecnología*. París: Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura.
- Urbano, C. (2024). Unisist (1971): La posibilidad de establecer un sistema mundial de información científica vista en clave de regreso al futuro y a la política. *Anuario ThinkEPI*, 18, e18e23. <https://doi.org/10.3145/thinkepi.2024.e18a23>
- Zalamea Patino, O.P., Van Orshoven, J., & Steenberghen, T. (2018). Merging and expanding existing ontologies to cover the Built Cultural Heritage domain. *Journal of Cultural Heritage Management and Sustainable Development*, 8(2), 162-178. <https://doi.org/10.1108/JCHMSD-05-2017-0028>

Capítulo 6. Metodología para la gestión y documentación del patrimonio arquitectónico



Capítulo 6: Metodología para la gestión y documentación del patrimonio arquitectónico

Presentación

Este capítulo presenta una metodología integrada para la gestión, documentación y conservación del patrimonio arquitectónico utilizando herramientas digitales avanzadas. A través de la articulación de diversas escalas, desde el edificio hasta el territorio, se propone un enfoque basado en la generación y gestión de geodatos, el diseño de bases de datos espaciales y la integración de distintas plataformas tecnológicas como CAD, BIM, GIS y PCD. Además, se aborda el uso de tecnologías de escaneo láser y fotogrametría para la captura de datos tridimensionales, con especial atención a la creación y visualización de nubes de puntos. La segmentación y el submuestreo virtual, junto con un proceso riguroso de etiquetado de datos, permiten obtener un conjunto de datos preciso y optimizado, esencial para el análisis y la preservación del patrimonio en el contexto urbano y territorial.

Por último, se explora el uso de ontologías como una estructura que facilita la integración de datos provenientes de diversas fuentes, estableciendo relaciones complejas entre ellos. Esta organización semántica no solo mejora la interoperabilidad entre plataformas, sino que también optimiza la gestión del conocimiento. Asimismo, se analiza la incorporación de inteligencia artificial en el proceso, permitiendo automatizar tareas, detectar patrones y mejorar la precisión en la interpretación y conservación del patrimonio arquitectónico.

6.1 Articulación de escalas: edificio, ciudad y territorio

6.1.1. Diseño y generación de geodatos de bienes inmuebles

La creación y gestión de información geográfica para el patrimonio cultural se basa en el desarrollo de bases de datos geoespaciales integradas en GIS. Estas herramientas son esenciales para documentar, analizar y preservar bienes culturales, y su eficacia depende de dos pilares fundamentales: las Infraestructuras de Datos Espaciales (IDE)¹ y los portales de datos abiertos, que garantizan el acceso a información estandarizada y actualizada.

Nuestro marco de trabajo se centra en los bienes del patrimonio cultural del territorio español. Para estructurar la información, integramos dos capas fundamentales: la localización, mediante un sistema de georreferenciación, y los datos provenientes de las bases de datos del patrimonio cultural español.

6.1.2. Creación de la base de datos espacial

La base de datos espacial es el núcleo de esta metodología, ya que organiza y geolocaliza distintos elementos, como edificios en BIM, información alfanumérica y nubes de puntos. Estos datos estructuran el modelo, permitiendo una gestión eficiente del patrimonio. En este sentido, GIS actúa como un potente gestor de datos espaciales, permitiendo vincular de forma georreferenciada la información digitalizada.

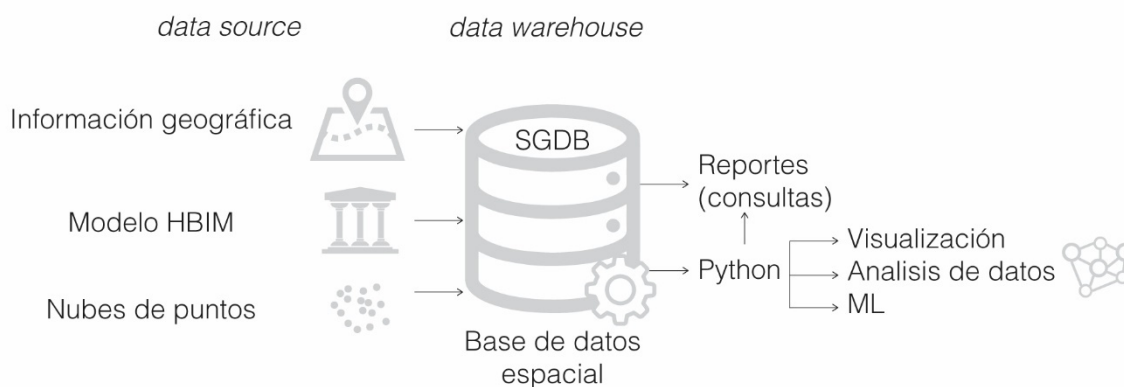


Figura 6.1: Esquema de base de datos espacial (elaboración propia).

El proceso comienza con la recopilación de datos abiertos provenientes de la cartografía oficial del territorio español, disponible en datos.gob.es, así como en repositorios de Comunidades Autónomas y provincias. Estos datos se integran en una base de datos espacial, empleando el sistema geodésico de referencia ETRS89, compatible con WGS84, mediante la descarga de conjuntos de datos oficiales.

¹ Infraestructuras de Datos Espaciales (IDE): facilitan el acceso, intercambio y uso de información geográfica entre diferentes organizaciones y usuarios.

En el caso de los bienes inmuebles del patrimonio español, se diseña un modelo de datos GIS que articula distintas escalas territoriales, almacenando información de Comunidades Autónomas, provincias y municipios. Este modelo permite la gestión y el análisis de la información, además de la incorporación de datos actualizados o generados en tiempo real, incluyendo la vinculación con cartografías históricas. Para este proceso, se emplea el software de código abierto QGIS, que facilita la gestión y visualización de los geodatos patrimoniales.

6.1.2.1. Estructura y componentes

Una base de datos geoespacial es un sistema complejo que integra tres componentes fundamentales para representar, almacenar y explotar información georreferenciada. Su diseño responde a las necesidades específicas de análisis espacial y gestión de datos en ámbitos como la cartografía digital, la planificación urbana o la conservación patrimonial.

El modelo conceptual es la representación lógica de los elementos geográficos y sus relaciones. Define cómo se organizan los datos para reflejar fenómenos espaciales (ríos, edificios, límites administrativos) mediante estructuras jerárquicas o relacionales. Existen dos enfoques predominantes:

- **Modelos relacionales clásicos:** basados en tablas interconectadas, donde cada entidad (ej.: un edificio histórico) se describe mediante atributos (altura, estilo arquitectónico) y se vincula a otras entidades (ej.: su ubicación en un polígono catastral).
- **Modelos NoSQL (no estructurados):** alternativa flexible para gestionar datos heterogéneos o masivos (*Big Data*). Usan estructuras como documentos JSON² o grafos, ideales para integrar información dinámica (ej.: sensores IoT en tiempo real) o formatos no convencionales.

El SGBD³ es el motor que materializa el modelo conceptual, permitiendo almacenar, consultar y modificar datos. La elección de la base de datos adecuada depende de los requerimientos del proyecto, por ejemplo, un SGBD como PostGIS puede ser ideal para análisis espaciales detallados y estructurados, como el inventario de bienes patrimoniales, mientras que MongoDB destaca en aplicaciones con necesidades de respuesta en tiempo real, como la gestión de tráfico y sensores en entornos urbanos protegidos.

Ambas opciones pueden complementarse dentro de un ecosistema de gestión del patrimonio, combinando almacenamiento estructurado con capacidades de procesamiento dinámico. Al cargar los datos geoespaciales en un SGBD, se transforman en información geográfica accionable, lista para ser explotada mediante herramientas

² JSON (*JavaScript Object Notation*): formato ligero de intercambio de datos, estructurado en pares clave-valor y ampliamente usado para almacenamiento y transmisión de información.

³ SGBD: Sistema de gestión de bases de datos.

GIS. Estas plataformas no solo visualizan datos, sino que aplican análisis espacial avanzado.

6.1.2.2. Proceso de generación de geodatos

El proceso de generación de geodatos es una fase clave para la creación de un modelo geoespacial eficiente, que permite la integración, análisis y gestión de información territorial. A continuación, se detallan los pasos fundamentales en este proceso, que van desde la recuperación de datos abiertos hasta la implementación de herramientas avanzadas para su análisis.

- **Recuperación de información:** se inicia con la recuperación de datos abiertos de la cartografía oficial del territorio español, disponibles en datos.gob.es y en los portales de las Comunidades Autónomas y provincias.
- **Creación de la base de datos espacial:** se utiliza la información recuperada como base para la creación de una base de datos espacial, empleando proyecciones del sistema geodésico de referencia ETRS89, compatible con WGS84, a partir de la descarga de conjuntos de datos oficiales.
- **Modelo de datos GIS para bienes inmuebles:** se genera un modelo de datos GIS que articula las escalas territoriales (Comunidades Autónomas, provincias y municipios), permitiendo el almacenamiento, gestión y análisis de la información.
- **Asociación de información:** se asocia información actualizada o generada en tiempo real, así como cartografías históricas, para enriquecer el modelo.
- **Herramientas:** se utiliza QGIS, un software de código abierto, debido a su flexibilidad y capacidad de procesamiento de datos geoespaciales.

6.2 Modelo conceptual de integración entre fichas de catálogo, CAD, BIM, GIS y PCD

El modelo conceptual de GIS se estructura a partir de una base de datos espacial que integra datos territoriales y el Nomenclátor Geográfico de Municipios y Entidades de Población del Instituto Geográfico Nacional (IGN). A partir de esta información, se obtiene el listado de Bienes de Interés Cultural (BIC) de España, extraído de la base de datos de bienes inmuebles del Ministerio de Cultura (Fig. 6.2-6.3). Con estos datos, se geolocalizan los bienes en el modelo y se recuperan los polígonos del parcelario del Catastro.

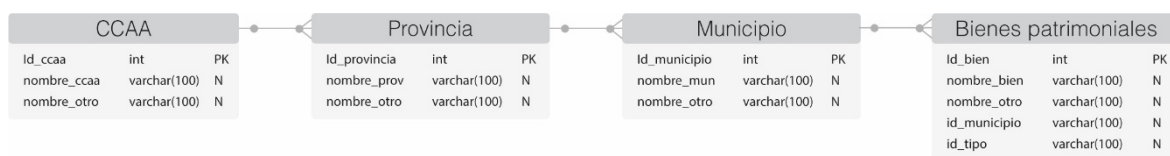


Figura 6.2: Esquema de base de datos GIS (elaboración propia).

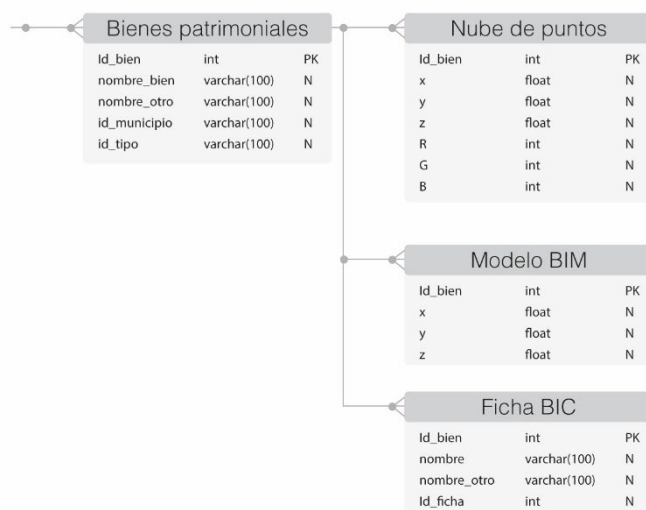


Figura 6.3: Esquema de base de datos vinculación de GIS con BIM, PCD y ficha de datos (elaboración propia).

De esta manera, obtenemos una base cartográfica vectorial que es compatible con GIS y, a su vez, exportable a plataformas BIM y CAD. Además, contamos con nubes de puntos georreferenciadas que facilitan su integración y análisis dentro de GIS.

En esta sección se define el modelo conceptual que permite la vinculación entre distintas fuentes de información y formatos empleados en la gestión del patrimonio arquitectónico. La relación entre fichas de catálogo, representaciones CAD, modelos BIM, datos georreferenciados en GIS y nubes de puntos (PCD) se establece a través de un esquema ontológico que permite la interoperabilidad entre estos sistemas.

En síntesis, el modelo propuesto contempla:

- **Fichas de catálogo:** Base documental que describe los bienes patrimoniales con información histórica, técnica y legal.
- **Modelos CAD:** Representación geométrica de los bienes, que puede ser exportada a BIM o GIS.
- **Modelos BIM:** Contienen información paramétrica y estructural de los bienes, permitiendo la gestión eficiente de la intervención.
- **GIS:** Sistema que integra datos espaciales y permite la visualización y análisis de los bienes patrimoniales en su contexto territorial.
- **Nubes de puntos (PCD):** Datos tridimensionales que facilitan la captura precisa del estado actual de los bienes y su integración con GIS y BIM.

Este modelo de entidad-relación básico facilita la aplicación de un modelo ontológico estableciendo una base común para la interoperabilidad de datos.

6.3 Metodología de recolección de datos: escaneo láser y fotogrametría

La recolección de información mediante un escáner láser se basa en un sistema de medición por pulsos. Esto significa que el escáner emite un único pulso de luz láser y, al determinar la distancia del punto final, calcula el tiempo que tarda la luz en reflejarse en el sensor del escáner, midiendo así el tiempo de vuelo (Faro, 2025).

Este proceso consiste en colocar el escáner en varios puntos dentro del área de interés, asegurando que todas las zonas sean cubiertas y exista una superposición entre las tomas. Para generar nubes de puntos extensas, es fundamental la superposición entre las posiciones del escáner, lo que implica la presencia de puntos redundantes para un correcto registro. Cada escaneo captura una representación detallada del entorno, es decir, los puntos del espacio que el escáner puede percibir. Estos puntos se registran y alinean posteriormente para crear un modelo 3D unificado.

Existen otros métodos para minimizar la superposición de puntos. Uno de ellos es el uso de una red de puntos de referencia (*targets* o dianas de control), que permite alinear los distintos escaneos con mayor precisión sin necesidad de una superposición excesiva. También pueden utilizarse métodos de escaneo estructurado, en los que se planifican las posiciones del escáner en función de la geometría del objeto y los ángulos óptimos de cobertura, reduciendo la redundancia sin comprometer la calidad del modelo 3D.

En la actualidad, los sensores más utilizados en el escaneo láser terrestre (TLS) son los de tiempo de vuelo (ToF) y los de onda continua modulada en amplitud (AMCW). Ambos determinan la distancia midiendo las propiedades temporales de la luz reflejada, aunque su principio de funcionamiento difiere. Los sensores ToF calculan la distancia midiendo el tiempo transcurrido entre la emisión y la recepción de un pulso láser, mientras que los AMCW emiten un haz láser continuo cuya intensidad varía periódicamente y calculan la distancia analizando el desfase entre la señal emitida y la reflejada. Esta modulación codifica la información de profundidad, lo que permite alcanzar una mayor resolución en distancias cortas y medias. Sin embargo, su precisión disminuye con la distancia debido a la atenuación de la señal modulada (Liu et al. 2023).

Por otro lado, existen tecnologías como los sensores de onda continua modulada en frecuencia (FMCW) y la tomografía de coherencia óptica (OCT), que transforman las propiedades del campo óptico recibido (amplitud y fase) en intensidad, aprovechando ambos parámetros para calcular la distancia. Independientemente del método empleado, los datos capturados por un TLS incluyen coordenadas tridimensionales (X, Y, Z), intensidad de la señal reflejada, ángulos de medición (α y θ) y distancia radial (ρ).

La fotogrametría consiste en capturar una serie de fotografías superpuestas utilizando cámaras de alta resolución. Estas imágenes se procesan mediante software especializado que identifica puntos comunes entre las fotos y usa la triangulación para reconstruir la geometría 3D. El resultado también es una nube de puntos, que puede ser refinada para mejorar la precisión. La fotogrametría se utiliza principalmente en áreas donde el escaneo

láser puede ser menos efectivo o difícil de aplicar, como en la captura de texturas o en objetos a pequeña escala.

Por fin, la nube de puntos final generada a partir de cualquiera de estos dos métodos puede ser procesada, depurada e integrada en software para su análisis, modelado o uso en aplicaciones arquitectónicas y de conservación del patrimonio.

6.3.1. Generación de la nube de puntos

El proceso de generación de una nube de puntos a partir de un escaneo láser terrestre sigue una serie de pasos estructurados que permiten obtener un modelo tridimensional preciso del entorno.

1. Toma de datos: escaneo láser

La captura de datos se realiza mediante un TLS, que emite pulsos láser y mide el tiempo que tardan en reflejarse en las superficies del entorno para calcular distancias con alta precisión.

- **Selección del escáner:** según el proyecto, se elige el tipo de escáner más adecuado:
- **Planificación de estaciones de escaneo:** se definen los puntos de escaneo para asegurar la cobertura total del área, garantizando una superposición suficiente entre los escaneos.
- **Captura de datos:** se colocan los escáneres en las ubicaciones predefinidas y se inician las mediciones. Cada escaneo puede capturar millones de puntos en pocos minutos.
- **Georreferenciación:** si el proyecto requiere precisión geoespacial, se utilizan puntos de control obtenidos con GPS diferencial (DGPS) o estación total para ubicar la nube de puntos en un sistema de coordenadas global.

2. Registro de la nube de puntos

Dado que un solo escaneo no cubre toda la escena, se deben fusionar múltiples escaneos en un solo conjunto de datos mediante técnicas de registro:

- **Registro basado en objetivos (*Targets*):** se colocan esferas o tableros de referencia en el entorno para que el software alinee los distintos escaneos con precisión.
- **Registro sin objetivos (*Cloud-to-Cloud*):** se alinean los escaneos basándose en la superposición de datos comunes mediante algoritmos de ajuste iterativo (ICP – *Iterative Closest Point*).

3. Procesado y limpieza de la nube de puntos

Una vez registrados los escaneos, la nube de puntos se somete a un proceso de optimización:

- **Eliminación de ruido:** se filtran puntos erróneos generados por reflejos, interferencias o escaneos inexactos.
- **Reducción de densidad:** en algunos casos, se realiza un muestreo para optimizar el tamaño de la nube sin comprometer la precisión.
- **Corrección de artefactos:** se eliminan objetos temporales no deseados, como personas o elementos en movimiento durante el escaneo.

En los casos de modelos de gran tamaño, de manera opcional, se podría incluir una segmentación durante este proceso para optimizar su manejo y análisis.

4. Generación del modelo final

La nube de puntos procesada se almacena en formatos compatibles con distintos softwares de modelado y análisis (LAS, E57, PLY, XYZ). Esta nube puede utilizarse para:

- **Modelado BIM:** convertir la nube de puntos en modelos paramétricos para restauración y conservación del patrimonio.
- **GIS:** integrar la nube con mapas georreferenciados para estudios urbanos y territoriales.
- **Modelado 3D y CAD:** generar mallas y superficies para documentación arquitectónica y reconstrucción digital.

Este flujo de trabajo garantiza que la nube de puntos obtenida tenga la máxima precisión y sea útil en diferentes aplicaciones de análisis y modelado.

5. Georreferenciación de nubes de puntos

1. Definición del sistema de coordenadas

- Se hace la selección de un sistema de referencia geoespacial adecuado (ej. ETRS89, WGS84, UTM).
- Se verifica que la compatibilidad con otras fuentes de datos geoespaciales utilizadas en el proyecto.

2. Captura de datos con escáner láser o fotogrametría

- Se posiciona el escáner en ubicaciones estratégicas para una cobertura óptima.

- Se registra datos de posicionamiento mediante estaciones totales, GNSS/GPS o puntos de control georreferenciados.

3. Identificación de los puntos de control

- Se identifican los puntos de referencia dentro de la nube de puntos.

4. Alineación y transformación de la nube de puntos

- Se aplican algoritmos de ajuste para alinear la nube de puntos con los puntos de referencia.
- Se realizan transformaciones de coordenadas si es necesario para asegurar la coherencia con el sistema de referencia seleccionado.

5. Verificación y validación

- Se comparan las coordenadas de la nube de puntos con los puntos de control para evaluar la precisión.
- Se corrigen posibles desviaciones aplicando ajustes o reprocesamientos.

6. Exportación e integración con otros sistemas

- Se convierte la nube de puntos al formato requerido para su uso en software BIM, GIS o CAD.
- Se hace la integración con modelos digitales del terreno (MDT), mapas topográficos o bases de datos geoespaciales.

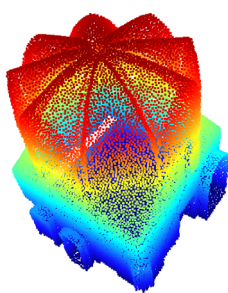
Este proceso busca la compatibilidad de los datos escaneados con otros sistemas geoespaciales, facilitando su relacionadas con la conservación del patrimonio.

6.3.1.1 Visualización de nubes puntos

La visualización de nubes de puntos, que suelen ser archivos pesados, se puede realizar de manera eficiente mediante tres enfoques principales. Primero, CloudCompare, una herramienta de código abierto y gratuita que permite un control detallado sobre la nube de puntos. Con esta opción, es posible segmentar, comparar y filtrar los datos según las necesidades del usuario. Aunque su curva de aprendizaje puede ser empinada, ofrece una gran flexibilidad para el análisis y manipulación de nubes de puntos.

Por otro lado, Autodesk ReCap está diseñado para profesionales, destacándose por su interfaz intuitiva y una integración fluida con el ecosistema Autodesk. Esta opción facilita la edición y limpieza de las nubes de puntos de manera eficiente, aunque requiere una licencia, lo que limita su acceso a aquellos que estén dispuestos a realizar una inversión.

Finalmente, el uso de *scripts* de Python con la librería Open3D permite una gran personalización (Zhou et al., 2018). Al ofrecer flexibilidad total en la visualización, además permite ajustar cada aspecto de la nube de puntos. Sin embargo, su uso requiere experiencia en desarrollo y programación, lo que hace que no sea una opción accesible para todos.



```
1 import open3d as o3d
2 import numpy as np
3 points = np.loadtxt(
4     "nube.txt",
5     dtype=np.float64
6 )[:, :3]
7 pcd = o3d.geometry.PointCloud()
8 pcd.points = o3d.utility.Vector3dVector(points)
9 o3d.visualization.draw_geometries([pcd])
```

Figura 6.4: Código y visualización rápida de nubes de puntos mediante *scripts* en Python (elaboración propia).

6.3.1.2 Segmentación virtual

La segmentación virtual de la nube de puntos es una técnica avanzada que permite dividir los datos de la nube en diferentes áreas o sectores sin perder ni duplicar información. En lugar de eliminar puntos o crear nuevas versiones del conjunto de datos, este proceso se basa en aplicar filtros de visualización que permiten a los usuarios ver solo las partes de la nube de puntos relevantes para cada sector.

Este enfoque se utiliza especialmente en la documentación y análisis de edificios o estructuras complejas, donde se hace necesario diferenciar entre varias zonas, como el interior, la envolvente exterior, las habitaciones o los exteriores del edificio. En lugar de procesar toda la nube de puntos de manera uniforme, la segmentación virtual permite tratar de manera independiente áreas específicas sin comprometer la integridad del conjunto completo de datos.

La segmentación puede realizarse de forma lógica mediante software como CloudCompare, ReCap o herramientas basadas en GIS, que aplican filtros geométricos o espaciales. Esto incluye:

- **Interior:** los datos correspondientes a espacios interiores, como salas, pasillos o habitaciones pueden ser aislados para un análisis más detallado de la estructura interna del edificio.
- **Envolvente:** se segmentan los elementos exteriores del edificio, como fachadas, ventanas y tejados, que forman parte de la envolvente del objeto arquitectónico.

- **Exteriores:** las áreas externas, como terrenos o jardines, se separan de los elementos estructurales del edificio, lo que facilita un análisis detallado de la edificación sin mezclarla con su entorno inmediato.
- **Habitaciones:** al segmentar las habitaciones, es posible realizar un análisis más centrado en los detalles de los espacios, facilitando tareas de documentación y remodelación.

A través de filtros de visualización, los usuarios pueden seleccionar y mostrar únicamente las partes relevantes de la nube de puntos, sin alterar ni duplicar los datos originales. Esto permite mantener la precisión de la información mientras se mejora la eficiencia en la visualización y el análisis. La ventaja de esta técnica es que, a pesar de trabajar con subconjuntos de datos, no se pierde ni se duplica información, ya que el archivo original permanece intacto y accesible en su totalidad en todo momento.

Este enfoque de segmentación virtual es especialmente útil en la documentación de patrimonio arquitectónico, el diseño en BIM y en el análisis de grandes nubes de puntos, donde la agilidad y la precisión son esenciales.

6.3.1.3 Submuestreo virtual

A diferencia del submuestreo tradicional, que reduce la cantidad de puntos en una nube sin perder información crucial, facilitando así el procesamiento y la visualización de grandes volúmenes de datos, el submuestreo virtual es una técnica que permite reducir la cantidad de datos procesados y visualizados sin comprometer la calidad de la información original (Fig. 6.5). Mediante esta metodología, que consulta el conjunto de datos original, se ajusta la densidad y el espaciamiento de los puntos de la nube, lo que facilita la visualización y el análisis de grandes volúmenes de datos. Es importante destacar que, en este proceso, no se eliminan ni duplican datos, ya que solo se manipulan las representaciones visuales de los puntos, manteniendo la integridad de la nube original.

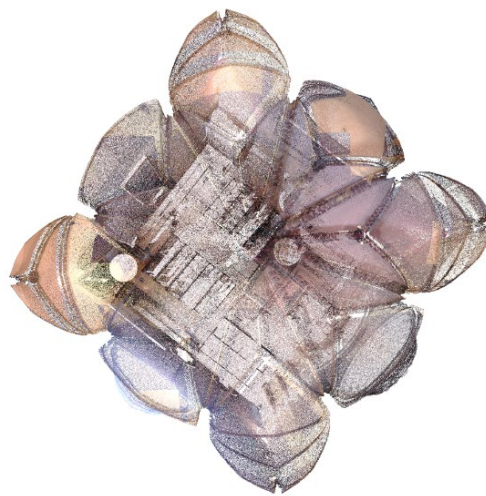


Figura 6.5: Submuestreo de la nube de puntos del interior de la Capilla del Santo Cáliz de la Catedral de Valencia (elaboración propia).

Existen diversos tipos de submuestreo, los cuales se aplican en función de los objetivos del análisis y la calidad requerida para la visualización:

- **Submuestreo por reducción de puntos:** se elimina un porcentaje de puntos en áreas con densidad alta, manteniendo los puntos más representativos para el análisis.
- **Submuestreo por cuadrícula:** los puntos se agrupan en celdas de cuadrícula y se selecciona un solo punto por celda, lo que permite reducir la cantidad de datos sin perder información relevante.
- **LOD (*Level of Detail*):** este concepto es fundamental en el submuestreo, ya que permite definir distintos niveles de detalle en función de la distancia o el interés en una región específica de la nube de puntos. En áreas cercanas o críticas, se puede mantener una alta densidad de puntos, mientras que en zonas más distantes o menos relevantes se puede reducir la densidad, mejorando la eficiencia del proceso sin sacrificar la precisión donde más importa.
- **Densidad de puntos:** la densidad de puntos se refiere a la cantidad de puntos por unidad de área en la nube. A través del submuestreo, se puede ajustar esta densidad según las necesidades del análisis o de la visualización. En áreas con muchos detalles, se puede aumentar la densidad para preservar la información, mientras que en áreas más simples se puede reducir la cantidad de puntos, facilitando el procesamiento.
- **Espaciamiento de puntos:** el espaciamiento entre puntos determina la resolución espacial de la nube de puntos. Un espaciamiento menor implica una mayor cantidad de puntos y, por ende, una representación más precisa de la superficie. El submuestreo permite ajustar el espaciamiento de manera que se logre un equilibrio entre precisión y eficiencia, según las necesidades del proyecto (Fig. 6.6).

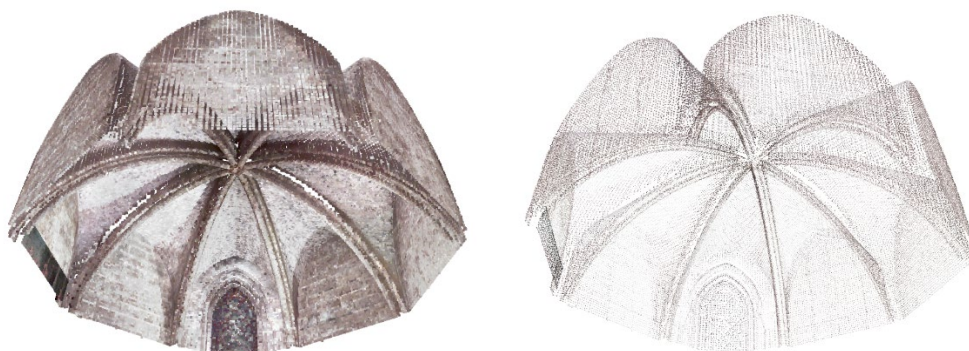


Figura 6.6: Submuestreo por espaciamiento de puntos de la nube de la bóveda interior de la Sacristía de la Catedral de Valencia (elaboración propia).

El submuestreo virtual, realizado mediante filtros de visualización, no altera ni elimina la información original de la nube de puntos. Los filtros actúan sobre la representación visual, permitiendo mostrar solo los puntos seleccionados según el nivel de detalle y densidad

definidos. Esto permite realizar análisis eficientes en grandes volúmenes de datos, sin la necesidad de modificar o duplicar el conjunto completo de información.



Figura 6.7: Submuestreo de la nube de puntos del interior de la Capilla del Santo Cáliz de la Catedral de Valencia (elaboración propia).

Esta técnica es especialmente útil en la visualización de nubes de puntos de grandes edificaciones o sitios patrimoniales, donde la precisión es importante, pero la eficiencia en el procesamiento de datos también es esencial.

6.4 Estructura de conjunto de datos: integración de datos y etiquetado en la nube de puntos

La estructuración de un conjunto de datos de nubes de puntos es un proceso crucial en la gestión y análisis de información tridimensional proveniente de técnicas como el escaneo láser 3D. Esta estructura organiza los datos para su uso eficiente y precisa integración con otros sistemas, como BIM, GIS, y plataformas de análisis. Además, el etiquetado es esencial para clasificar y organizar la nube de puntos de manera que permita su análisis detallado.

1. Estructura del Conjunto de Datos de la Nube de Puntos

Un conjunto de datos de nube de puntos típicamente se compone de varios componentes clave que se organizan de la siguiente manera:

- **Coordenadas espaciales (X, Y, Z):** estas son las posiciones tridimensionales de cada punto en el espacio. Se almacenan en un formato estructurado, como un archivo CSV, LAS, PLY, o LAZ, que permite el almacenamiento y la posterior manipulación de la nube de puntos.
- **Propiedades adicionales (R, G, B⁴):** en algunas nubes de puntos, además de las coordenadas, se incluyen propiedades adicionales, como los valores de color o intensidad, que proporcionan más contexto visual y de características para la nube de puntos.

⁴ RGB: acrónimo en inglés de Rojo, Verde y Azul.

- **Atributos relacionados con la calidad de los datos:** atributos como la densidad, la intensidad del escaneo o la fiabilidad de los puntos también pueden ser registrados en la estructura de datos. Esto permite realizar un análisis de la calidad de los datos a lo largo del proceso.
- **Información sobre la localización y proyección:** se incluye información sobre el sistema de referencia espacial y la proyección geodésica, fundamental para integrar los datos con GIS o BIM.

Tabla 6.1: Estructura de datos básica de una nube de puntos (elaboración propia).

1	X	Y	Z	R	G	B
2	1.234	2.456	3.678	0.8	0.1	0.2
3	4.567	5.678	6.789	0.2	0.7	0.3
4	7.890	8.901	9.012	0.1	0.3	0.9
5	10.123	11.234	12.345	0.6	0.5	0.4
6	13.456	14.567	15.678	0.9	0.8	0.1

2. Integración de datos en la nube de puntos

La integración de los datos de la nube de puntos se realiza con el fin de combinar y fusionar datos provenientes de diferentes fuentes y formatos en una única estructura coherente. Este proceso incluye:

- **Fusión de datos provenientes de distintas fuentes:** la nube de puntos puede provenir de varios escaneos o sensores. Para integrar estos datos, se realiza un proceso de alineación (registro) y fusión, donde los puntos se alinean en un sistema común de coordenadas para generar una nube de puntos unificada.
- **Vinculación con otras bases de datos:** para crear un modelo más completo del entorno, los datos de las nubes de puntos pueden combinarse con otros datos geoespaciales, como modelos BIM, planos 2D, mapas topográficos o incluso imágenes aéreas. Esto proporciona un contexto adicional para la visualización y el análisis del entorno.
- **Georreferenciación:** para facilitar la integración con plataformas GIS, la nube de puntos debe georreferenciarse utilizando sistemas de coordenadas geográficas estándar, como WGS84 o ETRS89. Este paso es crucial cuando los datos de la nube de puntos deben integrarse en un sistema geoespacial o usarse para análisis de ubicación.

Tabla 6.2: Estructura básica de datos de una nube de puntos con columna de clasificación (elaboración propia).

1	X	Y	Z	R	G	B	Dato
2	1.234	2.456	3.678	0.8	0.1	0.2	Muro1
3	4.567	5.678	6.789	0.2	0.7	0.3	Muro2
4	7.890	8.901	9.012	0.1	0.3	0.9	Muro3
5	10.123	11.234	12.345	0.6	0.5	0.4	Muro4
6	13.456	14.567	15.678	0.9	0.8	0.1	Pavimento

3. Etiquetado de la Nube de Puntos

El etiquetado de la nube de puntos es una parte fundamental para organizar y categorizar la información contenida en la nube. A través del etiquetado, los puntos se asignan a diferentes clases, lo que permite segmentar y analizar de forma más eficaz los datos. Algunas de las prácticas comunes de etiquetado incluyen:

- **Clasificación automática o manual de puntos:** dependiendo del software y la metodología empleada, los puntos pueden clasificarse en diversas categorías, tales como: suelo, paredes, techos, ventanas, puertas, objetos móviles, entre otros. Esto permite distinguir entre diferentes elementos de la escena 3D.
- **Etiquetado semántico:** a través de técnicas de inteligencia artificial y *machine learning*, se pueden aplicar etiquetas semánticas a la nube de puntos, permitiendo identificar automáticamente los diferentes elementos arquitectónicos (Fig. 6.8).

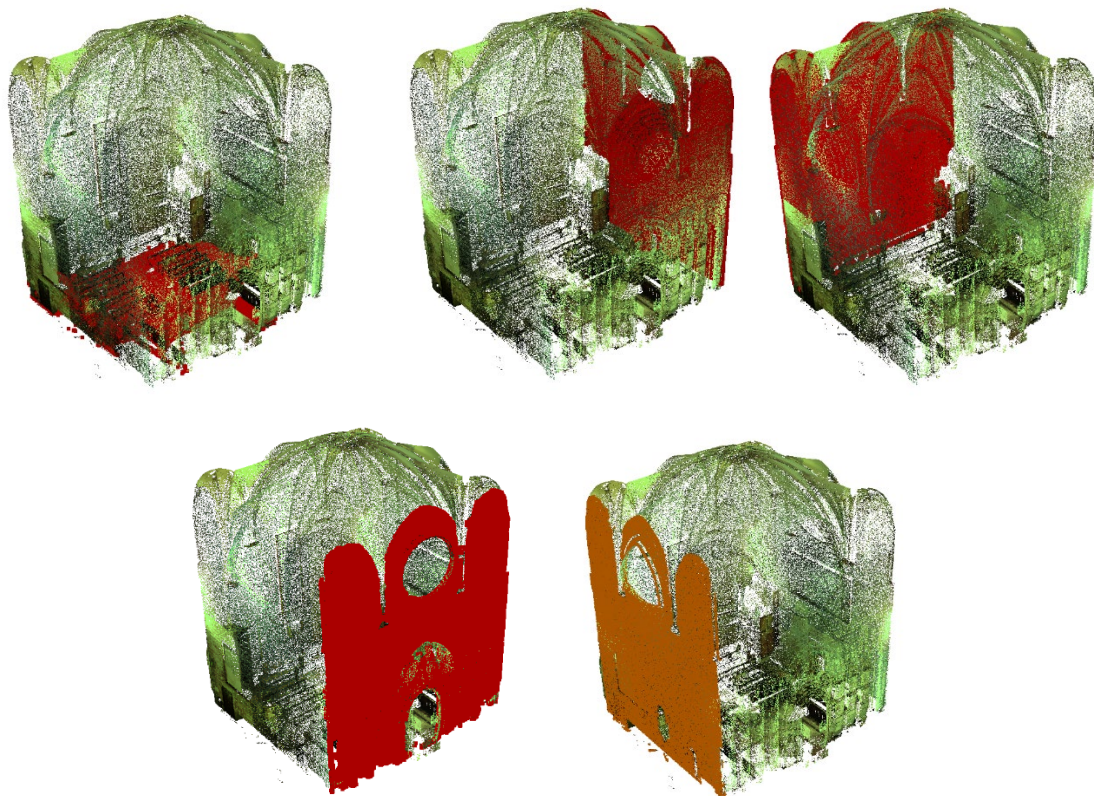


Figura 6.8: Clasificación mediante técnicas de ML para un etiquetado semántico de la nube de puntos del interior de la Capilla del Santo Cáliz de la Catedral de Valencia (elaboración propia).

- **Segmentación por zonas:** los puntos de la nube de puntos también se pueden etiquetar y organizar según su ubicación dentro de un área específica, como el interior de un edificio, la envolvente exterior o los exteriores del terreno. Esto facilita el análisis por sectores y mejora la organización de la información.

4. Beneficios de la Integración y Etiquetado

- **Mejora del análisis:** el etiquetado y la integración de datos permiten realizar análisis más detallados y específicos, como la detección de elementos estructurales, la inspección de áreas específicas del patrimonio o la creación de modelos 3D de alta precisión.
- **Optimización de la visualización:** al segmentar y etiquetar los datos, es posible visualizar solo los elementos relevantes según el objetivo del proyecto, lo que facilita la interpretación de los datos y mejora la experiencia de usuario.
- **Interoperabilidad:** la correcta integración y etiquetado de la nube de puntos facilitan la interoperabilidad entre diferentes plataformas y aplicaciones, como GIS, BIM, CAD y software de modelado, permitiendo una mejor colaboración y flujo de trabajo en proyectos multidisciplinarios.

La estructuración, integración y etiquetado de los datos de la nube de puntos son pasos fundamentales para convertir estos datos en información útil para la toma de decisiones en proyectos de documentación, preservación y análisis del patrimonio, así como para la creación de modelos 3D detallados.

6.5. Inteligencia artificial y ontologías en la gestión del patrimonio arquitectónico

La integración de la inteligencia artificial y las ontologías en la gestión del patrimonio arquitectónico representa un avance significativo en la organización, análisis y preservación de los bienes culturales. Las ontologías son clave para estructurar y vincular la información de manera organizada y multilingüe. Esto permite recuperar datos de las bases de datos de los repositorios digitales del patrimonio cultural para su relación, descripción y análisis, vinculándolos, por ejemplo, con las geometrías de un gemelo digital. Estas estructuras de datos facilitan la interoperabilidad entre diferentes medios digitales, promoviendo la recuperación y transferencia de información entre plataformas como BIM y GIS, así como con bases de datos patrimoniales y otros sistemas digitales.

Mediante técnicas de IA, es posible optimizar la clasificación y segmentación de datos patrimoniales, así como identificar patrones en los datos, lo que puede mejorar la eficiencia en la digitalización de edificaciones históricas. Algoritmos de aprendizaje automático pueden analizar imágenes y modelos tridimensionales para reconocer tipologías constructivas, asociarlas a períodos históricos específicos y sugerir estrategias de conservación basadas en datos comparativos.

Además, la IA aplicada al procesamiento de lenguaje natural permite extraer y organizar información de documentos históricos, planos antiguos y registros administrativos, integrándolos en modelos de conocimiento estructurados mediante ontologías. Esto facilita la creación de sistemas de consulta avanzados, donde especialistas pueden acceder a datos interconectados de manera intuitiva y precisa.

Las ontologías, al actuar como un puente semántico entre diferentes fuentes de datos, garantizan que la información patrimonial pueda ser interpretada y reutilizada de manera coherente en distintos contextos. Gracias a ellas, es posible conectar datos heterogéneos y multilingües, asegurando que el conocimiento sobre el patrimonio arquitectónico sea accesible en diferentes regiones y comunidades de investigación.

La combinación de IA y ontologías no solo mejora la gestión del patrimonio arquitectónico, sino que también abre nuevas posibilidades para su difusión y accesibilidad. Aplicaciones interactivas basadas en realidad aumentada y virtual pueden aprovechar esta estructura de datos para ofrecer experiencias inmersivas, permitiendo a investigadores y ciudadanos explorar edificaciones patrimoniales con un nivel de detalle sin precedentes.

En este contexto, la digitalización del patrimonio no se limita a la captura de su geometría, sino que se convierte en un proceso integral de documentación, análisis y gestión, en el que la IA y las ontologías desempeñan un papel clave en la preservación y valorización del legado arquitectónico.

6.5.1. Diseño de las relaciones ontológicas

El diseño de una ontología para edificios patrimoniales debe estructurar de manera formal las relaciones entre los distintos elementos que conforman el patrimonio arquitectónico, garantizando la interoperabilidad entre plataformas digitales como BIM, GIS y bases de datos patrimoniales. Este modelo conceptual permite organizar, vincular y analizar la información de manera semántica, asegurando su accesibilidad y reutilización en distintos contextos (Niknam & Karshenas, 2017; Zalamea Patiño, Van Orshoven & Steenberghen, 2018).

1. Estructura ontológica y entidades principales

Para representar un edificio patrimonial dentro de una ontología, se deben definir las entidades fundamentales y sus relaciones. Estas pueden agruparse en varias categorías clave:

- **Edificio patrimonial:** entidad central que representa la construcción documentada. Se asocia a información sobre su ubicación, época de construcción, estilo arquitectónico y estado de conservación.
- **Elementos constructivos:** incluye componentes físicos como muros, cubiertas, columnas, bóvedas y ornamentación. Cada elemento se describe con atributos como material, técnica constructiva y modificaciones a lo largo del tiempo.
- **Estado de conservación:** registra datos sobre el deterioro, intervenciones pasadas y estrategias de restauración. Se vincula con metodologías de conservación, estudios de daños y registros fotográficos o escaneos tridimensionales (Acierno et al., 2017).

- **Información documental:** conjunto de fuentes históricas, planos, informes técnicos y publicaciones científicas que aportan contexto al edificio. Se conecta a bases de datos y archivos digitales.
- **Usuarios y agentes:** relaciona entidades como investigadores, arquitectos, restauradores y administraciones públicas que interactúan con el edificio y gestionan su documentación.
- **Datos geoespaciales:** incluye la relación del edificio con su entorno urbano y territorial, utilizando modelos GIS que permiten análisis espaciales, como proximidad a otros bienes patrimoniales o riesgos ambientales.

Al tratarse de estructuras complejas, se muestra cómo la generación de una ontología genera vínculos que enriquecen los datos (Fig. 6.9).

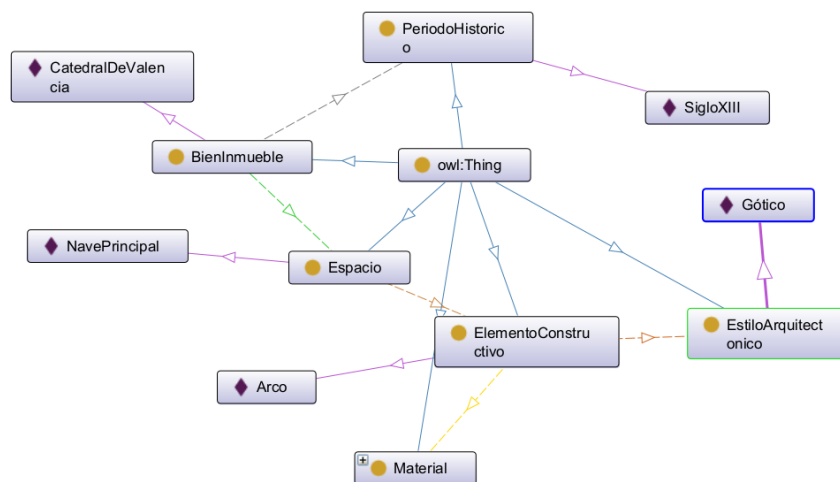


Figura 6.9: Ontología básica generada con IA y Protégé⁵ (elaboración propia).

2. Relaciones ontológicas

Las relaciones entre estas entidades definen la estructura de la ontología y permiten la integración con otras bases de datos y plataformas. Algunas relaciones fundamentales son:

- **Ubicación geoespacial** (*se encuentra en* → Municipio/Parcela Catastral)
- **Tipología arquitectónica** (*pertenece a* → Estilo Arquitectónico)
- **Materialidad** (*compuesto por* → Materiales de Construcción)

⁵ Protégé es una herramienta de software para crear y utilizar ontologías, desarrollada por el Centro de Informática Biomédica de la Universidad de Stanford.

- **Intervenciones** (*ha sido restaurado por* → Proyecto de Conservación)
- **Documentación asociada** (*referenciado en* → Archivo/Plano/Informe)
- **Relación con el entorno** (*vinculado con* → Otros Bienes Patrimoniales/Ciudad/Territorio)

3. Interoperabilidad con BIM y GIS

La ontología debe permitir la integración con modelos BIM y GIS para gestionar la información patrimonial:

- **En BIM**, la ontología estructura la relación entre los elementos constructivos del edificio y sus metadatos (materiales, alteraciones, análisis estructural).
- **En GIS**, permite georreferenciar los edificios y establecer relaciones espaciales con su entorno, facilitando estudios de impacto urbano, accesibilidad y conservación.

4. Implementación y aplicaciones

El uso de estándares como OWL⁶ y LOD facilita la interoperabilidad con otras bases de datos y plataformas digitales. Esto permite:

- **Consultas semánticas** para la recuperación eficiente de información.
- **Análisis automatizados** con IA para detección de patrones y evaluación del estado de conservación.
- **Integración con herramientas de visualización 3D**, como entornos de realidad aumentada y virtual.

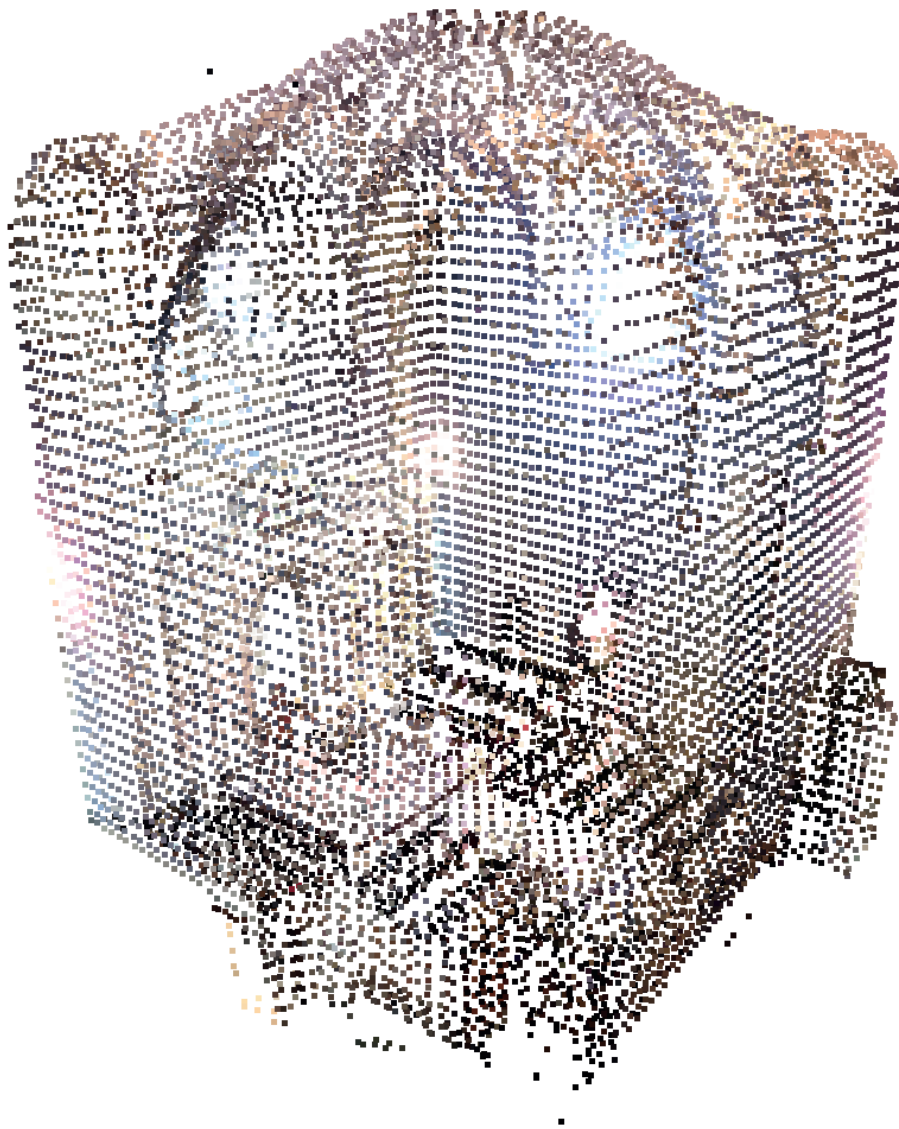
El diseño de relaciones ontológicas aplicado al patrimonio arquitectónico puede permitir un modelo estructurado y confiable para gestionar el bien, facilitando la integración de datos, el análisis y la conservación.

⁶ OWL (*Web Ontology Language*) es un lenguaje formal desarrollado por el *World Wide Web Consortium* (W3C) para representar ontologías en la web.

Referencias del Capítulo 6

- Acierno, M., Cursi, S., Simeone, D., & Fiorani, D. (2017). Architectural heritage knowledge modelling: An ontology-based framework for conservation process. *Journal of Cultural Heritage*, 24, 124-133. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2016.09.010>
- Ferreira Lopes, P., Moya Muñoz, J., & Fondevilla Aparicia, J.J, Modelos SIG. (2021). Prospección de la producción científica sobre modelos digitales SIG aplicados al patrimonio. In *Modelos digitales de información en la tutela sostenible del patrimonio cultural. Contribución al conocimiento e innovación social*, Seville: Editorial de la Universidad de Sevilla. Colección Arquitectura 44. p. 122-128. 978-84-472-3063-1.
- Ferreira-Lopes, P. & Pinto Puerto, F. S. (2017). Creación de un modelo de información relacional de la red tardogótica. Avances, problemáticas y soluciones. Obra Congrua. Estudios sobre la construcción gótica peninsular y europea Ed. Instituto Juan Herrera, Madrid, 2017, pp. 365-377. ISBN: 978-84-9728-565-0.
- Ferreira-Lopes, P., Pinto Puerto, F. S., Jiménez Mavillar, A. & Suarez, J. L. (2016). Aplicación de nuevos modelos digitales para el conocimiento del patrimonio tardogótico en Andalucía. Avances, problemáticas y soluciones. Rehabend 2016. Euro-American Congress. Construction pathology, rehabilitation technology and heritage management: (6th Rehabend Congress). Burgos (Spain), May 24th-27th, 2016 / coord. por L. Villegas, 2016, ISBN 978-84-608-7941-1, págs. 178-185.
- Musen, M. A. (2015). The Protégé project: A look back and a look forward. *AI Matters*, 1(4), 4-12. <https://doi.org/10.1145/2557001.25757003>
- Niknam, M., & Karshenas, S. (2017). A shared ontology approach to semantic representation of BIM data. *Automation in Construction*, 80, 22-36. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2017.03.013>
- Zalamea Patiño, Van Orshoven y Steenberghen (2018) exploran la fusión y expansión de ontologías existentes para abarcar el dominio del patrimonio cultural construido.
- Zhou, Q.-Y., Park, J., & Koltun, V. (2018). Open3D: A modern library for 3D data processing. *arXiv*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1801.09847>

Capítulo 7. Implementación metodológica



Capítulo 7: Implementación metodológica

Presentación

Este capítulo presenta el proceso de adquisición, procesamiento y modelado de datos para la documentación de la Catedral Metropolitana de Valencia, un caso de estudio que ejemplifica la aplicación de metodologías avanzadas en la conservación del patrimonio arquitectónico. Se describen las estrategias empleadas para la integración de nubes de puntos en entornos CAD y BIM, destacando la importancia de estos modelos para la gestión y análisis del edificio.

En primer lugar, se aborda el modelado manual BIM de la Catedral, detallando el flujo de trabajo desde la importación y georreferenciación de la nube de puntos optimizada en Revit hasta la generación de elementos arquitectónicos mediante modelos genéricos y formas complejas. A continuación, se presentan las metodologías *Scan-to-CAD* y *Scan-to-HBIM*, aplicadas a la planta de la Catedral y a la Sacristía, respectivamente, explorando su utilidad para el levantamiento y documentación digital del edificio.

Además, se introduce una experimentación con nubes de puntos enfocada en la detección automática de afecciones patológicas en la Capilla del Santo Cáliz, lo que demuestra el potencial de estas tecnologías para el análisis del estado de conservación del patrimonio. Finalmente, se desarrolla la generación de fichas a partir del modelo HBIM, resaltando su papel en la estructuración y visualización de la información almacenada en bases de datos, facilitando así la gestión y mantenimiento del edificio.

A través de este capítulo, se evidencia cómo la combinación de tecnologías digitales, modelado BIM y análisis de nubes de puntos puede optimizar los procesos de documentación y conservación del patrimonio arquitectónico, asegurando su preservación para las futuras generaciones.

7.1. Caso de estudio

La metodología propuesta es amplia y adaptable a diversas escalas y niveles de detalle, por lo que se aplicará siguiendo como referencia el enfoque del Plan Nacional de Catedrales, así como la estructura básica de los Planes Directores. El objetivo es demostrar su aplicabilidad en diferentes escalas de un edificio de valor patrimonial en la ciudad de Valencia, destacando las metodologías empleadas en cada caso.

La elección de la Catedral Metropolitana de Valencia como caso de estudio responde a la necesidad de aplicar y evaluar la metodología propuesta en un contexto de gran relevancia dentro del patrimonio arquitectónico y cultural. Este edificio presenta una evolución arquitectónica compleja, fruto de transformaciones a lo largo de los siglos que han dado lugar a la superposición de diversos estilos, como el gótico, renacentista y barroco. Su carácter religioso y su función litúrgica lo posicionan como un elemento clave en el tejido urbano e histórico de la ciudad.

Desde una perspectiva metodológica, la selección de este caso permite aplicar tecnologías avanzadas de documentación y modelado digital, como el escaneo 3D y el HBIM, en diferentes niveles de complejidad arquitectónica. Este enfoque no solo es pertinente desde un punto de vista técnico, sino que también se alinea con los criterios establecidos en el Plan Nacional de Catedrales y en los Planes Directores de conservación, facilitando su estudio dentro de un marco de referencia común.

Asimismo, la Catedral de Valencia ofrece un campo de aplicación diverso, que permite evaluar la metodología propuesta en distintas escalas y niveles de intervención. Esto brinda la oportunidad de generar resultados comparables y extrapolables a otros bienes patrimoniales, lo que aumenta la aplicabilidad y la relevancia de los hallazgos obtenidos en este estudio.

7.1.1. La Catedral Metropolitana de Valencia

Este emblemático edificio religioso comenzó su construcción en 1262, tras la conquista cristiana de la ciudad, presentando influencias románicas, como la Puerta Románica o Puerta del Palacio (Beuter, 1551). Su planta es de cruz latina, con tres naves y un deambulatorio, siguiendo el estilo gótico.

En el siglo XIV se edificaron la Sala Capitular (actualmente sede de la reliquia del Santo Cáliz) y el campanario, conocido como El Miguelete. Ambas estructuras fueron incorporadas al conjunto en el siglo XV, junto con la adición denominada *Obra Nova*. En los siglos posteriores, el edificio sufrió diversas transformaciones, como el revestimiento exterior del deambulatorio con una fachada renacentista, y la incorporación de ornamentaciones barrocas en el ábside y la fachada principal en el siglo XVII. Finalmente, en el siglo XVIII, se llevaron a cabo reformas en estilo neoclásico.

Así, la Catedral ha evolucionado a lo largo de los siglos, acumulando arquitecturas de diferentes períodos históricos. Esta complejidad convierte al edificio en una estructura dinámica y en constante transformación, lo que presenta retos en su interpretación como unidad. Sin embargo, también la posiciona como un ejemplo idóneo para experimentar con la automatización de procesos basados en nubes de puntos, facilitando así la documentación y el análisis detallado de su evolución arquitectónica.

Este caso de estudio tiene varios aspectos que justifican su análisis dentro del marco metodológico propuesto. Dichos aspectos corresponden a los siguientes:

- Ubicación en Valencia: el edificio se encuentra en la ciudad de Valencia, lo que permite analizar su evolución en un contexto urbano común y su relación con el tejido histórico de la ciudad.
- Valor histórico y patrimonial: es una edificación de gran importancia dentro del patrimonio arquitectónico valenciano, con alto nivel de protección y reconocimiento dentro de normativas de conservación.
- Carácter religioso: se trata de un edificio religioso con funciones litúrgicas y simbólicas relevantes, lo que implica particularidades constructivas, espaciales y estilísticas.
- Evolución arquitectónica y superposición de estilos: el edificio ha experimentado transformaciones a lo largo de los siglos, reflejando distintas épocas y estilos arquitectónicos, desde el gótico y el renacimiento hasta el barroco.
- Necesidad de conservación y restauración: es un inmueble que requiere intervenciones periódicas para su conservación, lo que permite aplicar metodologías de documentación, análisis y modelado orientadas a su preservación.
- Aplicabilidad de la metodología BIM-HBIM: por su relevancia histórica y complejidad arquitectónica, el edificio es adecuado para la implementación de tecnologías digitales como el escaneo 3D, modelado HBIM y análisis estructural basado en datos.
- Vinculación con el Plan Nacional de Catedrales y planes directores: su estudio puede alinearse con las directrices establecidas para la conservación del patrimonio eclesiástico en España, proporcionando un marco común de intervención y documentación.

7.2. Adquisición de datos de la Catedral de Valencia

La documentación de edificios históricos presenta un desafío significativo en la captura precisa de su geometría. En las últimas décadas, se han adoptado técnicas avanzadas como la fotogrametría y el escaneo láser terrestre (TLS) para abordar este reto (Murphy et al., 2009). Particularmente, el escaneo láser se ha convertido en una herramienta invaluable al proporcionar rápidamente una gran cantidad de datos espaciales. La

adquisición y el análisis de estos datos son cruciales para el estudio detallado de los edificios y la detección temprana de problemas relacionados con el impacto negativo del turismo, los daños estructurales y la pérdida de identidad histórica (Oreni et al., 2013; Brumana et al., 2013). Esta capacidad ha incrementado el uso de nubes de puntos en proyectos que involucran geometrías complejas, facilitando así la captura y el análisis detallado de estructuras históricas.

Los equipos utilizados para la adquisición de datos espaciales de la Catedral de Valencia incluyeron dos escáneres láser: el Faro® Focus Premium S-150 y el Focus Premium S-350, con alcances de 150 y 350 metros, respectivamente. Para espacios más reducidos, como escaleras de caracol, se utilizó el escáner portátil FARO® Freestyle 2. Estos dispositivos ofrecen una precisión 3D con un margen de error de 2 mm en distancias de hasta 10 metros.

El levantamiento incluyó 543 escaneos del edificio de la Catedral, con una resolución general de 1/8 y calidad 4x, obteniendo una separación entre puntos de 12 mm a 10 metros en los interiores. Cada nube de puntos fue registrada utilizando el software Faro® Scene (versión 2023.1), logrando un error promedio de registro de 1,2 mm y abarcando más de 4 mil millones de puntos, con un tamaño total de nube procesada de 220 GB. Durante el proceso, algunas exploraciones fueron eliminadas debido a errores en la captura de datos que generaban imprecisiones.

Una vez procesadas, las nubes de puntos fueron agrupadas y organizadas para generar una nube compuesta mediante la superposición de todos los puntos obtenidos. Además, se georreferenciaron esos puntos utilizando sistemas de posicionamiento global (GPS) en ETRS89, lo que asegura que las coordenadas de cada punto en la nube estén alineadas con un sistema de coordenadas geográficas estándar, permitiendo una representación precisa en correlación con los datos espaciales reales. Posteriormente, se eliminaron los puntos duplicados para evitar redundancias en la información.

La nube de puntos completa de la Catedral fue exportada en dos formatos: E57, ampliamente compatible con diversas herramientas de software y hardware de escaneo 3D, con un tamaño de 104 GB, y RCS (*Realistic Colour Scanning*), con un tamaño de 72,6 GB. Estos volúmenes de datos son considerables, representando miles de millones de puntos, con una distancia entre ellos en muchos casos inferior a 2 mm, lo que implica un exceso de información para fines de análisis y modelado.



Figura 7.1: Nube de puntos de la Catedral de Valencia (elaboración propia).

Para optimizar el manejo de la nube de puntos en distintas plataformas de software y reducir el consumo de recursos computacionales, se realizaron experimentos para ajustar la separación entre puntos. Aumentando esta distancia a 5 mm, el tamaño del archivo se redujo aproximadamente 78,26 veces, lo que equivale a una disminución del 98,72% (Fig. 7.2). Esta reducción fue suficiente para facilitar la manipulación e integración eficiente de los datos en los trabajos en curso.

Adicionalmente, se probaron diferentes separaciones entre puntos, tales como 5, 10, 20, 50 y 100 mm, evidenciando una reducción exponencial tanto en el número de puntos como en el tamaño del archivo. Se determinó que un espaciamiento de 100 mm es óptimo para trabajar a escala de edificio, mientras que una separación de 20 mm es recomendable para el trabajo a escala de habitación, garantizando una mayor precisión en la captura de detalles.



Figura 7.2: Nube de puntos de la Catedral de Valencia con un espaciado de puntos de 5 mm (elaboración propia).

7.3. Modelado manual BIM de la Catedral

7.3.1. Importación de la nube de puntos optimizada

El primer paso fue obtener la nube de puntos de la Catedral, que se generó a partir de un escaneo láser. Para optimizar la nube de puntos, se utilizó Faro Scene y CloudCompare para limpiar el ruido y reducir el número de puntos innecesarios, asegurando que la nube fuese manejable sin perder precisión.

Se importó la nube de puntos optimizada a Revit usando la herramienta de *Insertar > Importar Nube de Puntos*. A continuación, se eligió el formato RCP y se posicionó la nube dentro del proyecto de Revit.

7.3.2. Georreferenciación en Revit

Una vez importada la nube de puntos, el siguiente paso fue georreferenciarla en Revit para asegurar que el modelo tuviera las coordenadas correctas y estuviera alineado con el sistema de coordenadas geográficas de la zona. Se utilizó la herramienta de *Vincular CAD* para importar un archivo de referencia que contenía las coordenadas geográficas de la Catedral. Luego, se ajustaron las coordenadas del proyecto en Revit para alinearlas con el archivo CAD y la nube de puntos.

7.3.3. Detección de ejes y planos de referencia

La detección de los ejes de referencia en la Catedral es clave para un modelado preciso. Esto incluye tanto los ejes de los muros principales como los de las columnas y otras estructuras clave. Para esto, se aprovecharon las herramientas de *Referencia de Ejes* en

Revit. Utilizando la nube de puntos como referencia, se trazaron los ejes de la estructura principal de la Catedral, creando líneas de referencia en las vistas de planta, sección y alzado para tener un control adecuado de la geometría del edificio.

7.3.4. Creación de plantas y secciones

A continuación, se generaron las plantas y secciones de la Catedral, comenzando por los niveles más básicos y trabajando hacia los más complejos. Este proceso se realiza mediante el uso de las herramientas de *Planta* y *Sección* en Revit.

Se crearon las vistas de planta, secciones y alzados según las referencias proporcionadas por la nube de puntos. Estas vistas permitieron ver la geometría del edificio desde diferentes ángulos y planificar la creación del modelo.

7.3.5. Modelado manual con elementos genéricos

El modelado en Revit de la Catedral se hizo principalmente de manera manual, usando herramientas de *Modelo Genérico* para representar formas arquitectónicas complejas como bóvedas, muros, columnas, etc. Para las estructuras más complejas, como las bóvedas, se crearon elementos genéricos personalizados utilizando la herramienta de *Familias*. Estas familias fueron diseñadas y ajustadas manualmente para adaptarse a la geometría de la Catedral, haciendo uso de las herramientas de *Extrusión*, *Revolución* y *Modelado en 3D*.

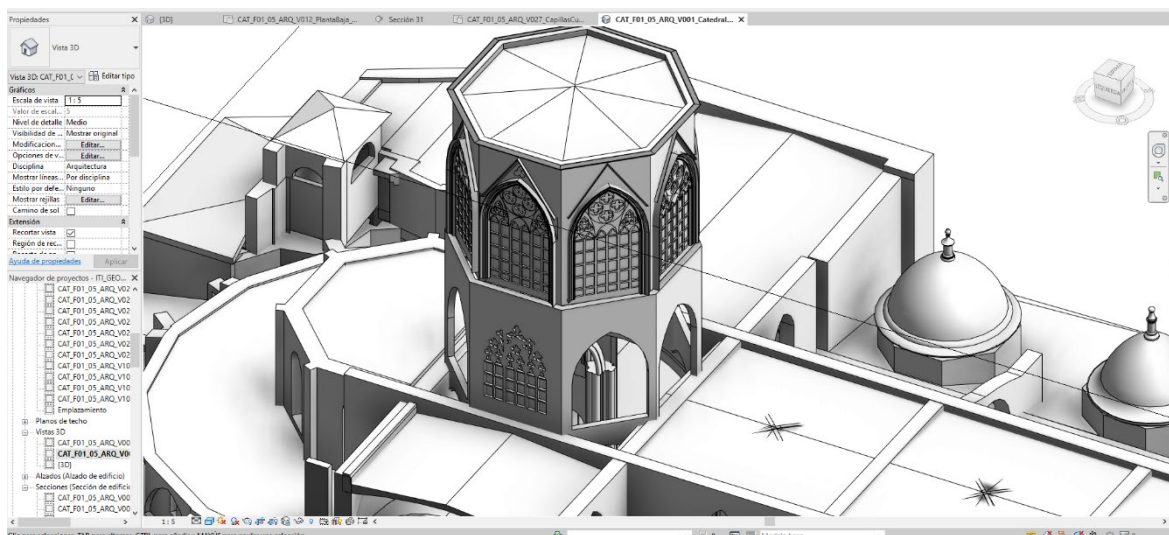


Figura 7.3: Proceso de modelado en Revit de la Catedral de Valencia (elaboración propia).

7.3.6. Creación de geometrías complejas

La Catedral tiene elementos arquitectónicos muy complejos, como sus bóvedas, torres y otras formas curvilíneas. Estas formas se modelaron utilizando las herramientas avanzadas de *Modelado* en Revit, como *Formas de Masa*. Se utilizaron las herramientas

de masas para crear las estructuras complejas, que luego se refinaron para representar detalles como las bóvedas, arcos y otras geometrías (Fig. 7.4). Para las superficies curvadas, se emplearon superficies de modelado que se ajustaron a la nube de puntos.

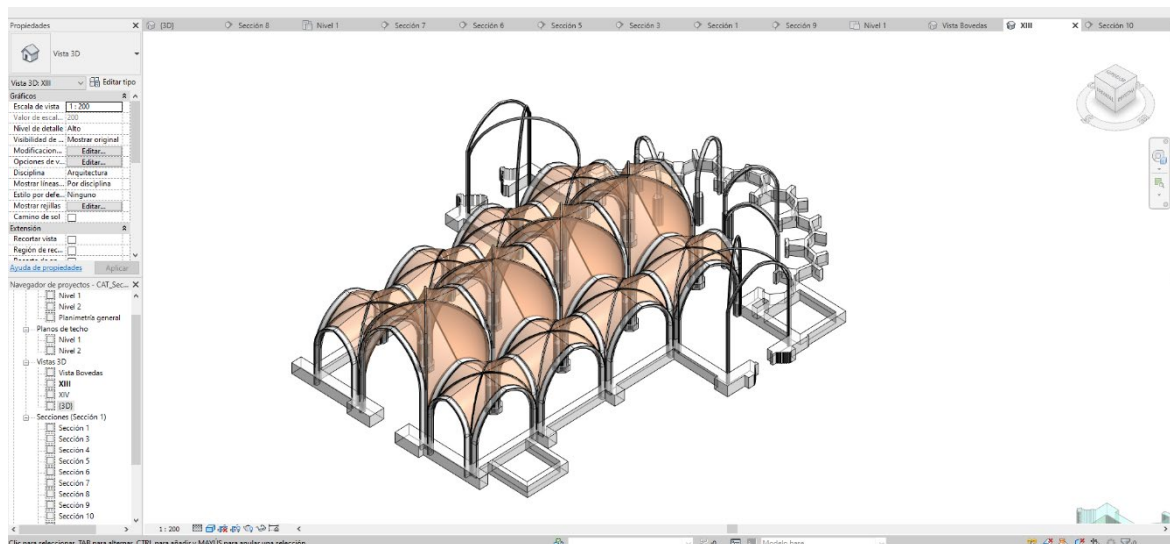


Figura 7.4: Modelado Revit mediante masas (elaboración propia).

7.3.7. Asignación de Atributos y Datos

Con el modelo completo, se empezó a agregar los atributos necesarios para su posterior análisis y gestión. Esto implicó la creación de propiedades personalizadas para los elementos del modelo, como el material de los muros, la altura de las columnas, los detalles de los acabados, entre otros. Se utilizaron las *Propiedades de los Elementos* en Revit para asignar valores específicos a cada componente del modelo (muros, columnas, etc.). Además, se crearon *Parámetros Compartidos* para incluir información adicional, como el material, la fecha de construcción y las características históricas de cada elemento. Estos parámetros se añadieron a las familias y se vincularon con el modelo para una gestión eficiente de la información.

7.3.8. Generación de Planos y Documentación

Una vez modelada la Catedral, se generaron los planos, secciones y detalles constructivos necesarios para una documentación básica del proyecto. Esto incluyó la creación de plantillas para generar vistas, detalles y tablas. Además, se generaron vistas detalladas para cada una de las partes del modelo, asegurando que las representaciones fueran precisas y completas. Se utilizaron tablas de cantidades para extraer información relevante, como las superficies de los muros, los volúmenes de las bóvedas y las dimensiones de los elementos arquitectónicos.

Este proceso de modelado manual en Revit de la Catedral de Valencia permitió crear un modelo BIM preciso, que no solo sirve como base para la conservación y restauración del edificio, sino también para facilitar la gestión de la información del bien, garantizando que

los datos históricos estén bien documentados y accesibles. Además, mediante el uso de BIM, se llevaron a cabo estudios detallados sobre las fases constructivas del edificio (Fig. 7.5), permitiendo analizar las trazas y evolución de la arquitectura a lo largo del tiempo (Fig. 7.6). En particular, se puso especial foco en el estudio y detalle de algunos elementos significativos, como la torre campanario Miguelete (Fig. 7.7), para asegurar una comprensión completa de sus características constructivas y su importancia dentro del conjunto histórico.

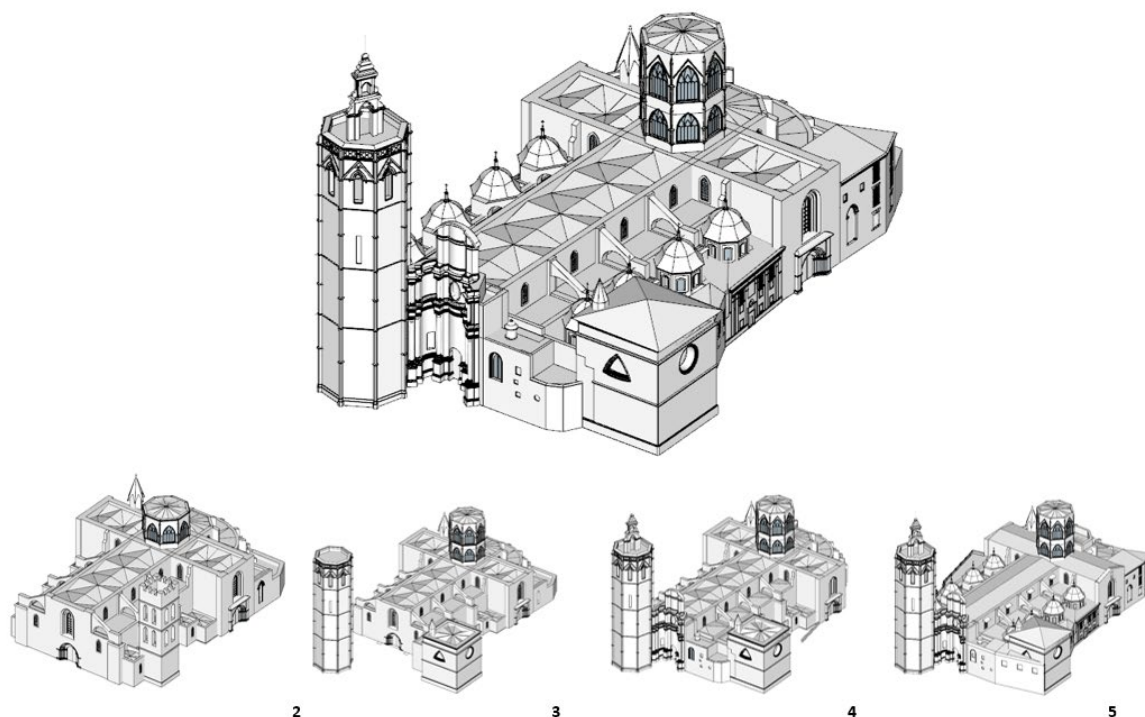


Figura 7.5: Estudio e identificación de las fases históricas a partir del modelo BIM (elaboración propia).

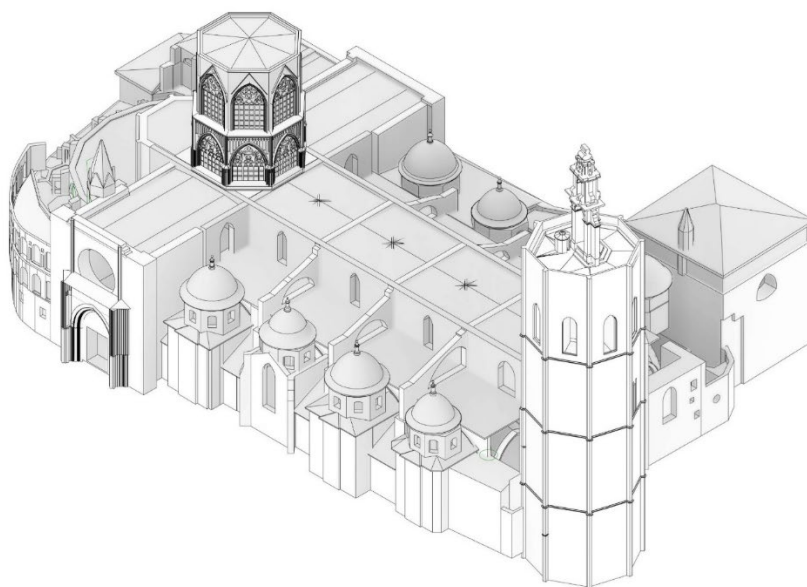


Figura 7.6: Modelo manual general en BIM de la Catedral de Valencia (elaboración propia).

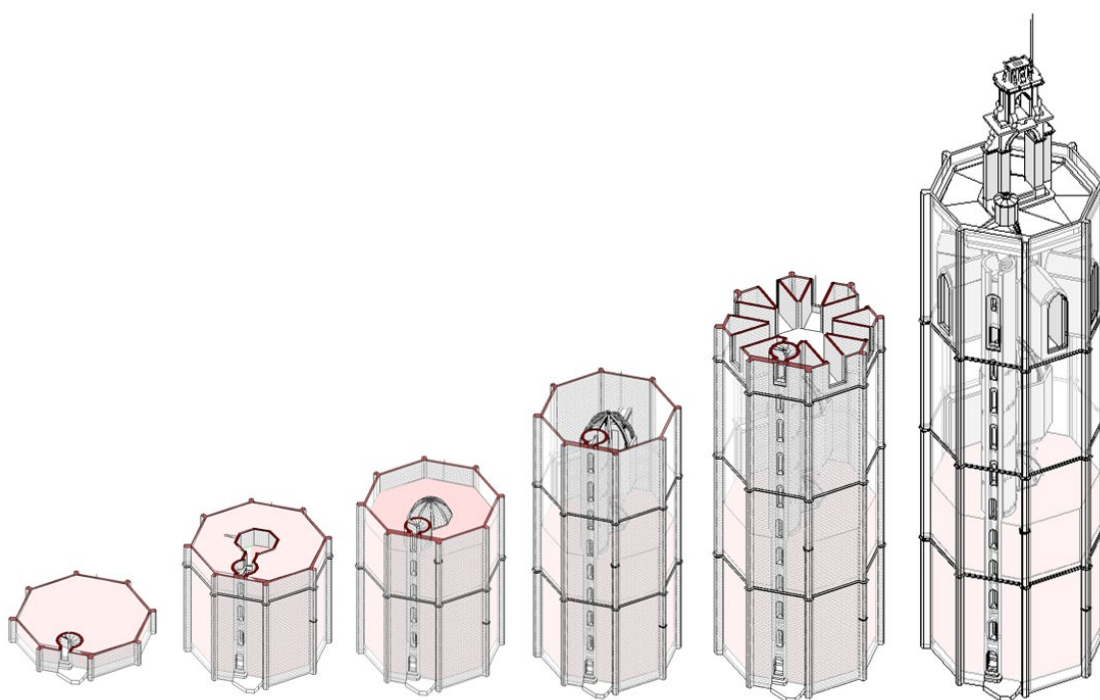


Figura 7.7: Modelo manual de la torre campanario Miguelete (elaboración propia).

7.4. Metodologías para la integración de nubes de puntos en CAD y BIM para la documentación de edificaciones históricas

La complejidad intrínseca de los edificios históricos requiere la identificación y clasificación meticulosa de grandes volúmenes de datos para su documentación precisa (Barazzetti et al., 2015). Muchos levantamientos aún se realizan utilizando CAD, una herramienta efectiva pero que demanda un tiempo considerable de modelado, especialmente en edificaciones históricas. En este contexto, el modelado de información para la construcción del patrimonio (HBIM) se implementa cada vez más como una metodología complementaria para documentar estas estructuras (Brumana et al., 2017). Sin embargo, en la mayoría de los casos, el flujo de trabajo comienza con una nube de puntos. Diversos autores han resaltado las capacidades de esta tecnología, particularmente en flujos de trabajo como *Scan-to-CAD* (Salihi et al., 2022; Avetisyan et al., 2019) y *Scan-to-BIM* (Rocha et al., 2020; Banfi, 2019), que automatizan procesos y reducen significativamente el tiempo necesario para convertir puntos espaciales en modelos geométricos precisos.

Sin embargo, dado el gran volumen de datos generados en las nubes de puntos, es esencial reducir el tamaño de esos datos mediante segmentación y filtrado. Este proceso generalmente comienza con la eliminación de ruido para descartar puntos irrelevantes o erróneos. Además, la densidad de la nube de puntos puede reducirse estableciendo un espaciamiento mínimo entre puntos o definiendo un número fijo de puntos a conservar. Un filtrado adecuado es crucial para optimizar el conjunto de datos y su procesamiento en diversas herramientas de software.

7.4.1. Scan-to-CAD sobre la planta de la Catedral Metropolitana de Valencia

Esta aplicación tuvo como objetivo optimizar el tiempo y mejorar la precisión en la generación de planos de planta en 2D mediante la utilización de modelos automáticos para la detección de segmentos basados en puntos 3D. Este enfoque se diferencia de otros al centrarse en la combinación de diversos algoritmos aplicados a puntos no etiquetados en espacios complejos e irregulares.

Se ha explorado la identificación y segmentación precisa de puntos relacionados con pavimentos, con el fin de crear representaciones detalladas y exactas de áreas pavimentadas, lo cual es particularmente relevante para la conservación de edificios históricos. Además, se buscó automatizar el proceso de levantamiento, considerando que la generación automática de geometrías 2D puede optimizar tareas en estructuras complejas, permitiendo la creación de geometrías exportables a formatos CAD y BIM. Esto conlleva una reducción significativa en los tiempos de dibujo y un aumento en la eficiencia de la documentación, garantizando que la información detallada de los monumentos sea accesible y útil para futuras labores de conservación.

Para generar la representación 2D del edificio, se emplearon métodos de análisis de datos como DBSCAN y K-means. El objetivo fue evaluar cuál de estos enfoques era más eficaz para la segmentación de datos, facilitando así una mejor comprensión y delineación de las líneas en las secciones de la Catedral.

El desafío de digitalizar una catedral va más allá del trabajo con un edificio convencional, donde predomina la regularidad geométrica. En este caso, la estructura se caracteriza por una notable complejidad constructiva, con la yuxtaposición de múltiples espacios. La adquisición de datos se llevó a cabo mediante tecnología de escaneo láser 3D.

Actualmente, la generación de planos de planta en 2D a partir de nubes de puntos en 3D tiene como principal objetivo automatizar el proceso de creación de modelos BIM. En los últimos años, se han propuesto diversas metodologías para abordar el desafío de traducir datos tridimensionales no etiquetados en representaciones bidimensionales. En este contexto, el desarrollo de modelos de aprendizaje automático ha permitido la automatización de la segmentación y clasificación de puntos en espacios 3D no estructurados mediante algoritmos como DBSCAN, K-means y *Random Sample Consensus* (RANSAC) (Fischler & Bolles, 1981; Schnabel et al., 2007; Xu et al., 2017; Wang et al., 2023). La aplicación de estos algoritmos reduce significativamente el tiempo de clasificación de datos, optimizando tanto la precisión como la calidad de los resultados.

Gankhuyag y Han (2020), por ejemplo, emplean un enfoque que analiza planos de edificios a partir de nubes de puntos no estructuradas y no clasificadas. Este método se basa en el modelo *Manhattan-World* (MW) (Coughlan & Yuille, 1999), que asume que la mayoría de las estructuras construidas pueden aproximarse mediante superficies planas alineadas con los ejes de un sistema de coordenadas ortogonales. El proceso involucra un algoritmo de detección de muros que opera directamente sobre la nube de puntos,

aunque su efectividad depende de la orientación ortogonal. El resultado final consiste en planos superpuestos que deben ser interpretados y convertidos a formato CAD para generar representaciones bidimensionales precisas.

Otro enfoque, propuesto por Bae y Kim (2023), utiliza la proyección 2D de nubes de puntos 3D mediante la reducción de datos a través de rejillas de vóxeles. Este método elimina los rangos de histograma correspondientes a suelos y techos, preservando únicamente los muros. Además, combina técnicas de agrupamiento basadas en densidad con el algoritmo DBSCAN y el filtrado SOR (*Statistical Outlier Removal*) para eliminar valores atípicos. También emplea un algoritmo de búsqueda de vecinos más cercanos sin supervisión, basado en un criterio de radio. De manera similar, Stojanovic et al. (2019) proponen una metodología que segmenta el suelo y el techo de una nube de puntos para generar un modelo de vóxeles que representa el interior de una habitación con formas regulares. Esto se logra mediante la detección de los planos de suelo y techo que contienen la mayor cantidad de puntos. Asimismo, se desarrolla un modelo para habitaciones no rectangulares, generando una Representación de Límites (B-Rep) adaptada al espacio definido por la nube de puntos.

Javanmardi et al. (2019) sugieren la generación de un mapa vectorial 2D en capas a partir de una nube de puntos 3D. El proceso consiste en seccionar la nube de puntos y proyectar los puntos sobre el suelo para generar una nube de puntos 2D. A partir de esta nube, se extraen segmentos verticales utilizando el algoritmo RANSAC para identificar líneas.

Walczak et al. (2019), por su parte, presentan un método de segmentación de nubes de puntos basado en la división jerárquica del espacio mediante histogramas inspirados en el kd-tree (Bentley, 1975), una estructura de árbol binario multidimensional utilizada para búsquedas asociativas.

Se verifica, por fin, que estos estudios se centran en casos con geometrías regulares y ortogonales, operando en el espacio 3D a través de la detección de planos o vóxeles. Sin embargo, la aplicación de estas tecnologías a edificios históricos complejos presenta desafíos adicionales debido a la intrincada geometría de las estructuras patrimoniales. En el ámbito del patrimonio cultural, el uso de estas herramientas sigue estando poco desarrollado. Así, mejorar la eficiencia y precisión en la documentación de edificios históricos sigue siendo un reto, particularmente en lo que respecta a la segmentación de nubes de puntos, ya que los datos suelen encontrarse sin clasificar.

7.4.1.1. Flujo de trabajo

7.4.1.1.1. Análisis de datos para la extracción automática de puntos del pavimento

Dado que los datos espaciales 3D incluyen información de color (RGB) y campos escalares, es necesario desarrollar flujos de trabajo específicos para abordar cada

desafío. Para realizar la segmentación y el análisis de nubes de puntos, se ha desarrollado un *script* en Python que emplea varias bibliotecas especializadas, como NumPy (R. et al., 2020), SciPy (Virtanen et al., 2020), Shapely (Gillies, 2023) y Open3D (Zhou et al., 2018). En la primera etapa, la nube de puntos se carga desde un archivo utilizando NumPy para gestionar los datos. El siguiente paso consiste en filtrar estos puntos según intervalos específicos de altura en el eje Z. Este filtrado tiene como objetivo identificar los rangos de altura donde se encuentra la mayor concentración de puntos (Fig. 7.8), lo que puede revelar características particulares de la estructura analizada, como los pisos. La hipótesis es que el valor Z donde se concentra la mayor cantidad de puntos en un edificio corresponde a una superficie plana, probablemente un piso.

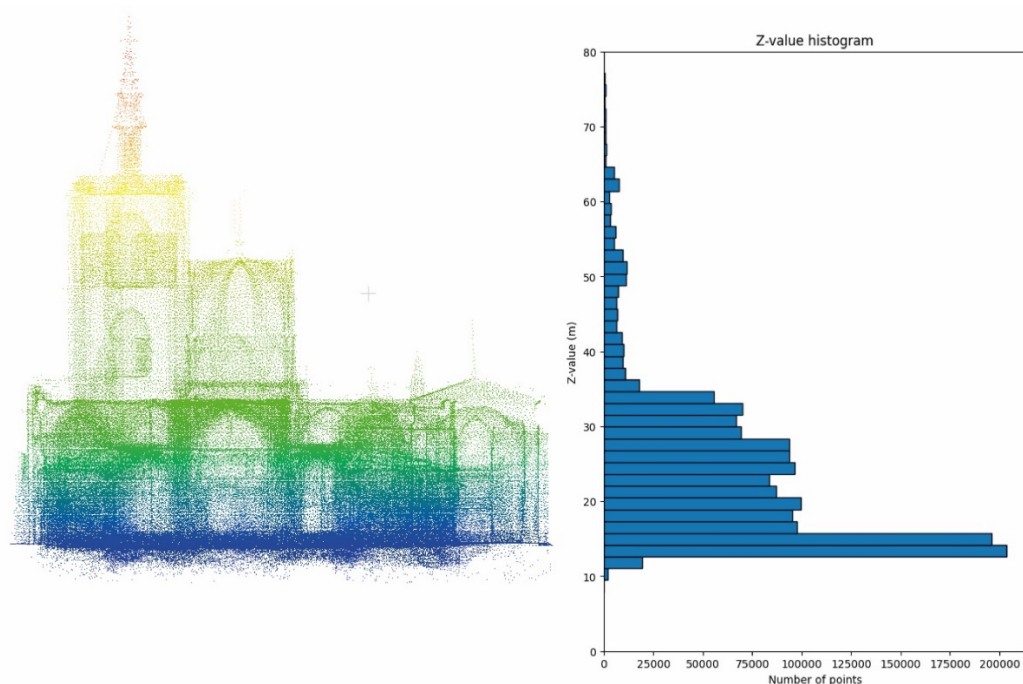


Figura 7.8: Histograma y distribución de puntos de la Catedral de Valencia basados en el eje Z (elaboración propia).

El análisis reveló que la mayor concentración de puntos a lo largo del eje Z se encuentra dentro del rango de (14,3003 a 15,003) metros. Después de identificar este rango, se filtró la nube de puntos de la Catedral utilizando este intervalo Z, complementado con un filtro SOR. Este proceso de filtrado elimina los puntos considerados atípicos o ruido mediante un análisis estadístico de la distancia entre cada punto y sus vecinos más cercanos. Finalmente, los puntos se proyectan sobre el plano Z (Fig. 7.9) para evitar errores al asignar un valor constante derivado de la media obtenida. Este enfoque garantiza cálculos precisos de áreas basados en la nube de puntos.

La nube de puntos del piso se procesa mediante un análisis de densidad para identificar los grupos. Se utiliza el algoritmo DBSCAN para este propósito, que organiza los puntos en función de su proximidad y densidad. Este método permite identificar áreas con alta concentración de puntos, facilitando la delimitación de zonas independientes. Una vez identificados los grupos, el siguiente paso es generar los polígonos

correspondientes para cada superficie detectada. La geometría 2D de las áreas se calcula a partir de los grupos de puntos utilizando el método del casco convexo. El casco convexo es una técnica de geometría computacional que construye la forma convexa más pequeña que puede envolver todos los puntos en un grupo. Este enfoque representa eficazmente las superficies detectadas en un plano creando una forma simple que delinea los límites de cada grupo.

Finalmente, se calcula el área de cada polígono para determinar la extensión de las superficies identificadas. Los polígonos generados se exportan luego a un archivo DXF¹ utilizando la biblioteca ezdxf², lo que permite una integración fluida en aplicaciones CAD. Este enfoque proporciona una representación precisa y detallada de las superficies analizadas, lo que resulta beneficioso para aplicaciones de ingeniería y arquitectura.



Figura 7.9: Discretización de los puntos que forman el piso de la Catedral de Valencia (elaboración propia).

7.4.1.1.2. Análisis de datos para convertir puntos en líneas de sección 2D

Partiendo de la nube de puntos original, se extrajeron los puntos correspondientes a un intervalo de altura específico de la coordenada Z. En este caso, se utilizó el intervalo calculado para el piso (14,3003 m a 15,1003 m), añadiendo 2 metros adicionales para obtener una sección de corte a $Z = 17,1$ m en la Catedral. Esta sección se centró en capturar la geometría relevante a esa altura.

¹ DXF (*Drawing Exchange Format*) es un formato de archivo desarrollado por Autodesk para permitir la interoperabilidad entre programas de diseño asistido por computadora (CAD)

² ezdxf es una biblioteca de Python que permite trabajar con archivos DXF.

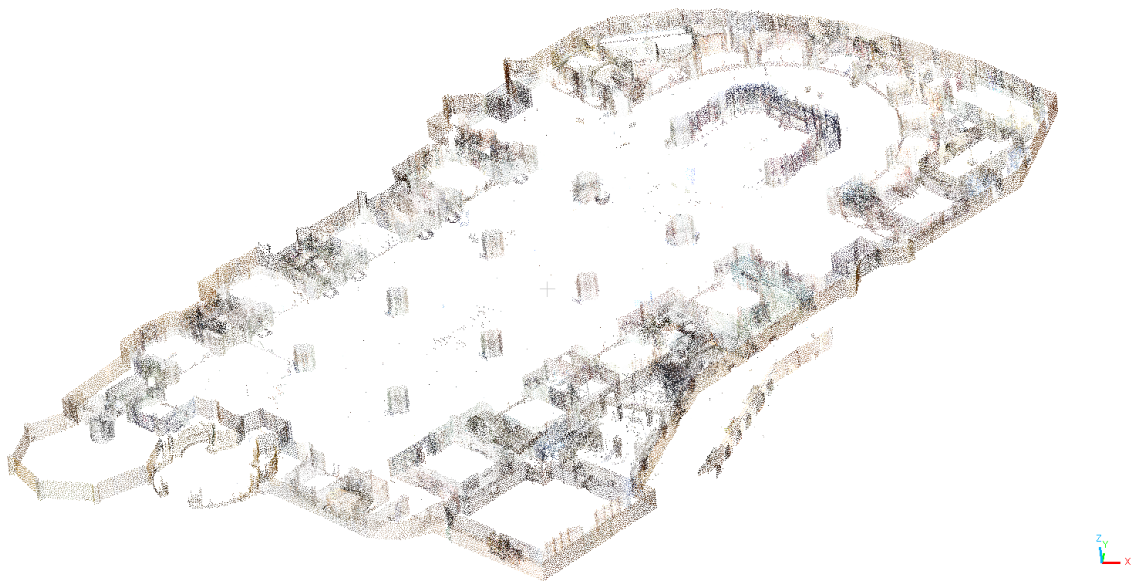


Figura 7.10: Sección de la nube de puntos de la Catedral de Valencia (elaboración propia).

Los puntos obtenidos se unificaron posteriormente a una altura constante en el eje Z para evitar errores futuros en el procesamiento. De esta manera, solo se retuvieron las coordenadas X e Y, lo que resultó en una sección de aproximadamente 25.000 puntos. Dada la complejidad de las geometrías, la conversión automática de puntos a líneas difirió considerablemente de lo que se haría en edificios modernos con formas más simples. Después de experimentar con varios métodos, como el uso de diagramas de Voronoi combinados con triangulación de Delaunay y el algoritmo KD-Tree (Fig. 7.11), que no lograron los resultados deseados, se tomó la decisión de cambiar el enfoque.

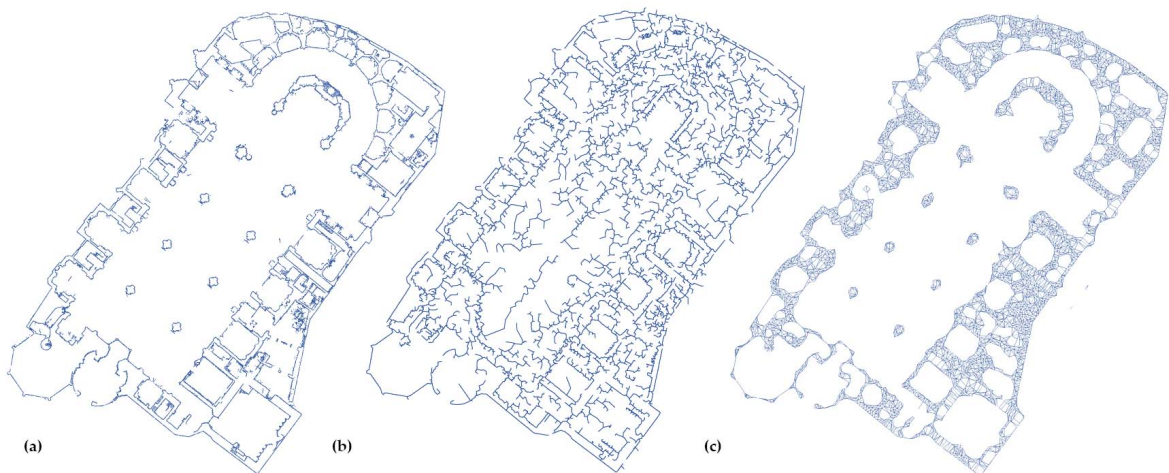


Figura 7.11: Secciones generadas automáticamente a $Z=17,1$ m: (a) puntos; (b) procesamiento de puntos con KD-Tree; (c) procesamiento de puntos con triangulación de Delaunay (elaboración propia).

Se eligió un enfoque dual para enfrentar estos desafíos, aplicando dos métodos de agrupamiento basados en aprendizaje automático. Se trabajó con un conjunto de datos no etiquetado, lo que requirió aprendizaje no supervisado para identificar grupos o

categorías dentro de los datos. A diferencia de otros métodos, el agrupamiento no necesita una fase de entrenamiento y es especialmente útil cuando las categorías no están predefinidas. El proceso consiste en definir una métrica de similitud para agrupar elementos con características compartidas en clústeres. Se aplicaron DBSCAN y K-means (MacQueen, 1967; Xu et al., 1999; Xu et al., 2017) a una muestra del plano de la planta de la Capilla del Santo Cáliz en la Catedral de Valencia.

7.4.1.2. Agrupamiento con DBSCAN

DBSCAN es un algoritmo de agrupamiento no supervisado que es particularmente útil para conjuntos de datos con áreas de alta densidad y ruido. En nuestro caso, DBSCAN se aplicó para agrupar puntos coplanares en las coordenadas X y Y. El algoritmo permitió la formación de clústeres basados en densidad, generando un número variable de agrupaciones dependiendo de los parámetros epsilon (ϵ) y *min_samples*. Epsilon define el radio de un vecindario alrededor de cada punto, dentro del cual se buscan otros puntos vecinos, y *min_samples* establece el número mínimo de puntos que deben encontrarse dentro de este radio (incluyendo el punto central) para que el grupo se considere un clúster. De esta manera, el algoritmo no solo considera la posición de los puntos en las coordenadas X y Y, sino también la densidad local de los puntos. Esto permite identificar grupos densos de puntos y distinguirlos de aquellas áreas de ruido o baja densidad. Se realizaron experimentos con los datos de la nube de puntos del plano de la planta de la Catedral y la Capilla del Santo Cáliz, utilizando una muestra más pequeña de 1.600 puntos. En estos casos, se analizó el valor óptimo de epsilon para generar el mayor número de clústeres según los parámetros variables de *min_samples*, como se muestra en la Figura 7.12 y la Tabla 7.1. Una vez generados los clústeres con DBSCAN, se calcularon las líneas de tendencia para cada grupo de puntos. Estos puntos fueron transformados en líneas individuales, lo que proporcionó una definición clara en el dibujo final a medida que aumentaba el número de clústeres (Fig. 7.13). Las líneas de tendencia generadas a partir de los clústeres fueron fusionadas y exportadas a un archivo CAD en formato DXF, lo que permitió una representación detallada y precisa de la sección a la altura especificada dentro de la Catedral.

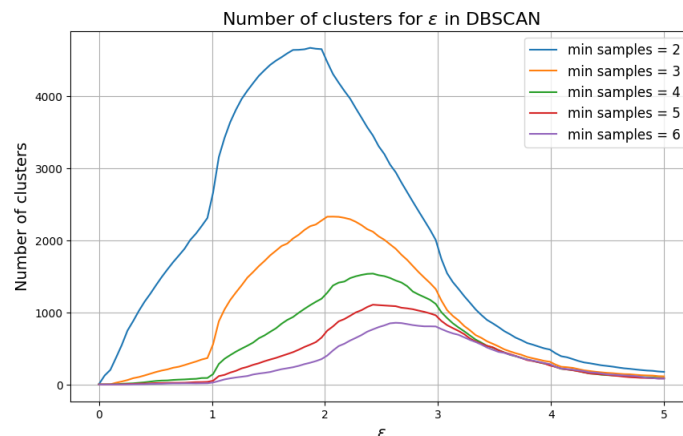


Figura 7.12: Análisis de los puntos de la Capilla del Santo Cáliz para determinar ϵ (elaboración propia).

Tabla 7.1: Número de clústeres en DBSCAN para ϵ .

Mínimo de muestras	ϵ	Número de clústeres
2	0,12	351
3	0,15	129
4	0,17	99
5	0,23	85
6	0,26	56

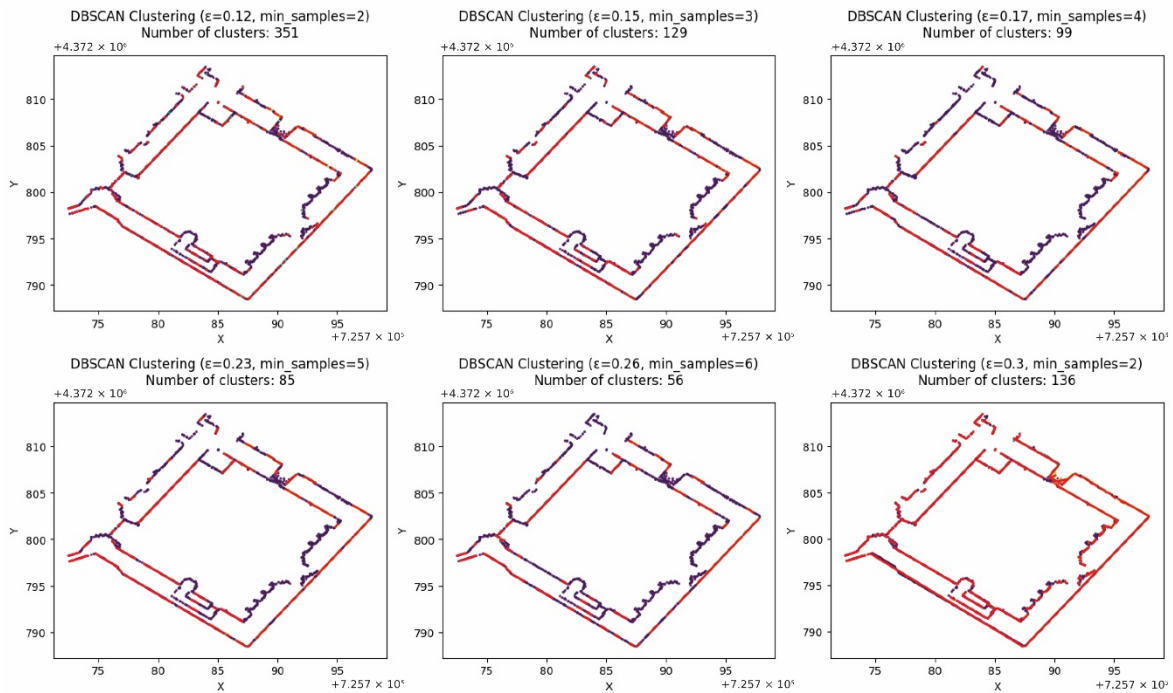


Figura 7.13: Análisis de la Capilla del Santo Cáliz utilizando el algoritmo DBSCAN, mostrando las líneas de regresión generadas a partir de la agrupación (elaboración propia).

7.4.1.3. Agrupamiento con K-means

De manera complementaria, se aplicó el algoritmo K-means, otro método de agrupamiento se basa en minimizar la distancia entre los puntos y los centros de los clústeres. A diferencia de DBSCAN, K-means requiere especificar previamente el número de clústeres. El coeficiente de silueta se utiliza para determinar el número de clústeres, el cual evalúa la calidad de los clústeres en función de la similitud de los puntos dentro de cada clúster y la diferencia con los puntos en otros clústeres. Un alto coeficiente de silueta indica que los puntos están bien agrupados. Según este método, se ha establecido que el número óptimo de clústeres para los puntos de la Capilla del Santo Cáliz es 106 (Fig. 7.14).

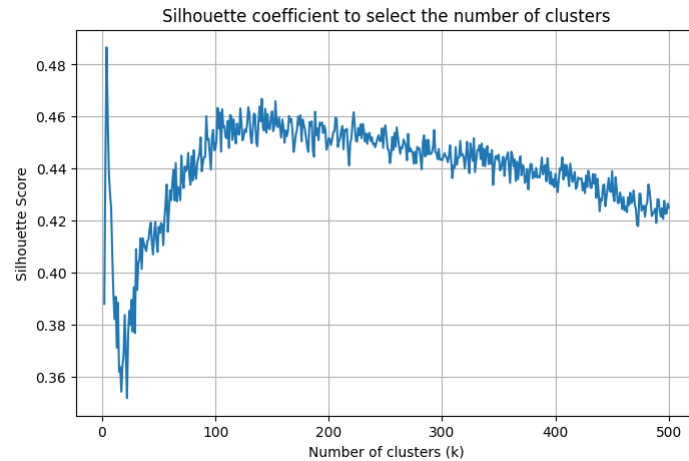


Figura 7.14: Análisis de los puntos de la Capilla del Santo Cáliz para determinar el número de clústeres (elaboración propia).

Se realizaron pruebas con varias configuraciones sobre el número de clústeres generados (5, 10, 20, 106, 200, 300) para identificar la mejor representación de los datos (Fig. 7.15). En el proceso de K-means, los puntos se asignaron a clústeres en función de su proximidad a los centros calculados. Al igual que con DBSCAN, se calcularon las líneas de tendencia a partir de los grupos de puntos, y estas líneas también se generaron y exportaron en archivos de formato DXF. Esto permitió una visualización precisa de las superficies detectadas y facilitó la integración de los resultados en aplicaciones CAD.

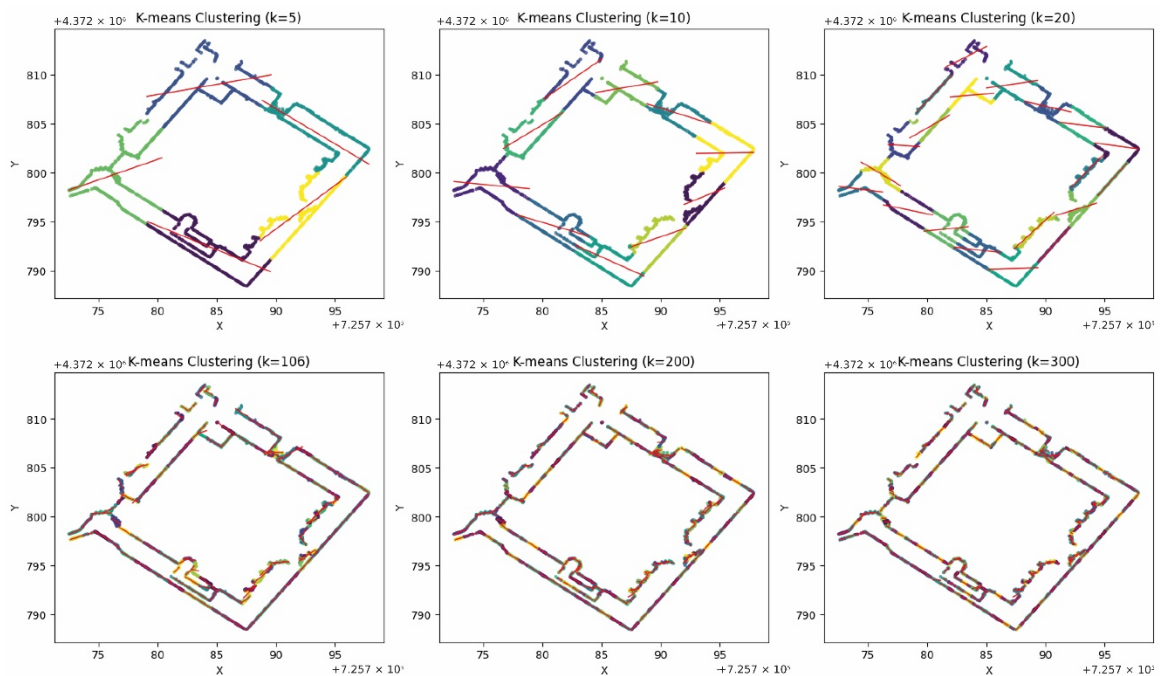


Figura 7.15: Análisis de la Capilla del Santo Cáliz utilizando el algoritmo K-means, mostrando las líneas de regresión generadas a partir de la agrupación (elaboración propia).

7.4.1.4. Utilidades y resultados

Basado en el flujo de trabajo descrito en la sección anterior, se generó el plano de planta de la catedral utilizando los puntos obtenidos mediante la rutina precedente. Como se muestra en la Figura 7.16, fue necesario ajustar el valor del radio (ϵ) del algoritmo DBSCAN para lograr una mayor precisión en la agrupación de puntos.

Es importante señalar que este flujo de trabajo no convierte el 100% de los puntos debido a la presencia de ruido o anomalías. Todos los puntos de ruido deberían ser limpiados para obtener un resultado óptimo. Sin embargo, esta tarea puede ser muy laboriosa y podría comprometer el objetivo de optimizar el tiempo requerido para desarrollar los planos de levantamiento, que es el propósito de este flujo de trabajo.

A pesar de ciertas limitaciones, los resultados obtenidos son satisfactorios (Fig. 7.16). Se ha logrado una reducción significativa en el tiempo requerido para convertir los datos de la nube de puntos en dibujos 2D, optimizando así el proceso de digitalización de secciones. No obstante, es esencial seguir realizando ajustes para perfeccionar la precisión de los resultados finales y asegurar la calidad de los planos generados.

Además, experimentamos creando el plano de planta 2D de forma manual utilizando software CAD. Al importar una nube de puntos del plano de planta de la Catedral, conectamos los puntos manualmente para delinear los segmentos que definen el plano de la planta del edificio. Este proceso tomó aproximadamente 4,5 horas para alrededor de 23.000 puntos, generando aproximadamente 6.400 segmentos. En contraste, el método propuesto toma solo alrededor de 50 segundos para producir los mismos segmentos.

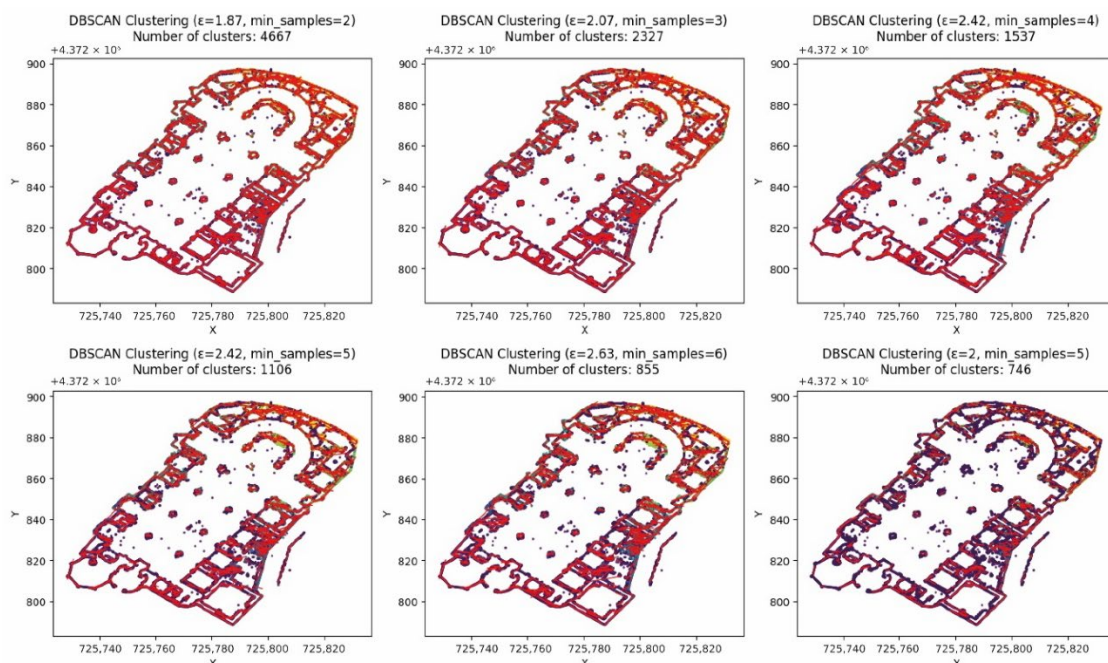


Figura 7.16: Análisis del plano de la Catedral de Valencia utilizando el algoritmo DBSCAN, mostrando las líneas de regresión generadas a partir de la agrupación (elaboración propia).

Al comparar los resultados obtenidos de ambos algoritmos (K-means y DBSCAN), se observaron aproximaciones a la geometría del edificio, aunque con variaciones en precisión. Para validar los métodos empleados, se calculó el error promedio entre los puntos originales y las líneas generadas utilizando el error absoluto medio (MAE). En el análisis de la Capilla del Santo Cáliz, los resultados revelaron un error promedio de 0,0753 para el método K-means y 0,0091 para DBSCAN. DBSCAN demostró ser más preciso al ajustar el radio epsilon (ϵ) en un rango de 0,3 a 0,5 metros, lo que permitió una delimitación más precisa de las estructuras a partir de los puntos de muestra. Por otro lado, K-means mejoró en precisión a medida que aumentaba el número de *clusters*. La efectividad de este algoritmo está estrechamente relacionada con la cantidad de puntos en la muestra. En nuestro caso, con 23.247 puntos, el mejor resultado se logró utilizando 50 *clusters*. Por lo tanto, se puede considerar que DBSCAN fue el más efectivo de los dos métodos, ya que permitió una identificación más clara de la mayoría de las líneas a partir de los puntos de muestra. Entre las limitaciones identificadas, destaca la presencia de puntos de ruido, ya que estos pueden generar errores en el proceso de automatización, particularmente en la intersección de líneas. Por lo tanto, es fundamental trabajar con una nube de puntos lo más limpia y optimizada posible en términos de tamaño de los datos, espaciamiento de los puntos y eliminación de ruido. No obstante, la sobre aplicación de filtros de ruido, como el método SOR, corre el riesgo de perder densidad de puntos, lo que podría, a su vez, reducir la precisión del plano resultante. Además, cuando se trata de puntos alineados en líneas rectas, el modelo genera un segmento por cada conexión. Sin embargo, en ciertos casos, estos podrían simplificarse en una sola línea. Es crucial considerar la densidad de puntos para asegurar una mayor definición de los datos. En espacios regulares, se recomienda una separación de puntos de 0,1 metros, mientras que, en áreas más complejas, sería más apropiada una densidad mínima de 0,03 metros. El enfoque óptimo sería utilizar una mayor densidad de puntos en áreas más complejas, donde se necesita mayor detalle, mientras que se reduciría el número de puntos en regiones más ortogonales, donde se requiere menos información. Esto permitiría optimizar el proceso sin comprometer la precisión del resultado.

La implementación de flujos de trabajo basados en el análisis de datos de nubes de puntos de la Catedral Metropolitana de Valencia ha demostrado ser altamente eficiente en la identificación y segmentación de puntos correspondientes a los pisos, permitiendo cálculos precisos de superficies irregulares. Esta metodología es esencial para generar representaciones detalladas y precisas de las áreas pavimentadas, especialmente en el contexto de la preservación de edificios históricos. La automatización del proceso, que permite la creación de geometrías 2D que pueden exportarse a formatos CAD, optimiza significativamente las tareas de levantamiento en edificios complejos, reduciendo drásticamente los tiempos de dibujo—de aproximadamente 4,5 horas a 50 segundos para tareas similares—y aumentando la eficiencia en la documentación. Además, la aplicación de métodos de *clustering* como DBSCAN y K-means ha proporcionado representaciones 2D útiles, destacándose DBSCAN como el algoritmo más efectivo para este tipo de segmentación. La comparación entre estos enfoques ha permitido una mejor comprensión y delimitación de las líneas en las secciones de la Catedral, facilitando su análisis y representación en aplicaciones de ingeniería y arquitectura. Este enfoque agiliza el proceso de documentación y mejora la precisión en la conservación y análisis detallado

de la arquitectura histórica, contribuyendo de manera significativa a la preservación del patrimonio cultural. La automatización en la generación de geometría 2D no solo simplifica la exportación a plataformas como GIS y BIM para su posterior modelado y análisis, sino que también refuerza la integración de estas tecnologías en los procesos de preservación del patrimonio, asegurando que el conocimiento detallado de estos monumentos sea accesible y utilizable en futuras intervenciones de conservación.

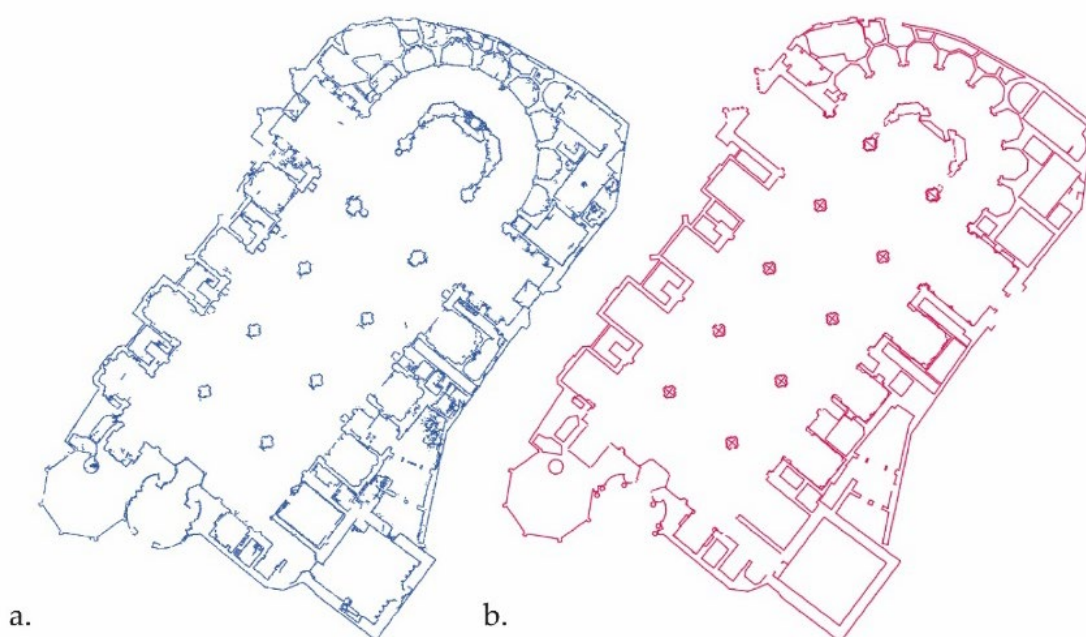


Figura 7.17: Plano de la Catedral de Valencia: a) nube de puntos; b) resultado obtenido del flujo de trabajo (elaboración propia).

7.4.2. Scan-to-HBIM en la Sacristía de la Catedral Metropolitana de Valencia

La Sacristía de la Catedral de Valencia ha sido utilizada como laboratorio de pruebas, proponiéndose como objetivo lograr su digitalización a partir del escaneo láser de su envolvente interior. Se trata de un espacio que posee una rica historia arquitectónica. Construida en el siglo XIII, es una de las áreas más antiguas y menos conocidas dentro de la Catedral. Se encuentra al inicio del deambulatorio, en su intersección con el crucero, en el lado de la epístola. Su planta es cuadrada y está cubierta por una bóveda de nervios compuesta por ocho arcos que se inscriben dentro de un octógono y descansan sobre cuatro impostas. Los ocho nervios que conforman la bóveda convergen en una única clave central y se apoyan en ménsulas tronco-piramidales (Fig. 7.18).

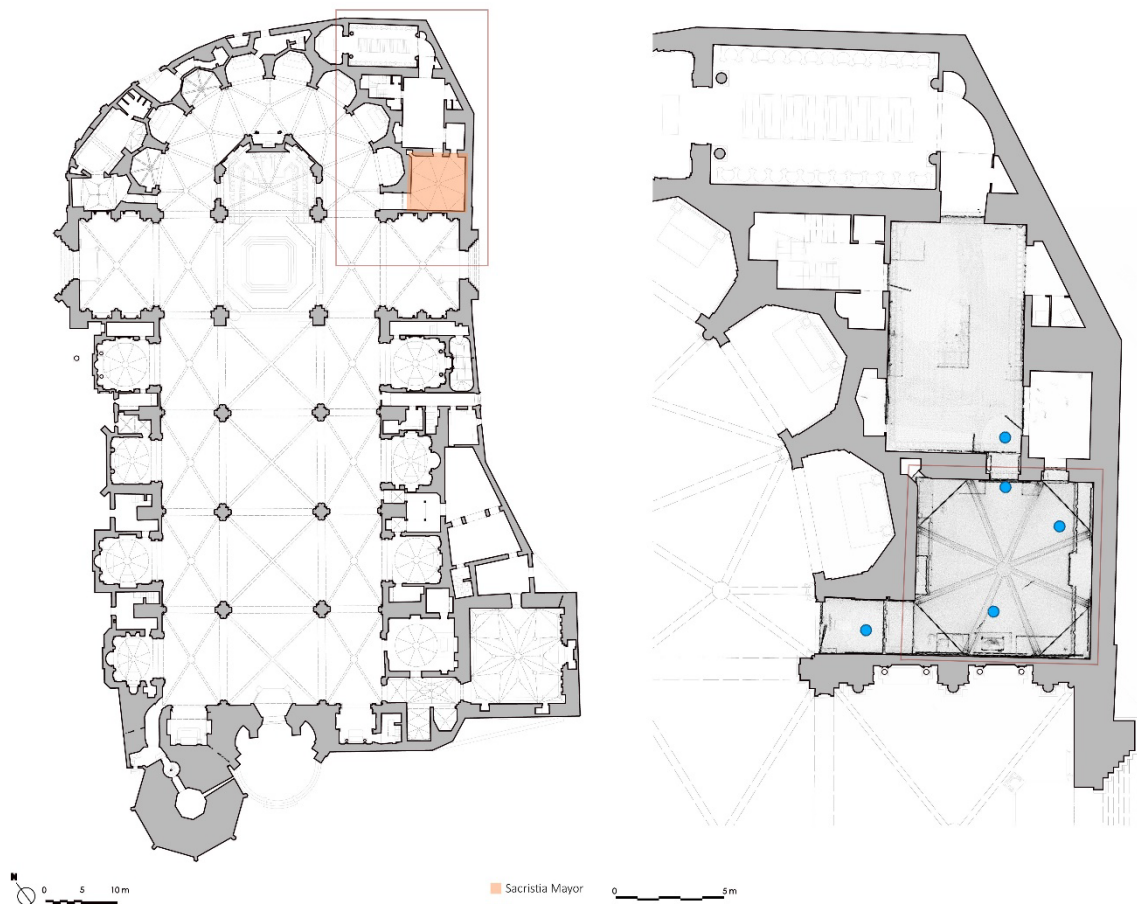


Figura 7.18: Planta y nube de puntos del sector de la Sacristía de la Catedral Metropolitana de Valencia (elaboración propia).

7.4.2.1. Adquisición de datos

La complejidad geométrica de las bóvedas de la Sacristía Mayor fue un factor clave en la selección de esta área para el estudio. Para la recopilación de datos, se utilizó un escáner láser 3D, realizando cinco posicionamientos diferentes de escaneo. Tras el procesamiento, se obtuvo una nube de puntos inicial con 162.069.128 puntos y un error medio de 2 mm. Para optimizar el conjunto de datos, se llevó a cabo un proceso de reducción de ruido, aislando la zona dentro de la Sacristía Mayor mientras se preservaba la calidad original (Fig. 7.19). Como resultado, se generó una nube de puntos con 47.073.944 puntos. Dado el número excesivo de puntos para el proceso previsto, se realizó una segunda segmentación, obteniendo una nube de puntos final de 7.085.550 puntos, representando exclusivamente las bóvedas (Fig. 7.20).



Figura 7.19: Nube de puntos de 47.073.944 puntos del sector de la Sacristía Mayor de la Catedral de Valencia (elaboración propia).



Figura 7.20: Nube de puntos de 7.085.550 puntos de la bóveda de la Sacristía Mayor de la Catedral de Valencia (elaboración propia).

7.4.2.2. Flujo de trabajo

El objetivo de esta investigación fue agilizar y optimizar el proceso de modelado BIM de edificios históricos, los cuales suelen presentar geometrías complejas y requieren significativamente más tiempo en comparación con edificaciones contemporáneas estandarizadas. Se buscó proponer una alternativa a los métodos existentes que, además, enriqueciera el modelo con información adicional relacionada con el análisis y la visualización de la nube de puntos original.

El flujo de trabajo fue probado utilizando Autodesk® Revit en conjunto con la potente herramienta de programación visual Dynamo, diseñada para la automatización de tareas y el procesamiento de grandes volúmenes de datos. La nube de puntos generada mediante escaneo láser terrestre (TLS) fue exportada en formato estándar E57. La nube, compuesta por más de siete millones de puntos, se importó en el software de código abierto CloudCompare con el propósito de convertirla en un archivo ASCII con extensión ".txt", lo que permite su fácil importación en Dynamo. Este proceso garantizó la conservación tanto de la información original de la nube de puntos como de los valores de posición de cada punto (X, Y, Z), junto con los datos de color RGB capturados por la cámara del escáner. Además, se mantuvieron los valores normales y los atributos asignados a cada punto de la nube, los cuales son valores numéricos utilizados para su clasificación.

En la siguiente etapa, tras la creación de un nuevo proyecto en Autodesk® Revit, se diseñó una familia básica para representar geoméricamente cada punto en el espacio 3D. En este caso, se emplearon esferas de 1 mm de diámetro para simbolizar cada punto, aunque también podrían haberse utilizado otros modelos 3D, como cubos. Este enfoque se basa en el concepto de "voxel", que hace referencia a la unidad mínima representable en 3D (Foley, 1990).

Para convertir cada punto en el espacio en una entidad geométrica tridimensional capaz de contener información adicional, especialmente relevante para edificios históricos (HBIM), se desarrolló una rutina en Dynamo que importa el archivo de la nube de puntos en formato XYZ y lo descompone en sus valores individuales, incluyendo coordenadas X, Y, Z, valores de color RGB y datos de clasificación de la nube de puntos. A partir de estas coordenadas, se generaron geometrías 3D, considerando cada punto analizado como su centro de gravedad.

En la fase final, se incorporaron los valores RGB a cada una de las geometrías 3D generadas, lo que permitió visualizar los puntos con sus colores reales y obtener una representación visual más precisa. Este enfoque no solo acelera el proceso de modelado de edificios históricos, sino que también enriquece el modelo BIM resultante con detalles esenciales y datos adicionales clave para la preservación y documentación precisa del patrimonio arquitectónico (Fig. 7.21).

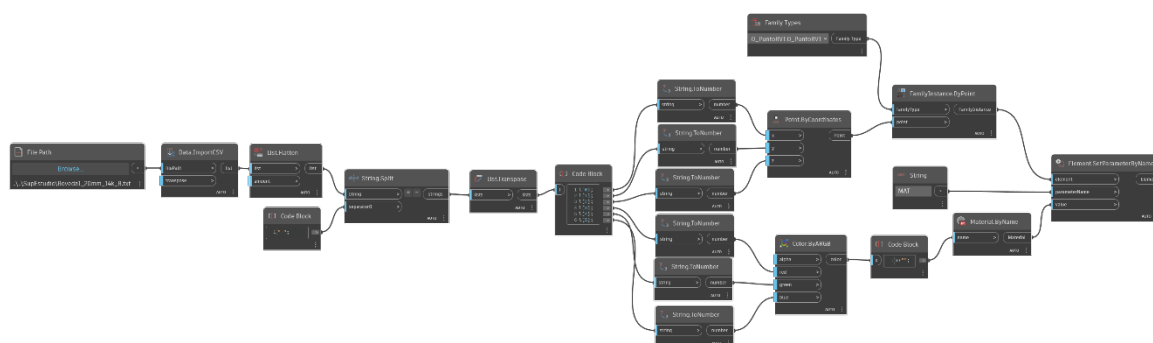


Figura 7.21: Script de Dynamo para convertir la nube de puntos en un modelo BIM (elaboración propia).

Además de la integración de los valores RGB, es posible incorporar la información de clasificación de la nube de puntos. Esto permite generar diferentes clasificaciones en CloudCompare y posteriormente asignar a cada punto la información específica de un elemento constructivo (Fig. 7.22). En otras palabras, cada punto en el modelo BIM puede almacenar datos provenientes de diversas escalas de análisis sin necesidad de replicar la geometría 3D para cada capa de análisis (Fig. 7.23). Estos datos pueden visualizarse mediante la creación de parámetros y la aplicación de distintos filtros de visualización.

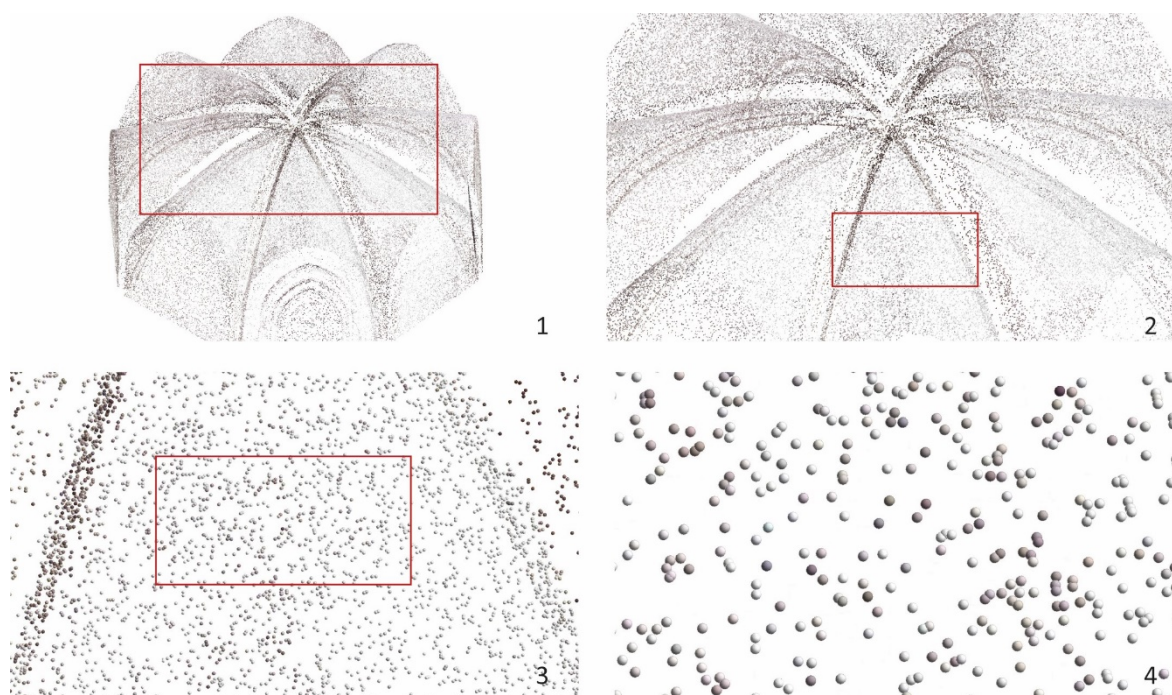


Figura 7.22: Nube de puntos generada en Autodesk Revit con ubicación y colores originales (elaboración propia).

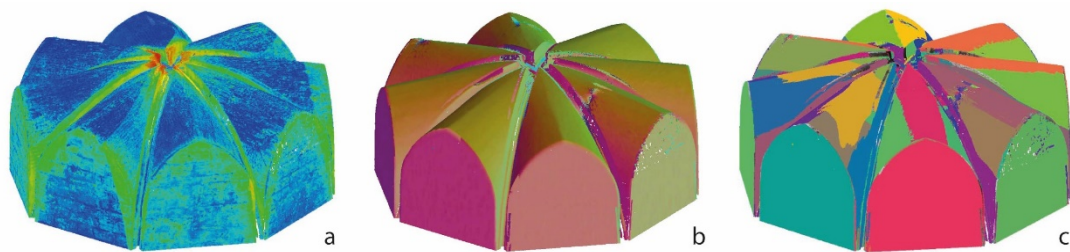


Figura 7.23: Clasificación de puntos: a) elevación; b) normal; c) detección de planos utilizando el algoritmo RANSAC (elaboración propia).

7.4.2.3. Limitaciones

Esta evaluación probó la capacidad de Revit para procesar un volumen significativo de información, específicamente siete millones de puntos, lo que equivale a siete millones de geometrías 3D. Inicialmente, se tomaron muestras de 50 puntos, y a medida que la conversión fue exitosa, la cantidad de puntos aumentó gradualmente a 100, 500, 1.000, 5.000, 10.000 y 100.000 puntos, respectivamente. Sin embargo, surgieron problemas a partir del umbral de los 5.000 puntos debido a la generación adicional de materiales para representar los colores RGB correspondientes. Revit se volvió no operativo en varias ocasiones, y en algunos casos fue necesario reiniciar el programa. La cantidad máxima de puntos con la que se realizaron pruebas exitosas en un solo archivo de Revit fue de 100.000 (Figura 7.24).

Estos resultados subrayan la necesidad de segmentar la nube de puntos por elemento constructivo y, posteriormente, crear archivos individuales con aproximadamente 20.000 a 40.000 puntos para una gestión eficaz de la información dentro de Revit. Además, surge la pregunta sobre el límite para evitar la redundancia de la información. Según la escala del objeto de estudio y los objetivos planteados, se sugiere que, para una escala de edificio, se podría utilizar una distancia de punto de 0,5 m. Al analizar una habitación, podría ser interesante obtener intervalos de puntos de 0,05 m. En el caso de objetos puntuales específicos, como una pintura o una superficie particular, puede ser necesaria una precisión máxima, alcanzando intervalos de puntos tan pequeños como 0,005 m.

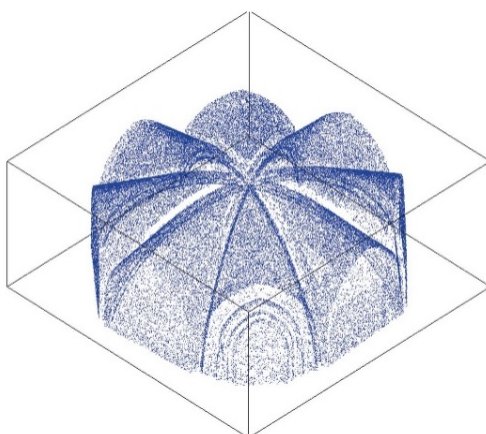


Figura 7.24: Visualización de nube dentro de Revit (elaboración propia).

7.4.2.4. Utilidades y resultados

Este proceso ofrece varios beneficios significativos. Permite la exportación de la nube de puntos como un archivo IFC, que puede ser visualizado e importado como un modelo BIM, preservando todos sus metadatos. Además, ofrece la oportunidad de integrar la información en un entorno GIS. La alta resolución obtenida es especialmente interesante, ya que permite la inclusión de diversos datos en cada punto, como tipos de materiales, condiciones patológicas, información generada por sensores en tiempo real y otras posibilidades.

Una fase adicional de este desarrollo se centra en la interoperabilidad de la información, con avances significativos dirigidos a conectar la información de los edificios (BIM) con la información geográfica GIS. Esto extiende la capacidad de los modelos digitales tridimensionales del patrimonio cultural para integrar una diversidad de datos de diferentes fuentes, incluidas nubes de puntos, datos textuales, representaciones 2D y 3D, imágenes, información de sensores y datos en tiempo real, entre otros recursos.

Esta metodología también puede aplicarse a estudios estratigráficos, permitiendo una representación de alta resolución de diversas unidades estratigráficas sin la necesidad de diseñar manualmente polígonos 2D para cada área de análisis.

A través de varios filtros de análisis de nubes de puntos, es posible identificar tanto las unidades estratigráficas como los diferentes tipos de materiales utilizados en su construcción. Además, cada superficie puede ser identificada incorporando parámetros y exportando esta información a un formato IFC.

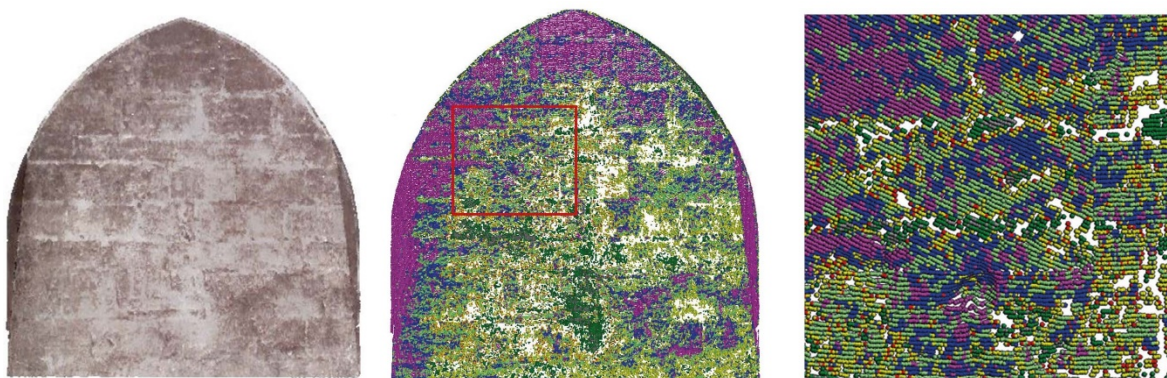


Figura 7.25: Clasificación de las superficies en una de las 187.461 geometrías de las paredes abovedadas según su profundidad en Autodesk® Revit (elaboración propia).

También es posible visualizar las clasificaciones de la nube de puntos utilizando los valores creados como parámetros de análisis. En este caso particular, se realizó un experimento en una sección de una de las pinturas en la Sacristía Mayor (Fig. 7.26). La muestra consistió en 19.200 puntos y mostró un contraste notable entre los colores. Esta muestra fue clasificada utilizando CloudCompare e importada en Autodesk® Revit mediante una rutina Dynamo. Esto permitió la conversión en geometrías BIM 3D e

incorporó parámetros de clasificación específicos, facilitando la visualización de los puntos sin la necesidad de duplicar los modelos 3D (Fig. 7.27).

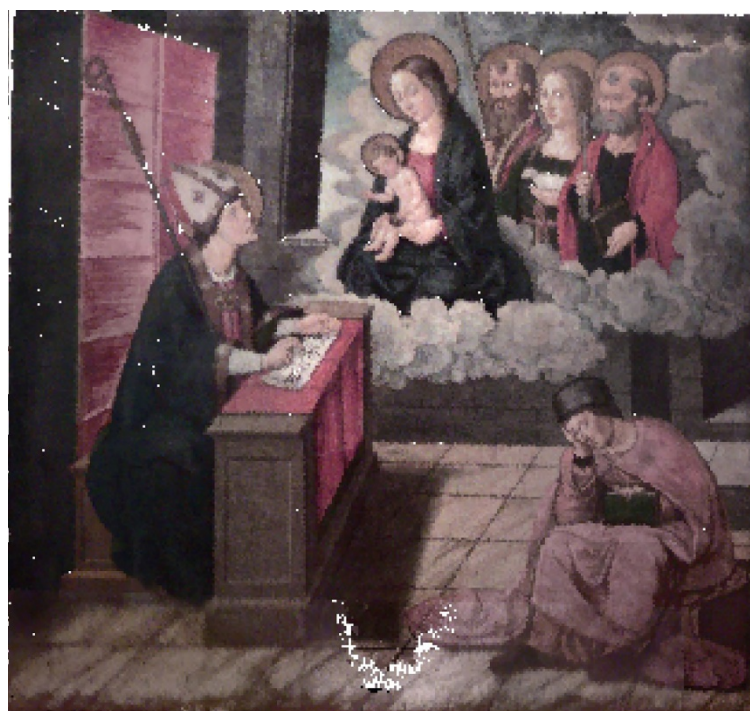


Figura 7.26: Nube de puntos de una de las pinturas en la Sacristía Mayor de la Catedral de Valencia (elaboración propia).

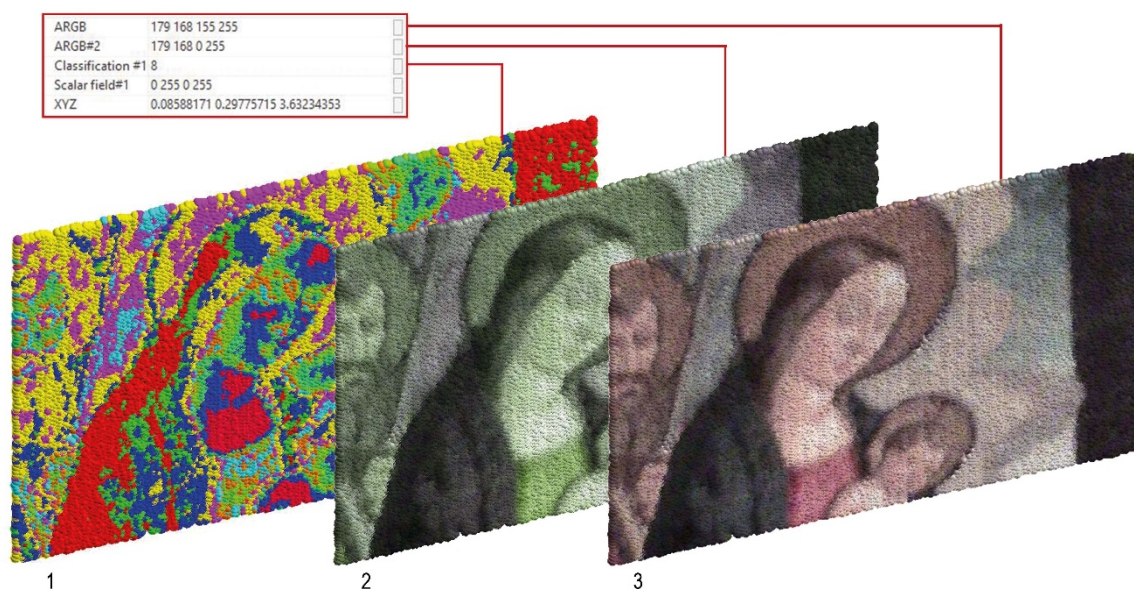


Figura 7.27: Creación de un modelo BIM 3D de la pintura de la Sacristía Mayor: 1) clasificación basada en tonos de color similares, 2) RGB modificado, 3) RGB original (elaboración propia).

Otra aplicación valiosa consiste en incorporar el modelo Revit o el archivo IFC a un sistema GIS, lo que permite una integración efectiva de la geometría en programas GIS. Una vez que se ha creado la geometría BIM, junto con toda la información asociada a cada elemento, exportarla a GIS se convierte en una opción viable. En este caso, se ha utilizado el software ArcGIS Pro, que facilita el proceso de importación de estos archivos.

Para garantizar una visualización precisa de la geometría y los colores capturados por la cámara fotográfica, es esencial crear un parámetro en BIM que contenga los códigos de color. En nuestro caso, ArcGIS admite formatos de color en RGB, como "rgb(255,255,0)", o en formato hexadecimal, como "#FFFF00". Esta práctica garantiza que, al importar un archivo IFC, la visualización sea precisa, permitiendo acceder a toda la información asociada con cada componente.

Para demostrar esto, replicamos el flujo de trabajo desarrollado previamente con el objetivo de incorporar un modelo BIM en una plataforma GIS. En esta instancia, se generó un modelo Revit a partir de la nube de puntos de la bóveda con una distancia de puntos de 5 cm. Sin embargo, para la visualización, se optó por utilizar una familia Revit con forma cúbica (Fig. 7.28). Esto resultó en un modelo de alta resolución, donde el tamaño del cubo es 8 x 8 x 8 cm. Posteriormente, el modelo se exportó a IFC, manteniendo las características originales de Revit, y se importó en Esri ArcGIS Pro (Fig. 7.29).

Para asegurar la visualización precisa de los colores del modelo IFC en Esri ArcGIS, fue necesario crear un parámetro en Revit denominado "rgb" con los colores originales de la nube de puntos. Este paso confirma la capacidad de generar cualquier tipo de parámetro que contenga información que pueda ser utilizada posteriormente en GIS. Así, se logra una interoperabilidad eficiente entre BIM y GIS, facilitando consultas y análisis integrados de los datos geoespaciales.

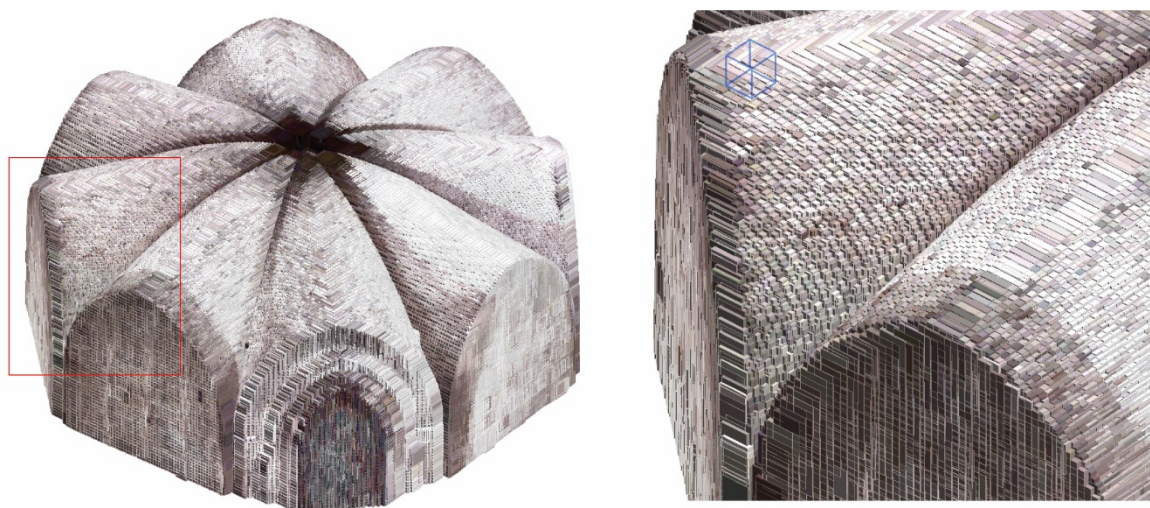


Figura 7.28: Modelo generado en Autodesk® Revit a partir de la nube de puntos de la bóveda (elaboración propia).



Figura 7.29: Visualización del modelo en Esri ArcGIS Pro utilizando la nube de puntos de la bóveda y el modelo IFC (elaboración propia).

Este proceso se convierte en una herramienta esencial para la conservación y preservación de edificios históricos, ya que permite a los expertos trabajar con datos detallados y precisos de manera eficiente. Además, la capacidad de incorporar una amplia gama de datos en un modelo BIM enriquece aún más la comprensión integral de estos monumentos y proporciona una base sólida para la toma de decisiones informadas en proyectos de restauración y gestión del patrimonio cultural.

Este enfoque tiene como objetivo simplificar y optimizar la conversión de datos de nubes de puntos en modelos BIM, manteniendo la integridad de la información original y proporcionando flexibilidad en la asignación de atributos. Se espera que acelere el proceso de modelado y mejore la calidad de los resultados obtenidos.

Actualmente, solo algunas computadoras pueden tener la capacidad de procesamiento necesaria para manejar volúmenes de datos tan extensos. Sin embargo, es solo cuestión de tiempo que esta capacidad sea más accesible y común, lo que permitirá un procesamiento más fluido de estos datos a gran escala.

Una de las ventajas significativas de esta metodología, en comparación con otras, es su capacidad para preservar la integridad de los datos. También ofrece la posibilidad de aplicar varios filtros de análisis y aprovechar los beneficios inherentes al uso del modelo BIM.

El flujo de trabajo *Scan-to-HBIM*, así, representa una innovación significativa en la digitalización y conservación de edificios históricos al permitir la conversión eficiente de nubes de puntos en modelos BIM tridimensionales. Además, la capacidad de exportar con precisión la geometría BIM desde una nube de puntos, junto con su información y colores, a Esri ArcGIS Pro, emerge como una ventaja sustancial en este proceso. Esta característica amplía las posibilidades analíticas al integrar la información en programas

GIS. Por fin, esta metodología mejora la precisión y el nivel de detalle de los modelos resultantes, enriqueciendo así la representación del valioso patrimonio arquitectónico.

7.5. Experimentación con nubes de puntos para la detección automática de afecciones patológicas en la Capilla del Santo Cáliz

Para esta experimentación con la nube de puntos se utilizó el Aula Capitular o Capilla del Santo Cáliz de la Catedral (Fig. 7.30). Se trata de una construcción de época tardogótica que en sus orígenes correspondía a un edificio aislado del edificio principal. Fue construida por Andrés Juliá entre los años 1365 – 1369 (Sanchis, 1933) y realizada en su totalidad con sillares de piedra y con unas proporciones casi cúbicas (13 m de lado x 16 m de altura). Este recinto dispone de algunos elementos característicos como la bóveda estrellada que cubre la planta octogonal, las pequeñas bóvedas trianguladas en las esquinas y el excepcional retablo de alabastro (1415-1424) que ornamenta el paramento frontal, diseñado originalmente como fachada del trascoro y trasladado a este lugar en el siglo XVIII.

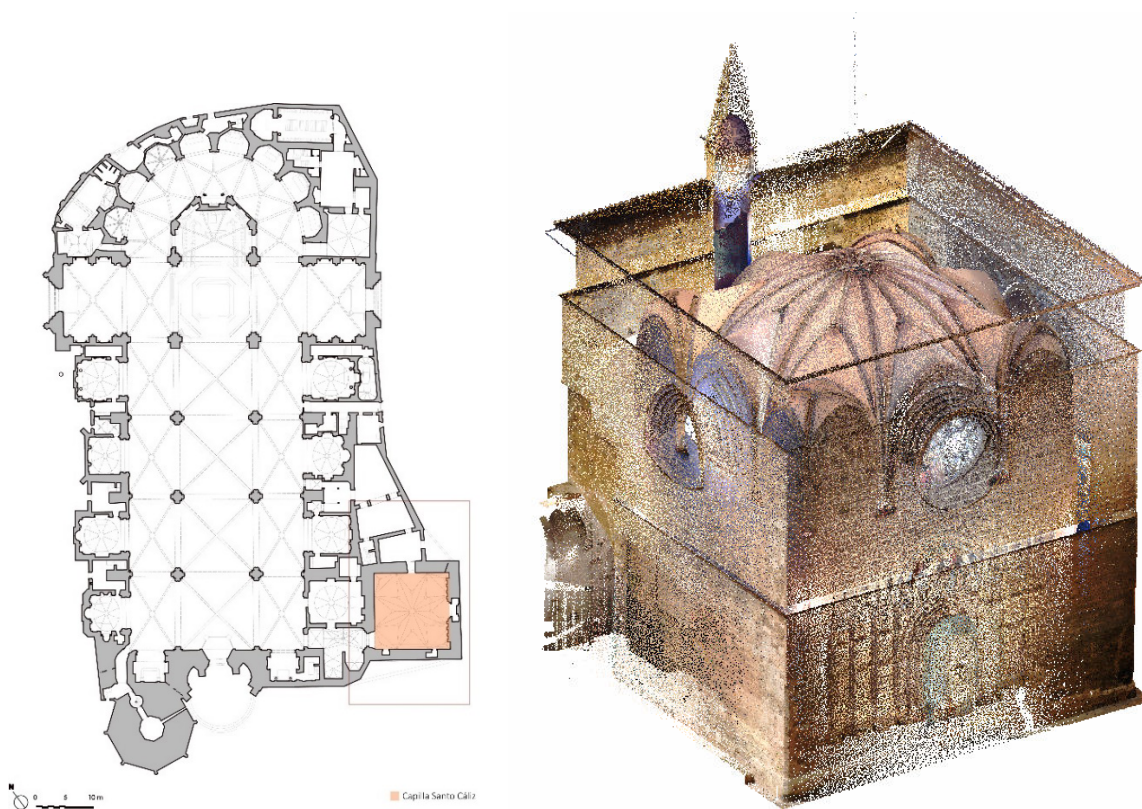


Figura 7.30: Planta de la Catedral y nube de puntos de la Capilla del Santo Cáliz (elaboración propia).

En la actualidad, el mapeo de afecciones patológicas en edificios requiere un levantamiento manual inicial. El avance del CAD ha llevado a disminuir los tiempos de representación de los levantamientos arquitectónicos, que puede complementarse con técnicas digitales como la fotogrametría y/o el escaneo láser para lograr una mayor

definición. Este proceso hace necesario digitalizar y procesar la información para obtener un producto visual aceptable, lo cual suele ser un trabajo laborioso en el que se pueden cuantificar las diferentes lesiones registradas. En este contexto, consideramos útil el uso del HBIM como una estructura de datos basada en construcciones históricas existentes, diseñada para generar modelos *as-built* que incluyan tanto información paramétrica como atributos. Por ello, es esencial definir claramente el objetivo de cada modelo para determinar el nivel de conocimiento necesario.

Por lo tanto, el objetivo de este proceso fue demostrar una alternativa para digitalizar y convertir la superficie de una construcción en un modelo BIM, que incorpore posteriormente la información relativa a los sectores afectados por afecciones patológicas y que incluya los diferentes datos necesarios para cuantificar el deterioro. Es fundamental detectar las islas en la nube de puntos a partir de diferentes análisis orientados a agrupar las informaciones, es decir, los puntos, siendo una acción necesaria para identificar en una superficie cada una de las afecciones en la edificación. En este caso nos orientamos a identificar alteraciones, o sea, patologías de forma automática sobre superficies, a partir de la variación cromática obtenida en la medida de exposición de la nube de puntos utilizando la colorimetría como una herramienta de análisis.

El progreso de la fotogrametría y el escáner láser aplicados al levantamiento arquitectónico han mejorado el mapeo de las patologías, ofreciendo productos más precisos que permiten cuantificar el deterioro. La combinación de estas tecnologías con el CAD y el BIM resulta en un gemelo digital enriquecido con información alfanumérica, incluso permitiendo el intercambio de datos a través del formato IFC hacia diferentes plataformas digitales. Por estas razones, se propone un flujo de trabajo capaz de registrar de forma semiautomática las lesiones en las superficies de los edificios históricos, aprovechando la información obtenida mediante el escaneo láser para acelerar y optimizar el proceso de modelado en entornos BIM (Escudero, 2023).

Para automatizar la detección de patologías en superficies, se emplea, como antes mencionado, la colorimetría como herramienta de análisis. Este proceso implica la captura de los valores RGB de una nube de puntos, los cuales son discretizados para detectar cambios de color, comparar áreas de materiales y evaluar la uniformidad cromática. Sin embargo, la información colorimétrica por sí sola puede no ser suficiente para identificar de manera precisa las alteraciones superficiales. Por ello, se incorpora un análisis estructural de la superficie entre los puntos, seguido por la interpolación de datos para obtener un resultado más completo.

7.5.1. Flujo de trabajo

Una vez obtenida la nube de puntos del recinto, compuesta por datos de escaneo láser 3D de cuatro estacionamientos, se procedió a su procesamiento para consolidarla en una única nube de puntos georreferenciada. Para validar la metodología, se seleccionó una superficie con un grado de planitud suficiente para minimizar posibles defectos en el

muestreo, como puntos dispersos. Posteriormente, se realizó un proceso de segmentación para aislar la superficie de interés (Fig. 7.31).



Figura 7.31: Nube de puntos de la superficie de estudio de la Capilla Santo del Cáliz (elaboración propia).

La metodología comenzó con la clasificación de los puntos obtenidos mediante el escaneo láser. Esto permitió decodificar la información de la nube de puntos, obteniendo coordenadas locales (ejes X, Y y Z) y valores RGB que representan la información cromática. Después de segmentar la superficie, se conservó la calidad original de los datos, manteniendo la densidad de los puntos y su ubicación precisa. El análisis se realizó utilizando el software de código abierto CloudCompare, con una muestra proveniente de uno de los muros exteriores de la Capilla del Santo Cáliz, que mostró una exposición uniforme durante la recopilación de datos, evitando distorsiones cromáticas. Esta muestra está compuesta por 2.411.663 puntos, con una separación que varía entre 2 y 4 mm, y tiene como objetivo identificar áreas con cambios cromáticos significativos que podrían indicar la presencia de patologías superficiales (Fig. 7.32).

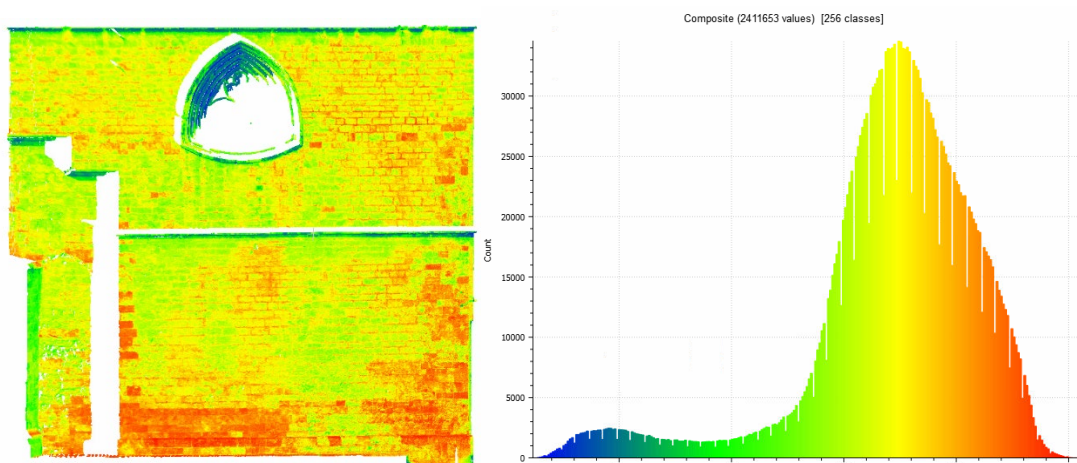


Figura 7.32: Distribución de los cromatismos en la nube de puntos de la muestra (elaboración propia).

El análisis inicial implicó simplificar los valores RGB de los puntos para facilitar su manejo y posterior análisis (Fig. 7.33). Esto se logró mediante herramientas de procesamiento del software, lo que permitió reducir la complejidad sin comprometer la cantidad de puntos. Luego, se clasificaron los puntos según sus valores RGB sintetizados (Fig. 7.33), estableciendo rangos para representar las diferentes tonalidades presentes en la superficie. Este paso fue esencial para identificar patrones específicos y posibles patologías.

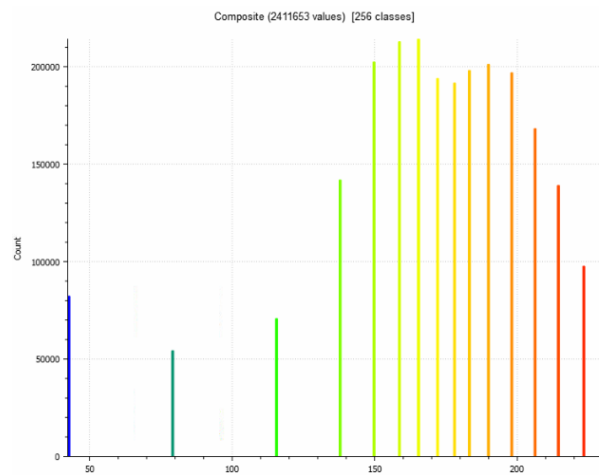


Figura 7.33: Distribución simplificada de los cromatismos en la nube de puntos de la muestra. (elaboración propia).

A continuación, se aplicaron los criterios de clasificación, lo que generó una representación visual de las áreas de interés, destacando aquellas con cambios significativos en los valores RGB. Para afinar este análisis, se empleó el algoritmo de agrupamiento K-Means *Clustering*, que simplificó la diversidad cromática de la muestra, ayudando a eliminar posibles artefactos o ruido visual.

Con las islas cromáticas identificadas, se realizaron segmentaciones adicionales para distinguir los distintos tipos de materiales presentes en la superficie analizada. Este paso permitió una mayor precisión en la caracterización de los materiales y facilitó la detección de anomalías o patologías. Luego, se efectuó un análisis exhaustivo para identificar las áreas con posibles afecciones patológicas, lo que fue clave para la evaluación y diagnóstico de la superficie. La metodología propuesta permite detectar estas alteraciones, es decir, las superficies con oscurecimientos, facilitando así su tratamiento.

La muestra de comparación está compuesta por un intervalo discretizado de valores RGB (R-R, G-G, B-B), que podemos interpretar como oscurecimiento en la superficie de la piedra. Este análisis nos proporciona como resultado las diferentes áreas superficiales con estos tonos oscuros (Fig. 7.34).



Figura 7.34: Distribución de los cromatismos en la nube de puntos de la muestra (elaboración propia).

Una vez obtenidos los puntos con oscurecimientos, se procede a su discretización para luego incorporar información específica a cada punto. Esta información incluye un identificador único (ID), el tipo de patología presente, la distancia entre puntos y otros datos relevantes. Dado que la nube de puntos se encuentra georreferenciada, es posible integrar esta información utilizando la metodología de exportación a BIM. Este proceso implica la generación de un modelo BIM que contiene los puntos RGB de toda la muestra, así como una segunda capa que está compuesta únicamente por los puntos que presentan oscurecimientos. De esta manera, se logra una representación detallada y precisa de las patologías presentes en la superficie, lo que facilita su análisis y gestión dentro del contexto del modelo BIM.

7.5.2. Utilidades y resultados

La detección de patologías en el patrimonio mediante cambios en la tonalidad o la aparición de materiales de colores diversos puede ser una técnica eficaz para identificar y cuantificar patologías. El uso del escáner láser, al proporcionar mediciones precisas de las superficies y estructuras, juega un papel crucial en este proceso. Por ejemplo, las humedades ascendentes suelen manifestarse a través de variaciones cromáticas, como manchas oscuras o áreas más brillantes, especialmente en la base de las estructuras. Estos cambios pueden ser indicativos de humedad y del riesgo de daño. Además, el moho y los hongos también pueden distinguirse por cambios cromáticos en las superficies. Estas marcas no solo reflejan un ambiente húmedo, sino que también suponen un peligro tanto para la integridad de los materiales como para la salud. En cuanto a la eflorescencia salina, los depósitos blancos o de tonalidad clara en las superficies indican la migración de minerales disueltos, lo que señala problemas de humedad que podrían comprometer la durabilidad de los materiales.

Las estructuras metálicas presentan otro desafío, ya que el óxido y la corrosión modifican la tonalidad del metal, generando colores que van desde tonos metálicos brillantes hasta marrón, naranja o rojo. Estos cambios pueden ser señales de la necesidad de tratamientos preventivos para evitar la mayor degradación del metal. Además, la contaminación atmosférica en entornos urbanos puede causar manchas oscuras o decoloradas en las superficies, sugiriendo la necesidad de limpieza y restauración.

La automatización de la detección de patologías en las superficies permite una evaluación más precisa y confiable de las afecciones, proporcionando una solución integral para el monitoreo y diagnóstico de las condiciones anómalas. Esta metodología, al integrarse en un modelo BIM, enriquece el análisis y facilita una toma de decisiones más informada en los proyectos de conservación del patrimonio arquitectónico, optimizando la planificación de medidas correctivas y de conservación.

No obstante, es importante reconocer las limitaciones de este enfoque. Su efectividad depende de la visibilidad de las patologías superficiales y de los contrastes cromáticos claros. Factores como la sobreexposición por iluminación directa, los reflejos o la captura inadecuada de los puntos pueden comprometer la calidad de la muestra y, por ende, la precisión de los resultados. Por lo tanto, aunque la metodología ofrece grandes ventajas, su aplicación debe considerar estas limitaciones.

7.6. Generación de fichas a partir del modelo HBIM

La conservación de edificios históricos, como la Catedral de Valencia, es un proceso clave para preservar nuestra historia y patrimonio cultural. A través de las tecnologías actuales es posible generar modelos digitales que facilitan la comprensión y preservación de la arquitectura y los elementos estructurales de la Catedral. En este contexto, las fichas, que representan la visualización de la información almacenada en sistemas como BIM, GIS y otras bases de datos, son fundamentales, ya que permiten acceder de manera organizada y detallada a los datos históricos y técnicos del edificio. Esto resalta la importancia de integrar estos sistemas para una gestión eficiente y completa de la información relacionada con la conservación del patrimonio.

En particular, al considerar la estructura de la ficha de identificación que plantea el Plan Director de Catedrales tratada en el Capítulo 3, se puede visualizar cómo esta información puede ser organizada y almacenada eficientemente en una base de datos relacional SQL (Fig. 7.35). Utilizando este enfoque, es posible crear un sistema integrado que facilite la gestión de los datos relativos a la Catedral de Valencia y otros edificios históricos, proporcionando una herramienta robusta para la toma de decisiones en los procesos de conservación. Este tipo de implementación no solo mejora la accesibilidad a la información, sino que también permite un seguimiento adecuado de las intervenciones realizadas, las necesidades futuras y el estado de conservación del patrimonio, asegurando así su preservación para las futuras generaciones.

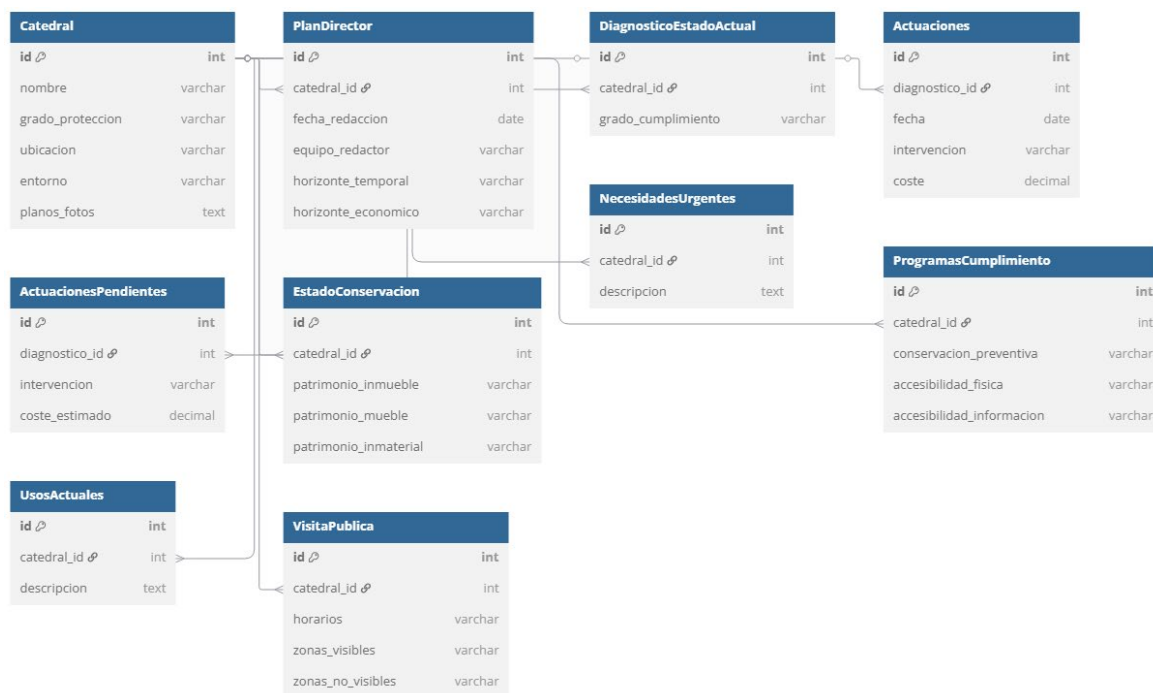


Figura 7.35: Modelo de base de datos SQL basado en la ficha del Plan de Catedrales (elaboración propia).

Flujo de trabajo

El modelo HBIM se compone de tres elementos esenciales: en primer lugar, un modelo geométrico 3D de la Catedral, que reconstruye la forma de los elementos constructivos; en segundo lugar, un modelo semántico que otorga sentido a los elementos del patrimonio; y, por último, un modelo de información que crea una base de datos con los atributos de cada componente del edificio (Nieto Julián, 2016; Santoni, 2020).

A continuación, se llevó a cabo una clasificación detallada de los diferentes espacios, así como un análisis minucioso de los elementos constructivos y materiales existentes en el edificio. Esta información permitió generar una base de datos organizada en Microsoft Access (Fig. 7.36), la cual fue incorporada al modelo y vinculada a la geometría 3D. La modelación geométrica del edificio se realizó con el software BIM Autodesk Revit, utilizando como referencia las imágenes y escaneos de los levantamientos efectuados en los últimos años, lo que permitió crear una representación tridimensional de los elementos constructivos.



Figura 7.36: Modelo en BIM de la Catedral de Valencia y modelo de base de datos en Access (elaboración propia).

La vinculación de la base de datos con el modelo 3D se logró mediante la implementación de parámetros en Revit, los cuales dotan a la geometría de información. El objetivo principal fue crear fichas de reconocimiento material para los elementos constructivos, para lo cual se definieron parámetros específicos de proyecto y parámetros compartidos.

Para estructurar la información en las fichas, se organizaron tres grupos de parámetros. El primer grupo corresponde a la información de proyecto, definida por defecto en Revit, con la adición de parámetros complementarios como: “correo”, “ID elemento”, “localización”, “municipio” y “ref. catastral”. El segundo grupo abarca datos específicos de los elementos de estudio, tales como “autor”, “descripción”, “estilo”, “periodo” y “tipología”. Finalmente, el tercer grupo se centra en el análisis de las patologías, con parámetros como “tipo de lesión”, “porcentaje de afectación”, “localización de la lesión”, “descripción” y “recomendaciones”. Estos parámetros se aplican a todos los elementos de análisis, formando los campos de cada ficha.

La generación masiva de fichas se facilita mediante la programación de rutinas en Dynamo, una aplicación complementaria de Revit, que automatiza las tareas repetitivas. En el caso de la Catedral de Valencia, se desarrollaron cinco rutinas. La primera rutina genera las fichas con sus respectivas nomenclaturas, extrayendo la información de una base de datos en Access (Fig. 7.37). La segunda rutina selecciona cada elemento de análisis y, mediante la base de datos, completa automáticamente los campos de los parámetros específicos (Fig. 7.38).

Para facilitar la identificación de las fichas, una tercera rutina crea un código QR único para cada ficha, que contiene la información específica extraída de ella. Este código QR es importado como una imagen y se redimensiona y coloca en la ficha utilizando coordenadas definidas por parámetros (Fig. 7.39).

La cuarta rutina importa las imágenes del levantamiento desde un directorio o una lista en Excel, las redimensiona y las coloca en la ficha en las posiciones adecuadas mediante

coordenadas. Finalmente, la quinta rutina coloca las vistas en los espacios correspondientes y exporta el conjunto completo de fichas en un archivo único en formato ".pdf".

Este proceso permite automatizar la generación masiva de fichas, crear un directorio con todas las imágenes correctamente identificadas y generar una base de datos en Excel con la información de cada uno de los elementos de análisis (Escudero, 2021).

Mediante la metodología descrita, se logró obtener una representación precisa de la Catedral, con información detallada sobre los elementos arquitectónicos y su estado actual.

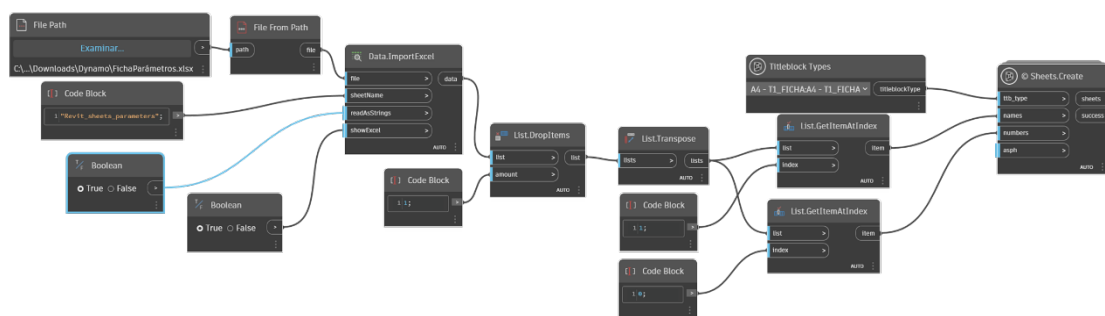


Figura 7.37: Rutina en Dynamo para generar plantilla de fichas en Revit a partir de una base de datos en Excel (elaboración propia).

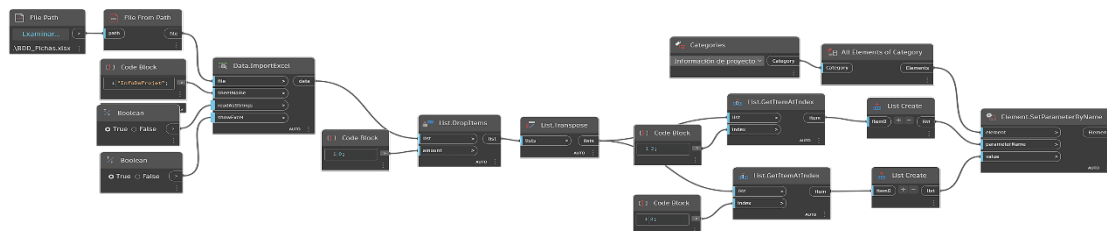


Figura 7.38: Rutina en Dynamo que completa automáticamente los campos de los parámetros de cada uno de los elementos de análisis a través de una base de datos en Excel (elaboración propia).

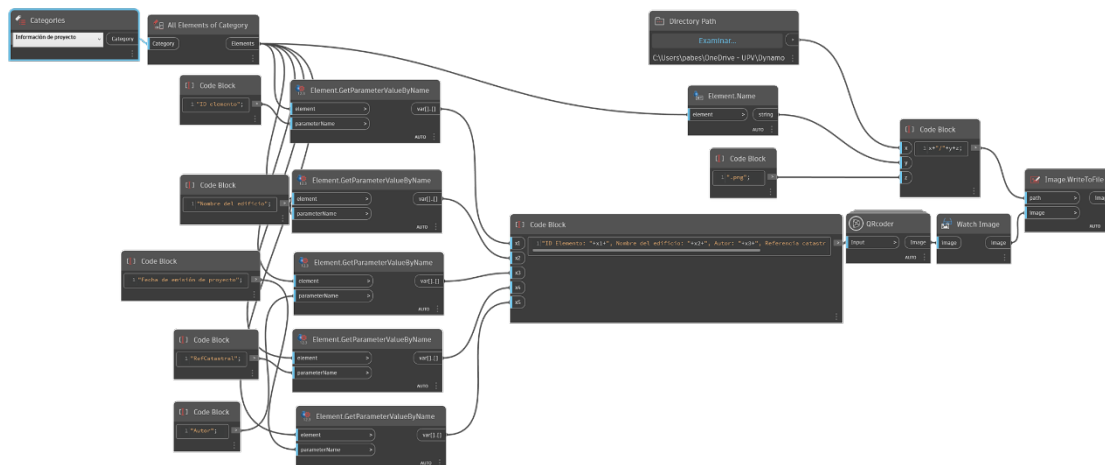


Figura 7.39: Rutina en Dynamo que genera QR *code* con la información del proyecto para cada ficha (elaboración propia).

7.6.1 Utilidades y resultados

Este flujo de trabajo posibilita la visualización de la información almacenada en las bases de datos, las cuales contienen datos detallados que facilitan tanto su gestión como su conservación. La creación de un repositorio que centralice y sistematice estos datos es clave para integrarlos eficazmente en un modelo HBIM. La generación de fichas, a partir de la interacción de estos datos, emerge como una técnica útil para visualizar la información de los edificios históricos mediante modelos HBIM. Esta organización permite evitar la duplicación de información, optimizando así la eficiencia y precisión del proceso. Aunque la generación masiva de fichas mediante otros softwares que almacenan información en bases de datos no es una novedad, el enfoque propuesto se distingue por mantener la centralidad de la mayor parte de la información dentro de un modelo HBIM.

El desarrollo de plantillas para la creación de fichas de identificación de los diferentes elementos arquitectónicos es otro aspecto clave de esta técnica. Estas permiten definir parámetros relevantes como la altura, el ancho, la longitud, la función del elemento, el material, entre otros. De este modo, las fichas se personalizan según las características específicas de cada elemento del edificio.

Un componente crucial en la gestión de edificios históricos es la identificación rápida y sencilla de la información asociada a cada elemento. En este sentido, la incorporación de códigos QR únicos para la identificación de cada ficha facilita una referencia ágil y precisa de los datos relacionados con cada componente del edificio. Esto resulta especialmente útil cuando es necesario acceder a información específica sobre un elemento determinado. El uso de tecnologías de modelización y registro, junto con la creación de plantillas para la generación de fichas de identificación, demuestran ser herramientas de gran utilidad para la gestión y conservación de edificios históricos, como la Catedral de Valencia.

Referencias del Capítulo 7

- Andriasyan, M., Moyano, J., Nieto-Julián, J. E., & Antón, D. (2020). From point cloud data to building information modelling: An automatic parametric workflow for heritage. *Remote Sensing*, 12(7), 1094. <https://doi.org/10.3390/rs12071094>
- Angulo-Fornos, R., & Castellano-Román, M. (2020). HBIM as support of preventive conservation actions in heritage architecture: Experience of the Renaissance Quadrant façade of the Cathedral of Seville. *Applied Sciences*, 10(7), 2428. <https://doi.org/10.3390/app10072428>
- Antonopoulou, S., & Bryan, P. (2017). Historic England BIM for Heritage: Developing a Historic Building Information Model. Historic England.
- Avetisyan, A., Dahnert, M., Dai, A., Savva, M., Chang, A. X., & Nießner, M. (2019). Scan2CAD: Learning CAD model alignment in RGB-D scans. *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2609–2618.
- Bae, S.-J., & Kim, J.-Y. (2023). Método de eliminación de objetos de desorden en interiores para un modelo de información de construcción *as-built* utilizando un enfoque de proyección bidimensional. *Applied Sciences*, 13, 9636. <https://doi.org/10.3390/app13179636>
- Banfi, F. (2019). The integration of a scan-to-HBIM process in BIM application: The development of an add-in to guide users in Autodesk Revit. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 42-2/W11, 141-148. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W11-141-2019>
- Banfi, F. (2019). HBIM generation: Extending geometric primitives and BIM modelling tools for heritage structures and complex vaulted systems. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-2/W15, 139–148. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W15-139-2019>
- Banfi, F. (2020). BIM, 3D drawing and virtual reality for archaeological sites and ancient ruins. *Virtual Archaeology Review*, 11(23), 16–33. <https://doi.org/10.4995/var.2020.12416>
- Barazzetti, L., Banfi, F., Brumana, R., Gusmeroli, G., Oreni, D., Previtali, M., Roncoroni, F., & Schiantarelli, G. (2015). BIM from laser clouds and finite element analysis: Combining structural analysis and geometric complexity. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XL-5/W4, 345–350. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XL-5-W4-345-2015>
- Beuter, P. A. (1551). Primera parte de la Coronica General de toda España y especialmente del Reino de Valencia. Valencia, Spain.
- Bentley, J. L. (1975). Multidimensional binary search trees used for associative searching. *Communications of the ACM*, 18, 509–517.
- Brumana, R., Oreni, D., Raimondi, A., Georgopoulos, A., & Bregianni, A. (2013). From survey to HBIM for documentation, dissemination and management of built heritage: The case study of St. Maria in Scaria d'Intelvi. *2013 Digital Heritage International Congress (DigitalHeritage)*, Marseille, France, 497–504. <https://doi.org/10.1109/DigitalHeritage.2013.6743789>
- Brumana, R., Della Torre, S., Oreni, D., Previtali, M., Cantini, L., Barazzetti, L., Franchi, A., & Banfi, F. (2017). The HBIM challenge between complexity paradigms, tools, and preservation: The Collemaggio Basilica 8 years after the earthquake (L'Aquila). *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 42(2W5), 97–104. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W5-97-2017>

- Castellano-Roman, M., & Pinto-Puerto, F. S. (2019). Dimensions and levels of knowledge in heritage building information modelling (HBIM): The model of the Charter House of Jerez (Cádiz, Spain). *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.daach.2019.e00110>
- Coughlan, J., & Yuille, A. (1999). Manhattan world: Compass direction from a single image by Bayesian inference. *Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV, 2)*, 941–947.
- Escudero, P. A. (2023). "Scan-to-HBIM: automated transformation of point clouds into 3D BIM models for the digitization and preservation of historic buildings". *VITRUVIO: International Journal of Architectural Technology and Sustainability*, 8 (2), 52 - 63. doi: [10.4995/vitruvio-ijats.2023.20413](https://doi.org/10.4995/vitruvio-ijats.2023.20413)
- Escudero, P. A. (2023). Scan-to-HBIM: Automated transformation of point clouds into 3D BIM models for the digitization and preservation of historic buildings. *VITRUVIO - International Journal of Architectural Technology and Sustainability*, 8(2), 52–63. <https://doi.org/10.4995/vitruvio-ijats.2023.20413>
- Escudero, P. A.; López González, M. C. & G-Valldecabres, J. L. (2024). "Methodology for Data Integration in 3D-HBIM Digital Models. Case Study: the Holy Chalice Chapel of Valencia Cathedral". *DisegnareCon*, 17 (32), 11.1 - 11.9. doi: [10.20365/disegnarecon.32.2024.11](https://doi.org/10.20365/disegnarecon.32.2024.11)
- Escudero, P. A.; López González, M. C. & G-Valldecabres, J. L.. (2024). "Optimising Floor Plan Extraction: Applying DBSCAN and K-Means in Point Cloud Analysis of Valencia Cathedral". *Heritage*, 7 (1), 5787 - 5799. doi: [10.3390/heritage7100272](https://doi.org/10.3390/heritage7100272)
- Escudero, P. A. (2021). Las fases históricas de la Iglesia de San Lorenzo de Valencia a través de la utilización de la metodología HBIM. *EGE Revista de Expresión Gráfica en la Edificación*, 15, 104-119. <https://doi.org/10.4995/ege.2021.16614>
- Fischler, M. A., & Bolles, R. C. (1981). Random sample consensus: A paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography. *Communications of the ACM*, 24(6), 381–395.
- Foley, J. D. (1990). *Spatial-partitioning representations; Surface detail*. In *Computer graphics: Principles and practice* (The Systems Programming Series, p. 978). Addison-Wesley. ISBN 978-0-201-12110-0
- G-Valldecabres, J. L.; Escudero, P. A.; López González, M. C. & Cortés Meseguer, L. (2024). "Optimización del registro de lesiones constructivas a través de la metodología Scan-to-BIM." *EN Congreso Internacional BIM / 13º Encuentro de Usuarios BIM (EUBIM 2024)*, (13 - 21). Valencia, España: Editorial UPV.
- G-Valldecabres, J.; Escudero, P. A.; López González, M. C. & Cortés Meseguer, L. (2023). "Utilización de BIM para la generación de fichas relativo a la manifestación patológica en edificios históricos." *EN Congreso Internacional BIM / 12º Encuentro de Usuarios BIM (EUBIM 2023)*, (56 - 62). Valencia, España: Editorial Universitat Politècnica de València.
- G-Valldecabres, J.; J. Liu; D. S. Willkens; Escudero, P. A.; Cortés Meseguer, L.; Orozco-Carpio, P. R. & López González, M. C. (2023). Development of a virtual itinerary with HBIM and GIS. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* (Online), XLVIII, 645 - 652. doi: [10.5194/isprs-archives-XLVIII-M-2-2023-645-2023](https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-M-2-2023-645-2023)
- Gankhuyag, U., & Han, J.-H. (2020). Generación automática de planos de planta en 2D CAD a partir de nubes de puntos en 3D. *Applied Sciences*, 10, 2817. <https://doi.org/10.3390/app10082817>

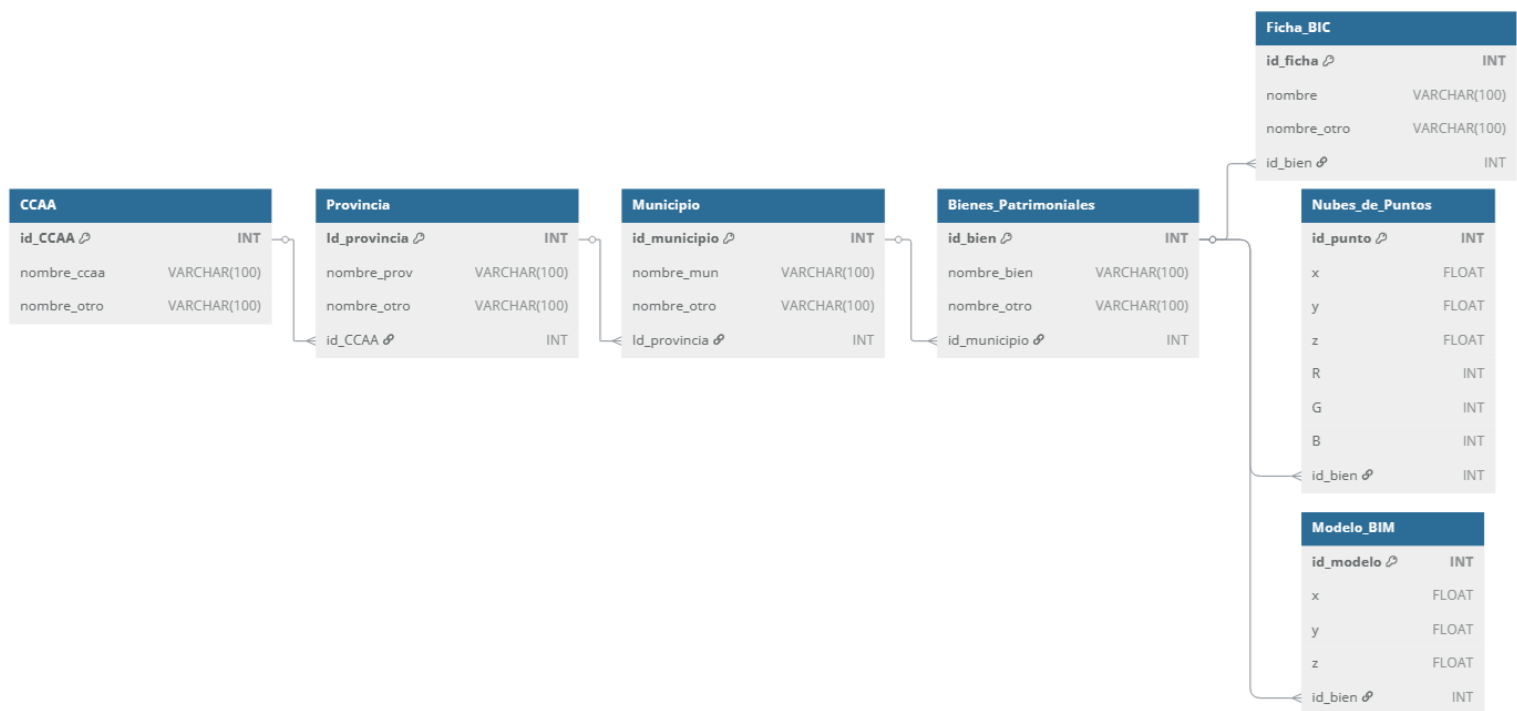
- Gillies, S. (2023). *Shapely: Geospatial Analysis Library*. Shapely Documentation. <https://shapely.readthedocs.io/>
- Graham, K., Chow, L., & Fai, S. (2019). From BIM to VR: Defining a level of detail to guide virtual reality narratives. *Journal of Information Technology in Construction (ITcom)*, 24, 553–568. <https://doi.org/10.36680/j.itcon.2019.031>
- Javanmardi, E., Gu, Y., Javanmardi, M., & Kamijo, S. (2019). Autonomous vehicle self-localization based on abstract map and multi-channel LiDAR in urban area. *IATSS Research*, 43, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.iatssr.2018.05.001>
- Logothetis, S., Delinasiou, A., & Stylianidis, E. (2015). Building information modelling for cultural heritage: A review. *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, II-5/W3, 177–183. <https://doi.org/10.5194/isprsannals-II-5-W3-177-2015>
- Liu, J.; Willkens, D.; López González, María Concepción; Cortés Meseguer, Luis; G-Valldecabres, Jorge; Escudero, Pablo Ariel; Alathamneh, S. (2023). “Comparative analysis of point clouds acquired from a TLS survey and a 3D virtual tour for HBIM development”. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* (Online), XLVIII, 959 - 968. doi: [10.5194/isprs-archives-XLVIII-M-2-2023-959-2023](https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-M-2-2023-959-2023)
- López, F. J., Lerones, P. M., Llamas, J., Gómez-García-Bermejo, J., & Zalama, E. (2018). A review of heritage building information modeling (H-BIM). *Multimodal Technologies and Interaction*, 2(2), 21. <https://doi.org/10.3390/mti2020021>
- López González, María Concepción; Escudero, Pablo Ariel; G-Valldecabres, Jorge. (2023). “The potential of HBIM for visualizing graphic analyses of heritage architecture: the bell tower of Valencia Cathedral”. *DisegnareCon*, 16 (3), DW.1 - DW.11. doi: [10.20365/disegnarecon.30.2023.24](https://doi.org/10.20365/disegnarecon.30.2023.24)
- Lo Turco, M., Mattone, M., & Rinaudo, F. (2017). Metric survey and BIM technologies to record decay conditions. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, 42(5W1), 261-268.
- Lovell, L. J., Davies, R. J., & Hunt, D. V. L. (2023). The application of historic building information modelling (HBIM) to cultural heritage: A review. *Heritage*, 6(10), 6691–6717. <https://doi.org/10.3390/heritage6100350>
- MacQueen, J. (1967). Some methods for classification and analysis of multivariate observations. In *Proceedings of the Fifth Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability* (pp. 281–297). University of California Press.
- Millman, K. J., van der Walt, S., Gommers, R., Virtanen, P., Cournapeau, D., Wieser, E., Taylor, J., Berg, S., Smith, N. J., et al. (2020). Array programming with NumPy. *Nature*, 585, 357–362. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2649-2>
- Murphy, M., McGovern, E., & Pavia, S. (2009). Historic building information modelling (HBIM). *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 27(4), 311–327.
- Murphy, M., Govern, E. M., & Pavia, S. (2013). Historic building information modelling: Adding intelligence to laser and image-based surveys of European classical architecture. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 92, 19–32.
- Nieto Julián, E., Moyano, J. J., Rico Delgado, F., & Antón García, D. (2016). Management of built heritage via HBIM project: A case study of flooring and tiling. *Virtual Archaeology Review*, 7, 1. <http://dx.doi.org/10.4995/var.2016.4349>

- 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*, II-5/W1, 215–221. <https://doi.org/10.5194/isprsannals-II-5-W1-215-2013>
- Pocobelli, P., Boehm, J., Bryan, P., Still, J., & Grau-Bové, J. (2018). BIM for heritage science: A review. *Heritage Science*, 6, 30. <https://doi.org/10.1186/s40494-018-0191-4>
- Rocha, G., Mateus, L., Fernández, J., & Ferreira, V. (2020). A Scan-to-BIM methodology applied to heritage buildings. *Heritage*, 3, 47–67. <https://doi.org/10.3390/heritage3010004>
- Salihu, D., Misik, A., Hofbauer, M., & Steinbach, E. (2022). S2CMAF: Multi-method assessment fusion for scan-to-CAD methods. *Proceedings of the 2022 IEEE International Symposium on Multimedia (ISM)*, Italy, 129–136. <https://doi.org/10.1109/ISM55400.2022.00026>
- Sanchis Sivera, J. (1933). Arquitectos y escultores de la catedral de Valencia. *Archivo de Arte Valenciano*, 19, 3–24. Real Academia de Bellas Artes de San Carlos.
- Santoni, A., Martín-Talaverano, R., Quattrini, R., & Murillo-Fraguero, J. (2020). HBIM approach to implementing the historical and constructive knowledge: The case of the Real Collegiate of San Isidore (León, Spain). *Virtual Archaeology Review*, 12(24), 49–65. <https://doi.org/10.4995/var.2021.13661>
- Schnabel, R., Wahl, R., & Klein, R. (2007). Efficient RANSAC for point-cloud shape detection. *Computer Graphics Forum*, 26, 214–226. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8659.2007.01016.x>
- Selvaggi, I. (2018). Surveying and three-dimensional modeling for preservation and structural analysis of cultural heritage. *Ricerche di Geomatica*, 2017, 81–92.
- Stojanovic, V., Trapp, M., Richter, R., & Döllner, J. (2019). Generation of approximate 2D and 3D floor plans from 3D point clouds. *Proceedings of the 14th International Joint Conference on Computer Vision, Imaging and Computer Graphics Theory and Applications (VISIGRAPP 2019)*, Prague, Czech Republic, 25–27 February 2019, 177–184. <https://doi.org/10.5220/0007247601770184>
- Virtanen, P., Gommers, R., Oliphant, T. E., et al. (2020). SciPy 1.0: Fundamental algorithms for scientific computing in Python. *Nature Methods*, 17, 261–272. <https://doi.org/10.1038/s41592-019-0686-2>
- Xu, Y., Tuttas, S., Hoegner, L., & Stilla, U. (2017). Geometric primitive extraction from point clouds of construction sites using VGS. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 14, 424–428. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2017.2647816>
- Xu, R., Wunsch, D., Jain, A., Murty, M., & Flynn, P. (1999). Data clustering: A review. *ACM Computing Surveys*, 31(3), 264–323. <https://doi.org/10.1145/331499.331504>
- Xu, Y., Boerner, R., Yao, W., Hoegner, L., & Stilla, U. (2017). Automated coarse registration of point clouds in 3D urban scenes using voxel-based plane constraint. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, IV-2/W4, 185–191. <https://doi.org/10.5194/isprs-annals-IV-2-W4-185-2017>
- Walczak, J., Poreda, T., & Wojciechowski, A. (2019). Effective planar cluster detection in point clouds using histogram-driven kd-like partition and shifted Mahalanobis distance-based regression. *Remote Sensing*, 11, 2465. <https://doi.org/10.3390/rs11212465>
- Wang, F., Zhou, G., Xie, J., Fu, B., You, H., Chen, J., Shi, X., & Zhou, B. (2023). An automatic hierarchical clustering method for the LiDAR point cloud segmentation of buildings via shape

classification and outliers reassignment. *Remote Sensing*, 15, 2432.
<https://doi.org/10.3390/rs15092432>

Zhou, Q. Y., Park, J., & Koltun, V. (2018). Open3D: A modern library for 3D data processing. *arXiv*, 1801.09847. <https://arxiv.org/abs/1801.09847>

Capítulo 8. Integración semántica de datos mediante ontologías



Capítulo 8: Integración semántica de datos mediante ontologías

Presentación

En los capítulos previos, se abordó la estructuración y optimización de datos para la documentación del patrimonio arquitectónico, destacando la importancia del Plan Director como una herramienta clave para la gestión integral de la Catedral Metropolitana de Valencia. A partir de esta estructura optimizada, en este capítulo se introduce el uso de ontologías como un marco conceptual que permite integrar, relacionar y gestionar de manera semántica los datos generados en el Capítulo 7, donde se experimentó con diferentes metodologías para la clasificación semiautomática de información geométrica. La ontología diseñada toma como base el esquema del Plan Director de Catedrales, permitiendo unificar y estructurar los datos, asegurando su interoperabilidad en plataformas digitales como HBIM, GIS y sistemas de información documental.

En este capítulo se presenta el diseño de la estructura ontológica aplicada a la Catedral de Valencia, detallando su implementación y su integración con modelos HBIM y plataformas GIS. Además, se exploran las posibilidades de consulta y análisis de la información estructurada mediante ontologías, destacando su potencial para la conservación y restauración del patrimonio arquitectónico. Finalmente, se plantean líneas de desarrollo futuro, incluyendo la automatización de procesos y la mejora en la interoperabilidad de los modelos digitales.

8.1. Definición de la ontología base

Para generar la ontología base, retomamos nuevamente la estructura estudiada sobre los Planes Directores de Catedrales en el Capítulo 3. A partir de la estructura del Plan Director (identificación, estudio, diagnóstico, propuesta, intervención y gestión), podemos definir una ontología base que organice la información de manera semántica para su integración en HBIM y GIS. En este sentido, la ontología debe permitir la representación de la información arquitectónica y patrimonial mediante clases, relaciones y propiedades que estructuren los datos de manera interoperable.

- **Dominio:** gestión del patrimonio arquitectónico de catedrales.
- **Objetivo:** estructurar la información de planificación, análisis y conservación para integrarla en modelos HBIM y GIS.
- **Fuentes de datos:** modelos geométricos, bases documentales, informes de intervención, diagnósticos de patologías, estrategias de conservación.

8.1.1. Definición de las clases principales:

Cada etapa del Plan Director define una serie de entidades o clases en la ontología. Dada la complejidad de un Plan Director, en el siguiente ejemplo se demuestra la aplicación de esta estructura de manera simplificada.



Figura 8.1: Estructura optimizada de un Plan Director de Catedrales (elaboración propia).

Para estructurar y gestionar la información del Plan Director, se diseñó una base de datos en SQL con el objetivo de asegurar su organización, almacenamiento y consulta. A partir de esta estructura optimizada en SQL, se implementó en un sistema de gestión de bases de datos, el cual sirvió como fuente de datos para una ontología, permitiendo enriquecer la información con significados y relaciones semánticas (Fig. 8.2 y 8.3).

En primer lugar, se implementa la estructura general que establece la vinculación con los distintos conjuntos de datos.

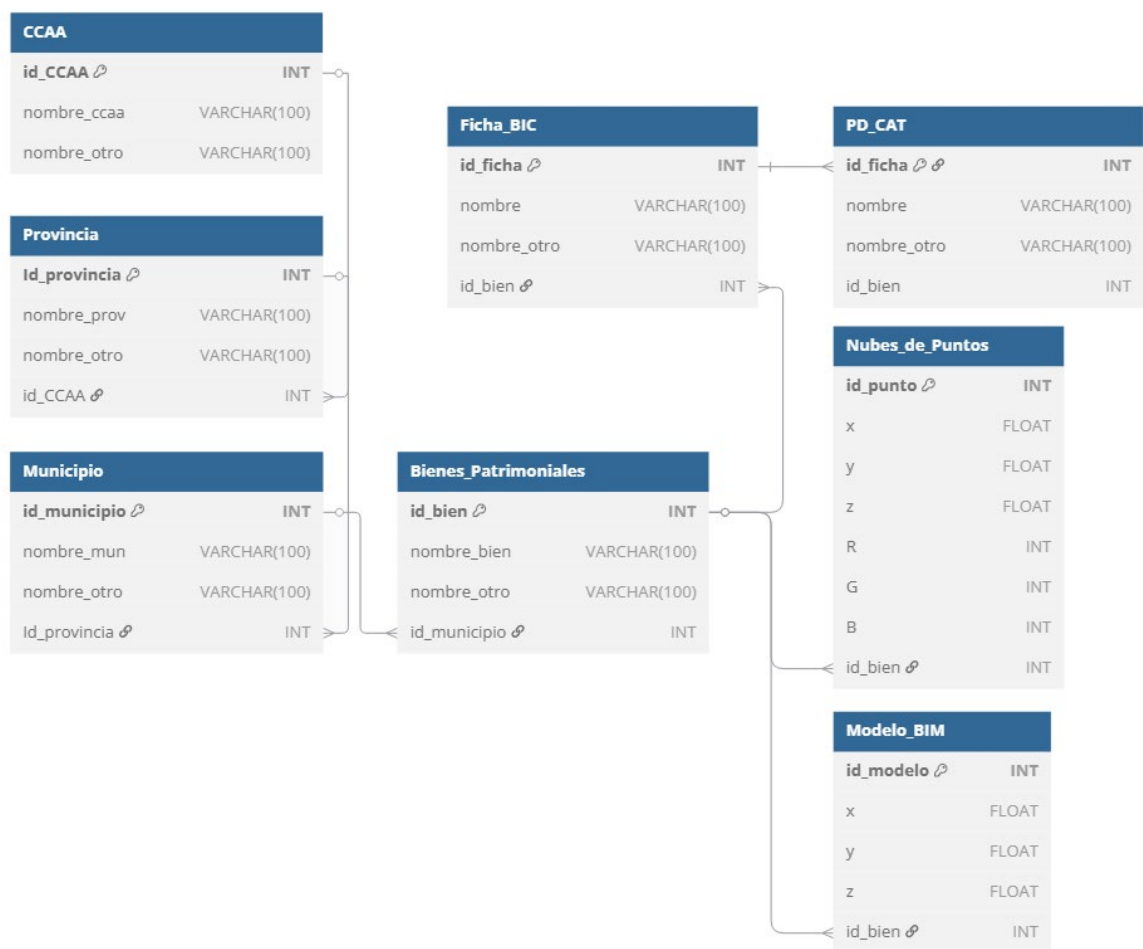


Figura 8.2: Base de datos relacional en SQL para una estructura básica de un Plan Director (elaboración propia).

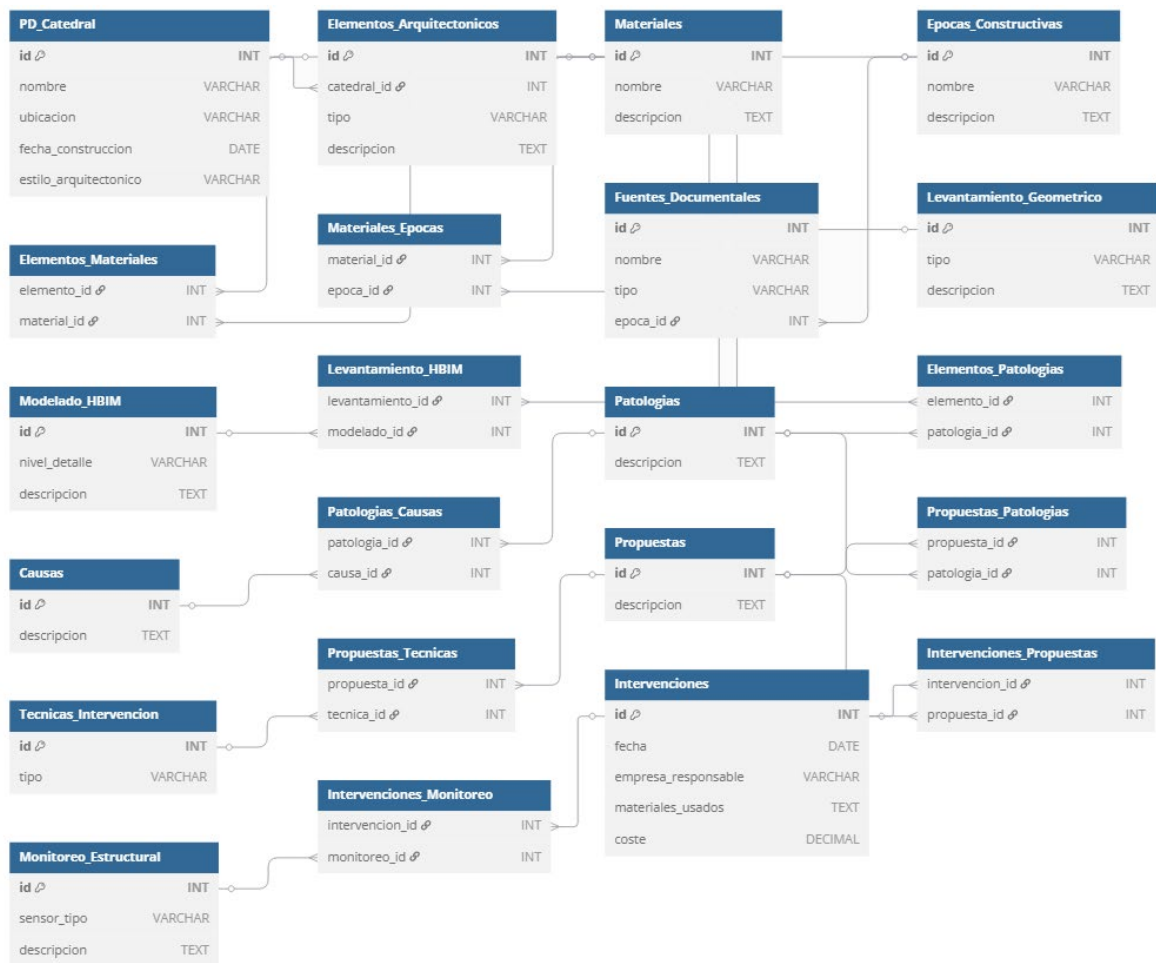


Figura 8.3: Base de datos relacional en SQL de un Plan Director para una catedral (elaboración propia).

Posteriormente, se desarrolló una ontología que actúa como una capa semántica sobre la base de datos SQL, proporcionando un modelo conceptual que interpreta y relaciona la información de manera más significativa. La ontología permite establecer conexiones entre distintos elementos del Plan Director, facilitando la interoperabilidad y la consulta avanzada de datos mediante razonamiento semántico. A continuación, se presenta un ejemplo de cómo las ontologías pueden integrarse en un modelo relacional:

(A) Identificación: define los elementos del edificio y sus características principales.

- Catedral (nombre, ubicación, fecha de construcción, estilo arquitectónico).
- Elementos arquitectónicos (muros, bóvedas, pilares, cubiertas, etc.).
- Materiales (piedra, madera, metal, vidrio, etc.).
- Épocas constructivas (románico, gótico, renacentista, barroco, etc.).

Relaciones:

- Cada Catedral tiene múltiples Elementos arquitectónicos.
- Cada Elemento arquitectónico está compuesto por Materiales.
- Cada Material está asociado a una Época constructiva.

(B) Estudio: análisis de la documentación y levantamiento geométrico.

- Fuentes documentales (archivos históricos, bibliografía, planos antiguos).
- Levantamiento geométrico (nube de puntos, fotogrametría, escáner láser).
- Modelado HBIM (LOD).
- Análisis estructural (estado de conservación, carga, deformaciones).

Relaciones:

- Cada Fuente documental está asociada a una Época constructiva.
- El Levantamiento geométrico se vincula al Modelado HBIM.
- El Modelado HBIM permite el Análisis estructural.

(C) Diagnóstico: evaluación del estado de conservación y detección de patologías.

- Patologías (fisuras, humedades, pérdida de material, deformaciones).
- Causas (erosión, sismos, humedad, intervenciones previas).
- Grado de afección (leve, moderado, grave).

Relaciones:

- Cada Elemento arquitectónico puede presentar una o varias Patologías.
- Cada Patología tiene una Causa asociada.
- Cada Patología se clasifica según su Grado de afección.

(D) Propuesta: definición de estrategias de conservación y restauración.

- Técnicas de intervención (limpieza, consolidación, refuerzo estructural).
- Materiales de restauración (compatibilidad con los originales).
- Criterios de intervención (mínima intervención, reversibilidad, autenticidad).

Relaciones:

- Cada Propuesta está asociada a una o varias Patologías.
- Cada Propuesta emplea Técnicas de intervención y Materiales de restauración.
- Cada Técnica de intervención sigue ciertos Criterios de intervención.

(E) Intervención: ejecución y documentación de las obras de restauración.

- Registro de intervenciones (fecha, empresa responsable, materiales usados).
- Fotografía y documentación (antes, durante y después de la intervención).
- Coste y financiación (presupuesto, subvenciones, inversión privada).

Relaciones:

- Cada Intervención tiene un Registro y una Documentación fotográfica.
- Cada Intervención tiene un Coste asociado.

(F) Gestión: mantenimiento y monitoreo de la Catedral tras la intervención.

- Monitoreo estructural (sensores, análisis de deformaciones a lo largo del tiempo).
- Plan de mantenimiento (limpieza periódica, inspecciones técnicas).
- Gestión documental (digitalización de informes, integración en GIS).

Relaciones:

- Cada Intervención genera un Plan de mantenimiento.
- Los datos de Monitoreo estructural se integran en GIS y HBIM.
- La Gestión documental permite la consulta de todas las fases del Plan Director.

8.1.2. Tabla de correspondencia

La tabla de correspondencia se crea con el objetivo de establecer un vínculo claro entre las clases o entidades que componen cada etapa del Plan Director de Catedrales y los conceptos específicos dentro de la ontología asociada. Este proceso permite organizar y relacionar de manera estructurada la información contenida en el Plan Director con los elementos semánticos de la ontología, facilitando su interpretación y la integración de los datos de forma más coherente. De esta manera, la tabla de correspondencia actúa como un puente entre la estructura del Plan Director y el modelo semántico que mejora la consulta y análisis de los datos.

Para crear una tabla de correspondencias de una ontología basada en el Plan Director de Catedrales (Tabla 8.1), primero definimos las clases o entidades que componen cada etapa del Plan Director. Luego, asociamos estas clases a los elementos o conceptos específicos dentro de las categorías de la ontología.

Tabla 8.1: Correspondencia de una ontología.

Etapas del Plan Director	Clase en Ontología	Descripción	Relación con HBIM y GIS
Identificación	<i>Edificio, Elemento</i>	Definición del objeto de estudio: Catedral, sus elementos arquitectónicos.	Relación con los modelos 3D de HBIM para representar los elementos identificados.
Estudio	<i>Contexto Histórico, Condiciones Estructurales</i>	Análisis histórico y arquitectónico de la Catedral.	Enlace con bases de datos históricas y modelos GIS para visualización contextualizada.
Diagnóstico	<i>Patologías, Condiciones Actuales</i>	Identificación de patologías y el estado de conservación de los elementos.	Datos geométricos obtenidos de <i>Scan-to-BIM</i> o <i>Scan-to-CAD</i> para la identificación de deformaciones o patologías.
Propuesta	Propuesta de Intervención	Definición de acciones a realizar en la Catedral para su conservación.	Enlace con el modelo HBIM para planificar las intervenciones y evaluaciones futuras.
Intervención	<i>Trabajo Realizado, Restauración</i>	Ejecución de las propuestas de intervención.	Actualización de los modelos en HBIM y GIS con datos de intervención y seguimiento.
Gestión	<i>Plan de Gestión, Mantenimiento</i>	Planificación y ejecución del mantenimiento a largo plazo.	Integración de datos de gestión en plataformas GIS y HBIM para seguimiento y mantenimiento.

- **Etapas del Plan Director:** representa cada una de las fases que componen el Plan Director de Catedrales.
- **Clase en Ontología:** cada fase genera una serie de clases en la ontología que organizan y estructuran la información.
- **Descripción:** detalle de la información relevante que cada fase maneja o genera.
- **Relación con HBIM y GIS:** se describe cómo cada fase de la ontología se conecta con los sistemas GIS y HBIM, garantizando la interoperabilidad de los datos.

Este es un ejemplo general de cómo podría organizarse una tabla de correspondencias entre las etapas de un Plan Director y las clases de una ontología que gestionan la información en el contexto de la Catedral de Valencia. Dependiendo de la complejidad y de la cantidad de datos involucrados, la ontología podría extenderse o ajustarse para incluir más detalles o especificaciones.

8.1.3. Mapeo de la ontología base

Para implementar una herramienta de mapeo utilizando OWL (*Web Ontology Language*), necesitamos definir la ontología basada en el Plan Director de Catedrales y cómo se mapean sus clases y relaciones con la información geométrica y semántica de la Catedral de Valencia.

```
<!-- Definición de clases para el Plan Director -->
<rdf:Description rdf:about="#Edificio"/>
<rdf:Description rdf:about="#Elemento"/>

<!-- Relación entre Elemento y Patología -->
<rdf:Description rdf:about="#PilarPrincipal">
  <tienePatología rdf:resource="#Fisuras"/>
</rdf:Description>

<!-- Definición de Patología -->
<rdf:Description rdf:about="#Fisuras">
  <rdf:type rdf:resource="#Patología"/>
</rdf:Description>
```

Figura 8.6: Fragmento de código OWL en sintaxis RDF/XML (elaboración propia).

8.1.3.1. Descripción del código

- **Clases (Entidades):** se definen las clases como Edificio, Elemento, Patología, Intervención, Diagnóstico, Propuesta y Mantenimiento, que representan las diferentes etapas y elementos del Plan Director.
- **Propiedades (Relaciones):** se utilizan las propiedades como *tieneElemento*, *tienePatología*, *requiereIntervención*, etc., para establecer las relaciones entre las clases. Estas propiedades son clave para conectar los elementos del modelo.
- **Instancias:** se crean las instancias específicas para la Catedral de Valencia (CatedralDeValencia), un elemento de la catedral (PilarPrincipal), una patología detectada (Fisuras), una intervención propuesta (Restauración), etc.

En esta estructura, cada etapa del Plan Director se convierte en una clase en la ontología, y cada fase o acción específica en el plan se mapea a una instancia dentro de esas clases. Por ejemplo:

- En la fase de Identificación, se mapea el Edificio (como CatedralDeValencia) y sus Elementos (como PilarPrincipal).
- En la fase de Diagnóstico, se mapea una Patología detectada (como Fisuras) y se establece la relación con los Elementos afectados.
- En la fase de Propuesta e Intervención, se define la Intervención necesaria (como Restauración), y se vincula a los Elementos afectados y las Patologías detectadas.
- Finalmente, en la fase de Gestión, se define un Plan de Mantenimiento que puede vincularse a las intervenciones realizadas y a la información de seguimiento.

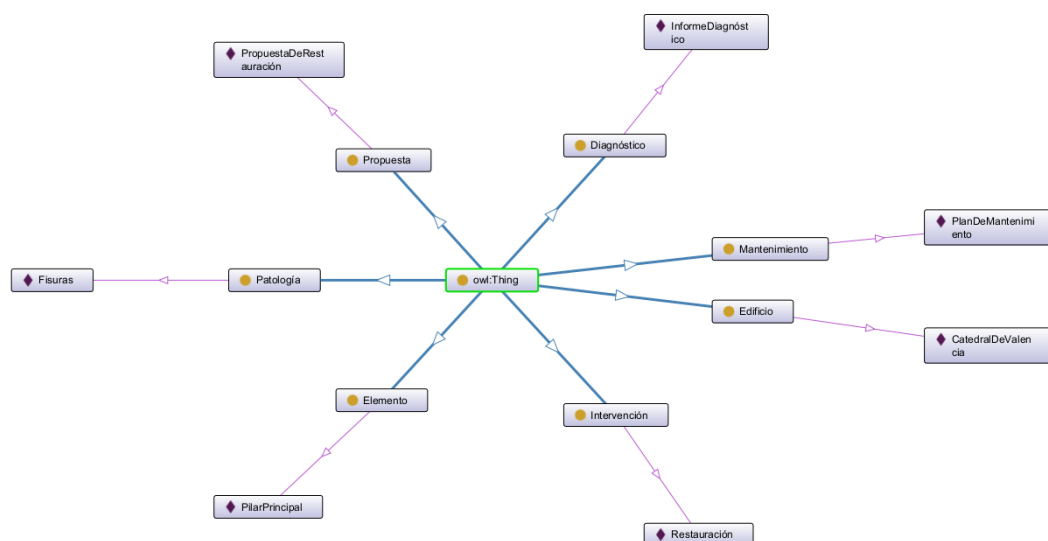
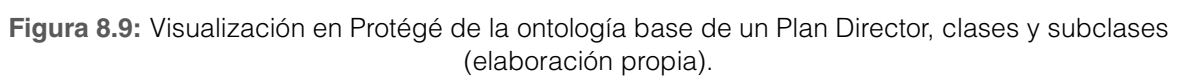
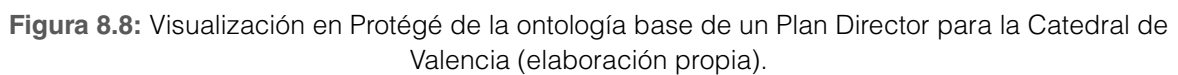


Figura 8.7: Ontología básica de un Plan Director (elaboración propia).



8.2. Integración con HBIM, GIS, nubes de puntos y otras bases de datos

La ontología desarrollada en OWL facilita la integración de datos en plataformas HBIM y GIS, garantizando la interoperabilidad entre distintos entornos digitales. Los modelos HBIM proporcionan una representación geométrica detallada de los elementos arquitectónicos, mientras que los sistemas GIS contextualizan esta información en el espacio geográfico de la Catedral.

A través de la ontología, los modelos 3D y las capas GIS se enriquecen con datos semánticos, permitiendo vincular información clave como patologías, intervenciones históricas y estrategias de conservación. Además, la integración con nubes de puntos y bases de datos documentales mejora la precisión del análisis y la trazabilidad de la información, optimizando la gestión del patrimonio arquitectónico en un entorno digital unificado.

8.2.1. Creación de datos clave

Para garantizar la interoperabilidad entre las diferentes plataformas utilizadas en la documentación y gestión del patrimonio arquitectónico, es fundamental establecer datos clave que permitan la vinculación entre modelos HBIM, GIS, nubes de puntos y bases de datos. A continuación, se definen los principales datos de enlace en cada plataforma:

1. HBIM

- Identificador único del elemento (ID_BIM) → Relaciona cada componente arquitectónico con su información en la ontología.
- Coordenadas de referencia → Permiten la geolocalización del elemento en el espacio del modelo.
- Fase constructiva → Relaciona el objeto con su contexto histórico y temporal.
- Material y estado de conservación → Datos esenciales para análisis patrimonial y planificación de intervenciones.
- Relación con otros elementos → Conexiones jerárquicas (muros, bóvedas, columnas, pavimentos, etc.).

2. GIS

- Coordenadas geográficas (Latitud, Longitud, Altitud - EPSG:25830 u otro sistema de referencia) → Enlace con HBIM y nubes de puntos.
- ID_GIS → Identificador único del objeto en la base de datos geoespacial.
- Capa temática (constructiva, patológica, documental, intervenciones) → Clasificación de los datos en el sistema GIS.

- Relación con el parcelario y contexto urbano → Integración con cartografía histórica y normativa vigente.

3. Nubes de Puntos

- Coordenadas X, Y, Z (Sistema de referencia geoespacial) → Vínculo con GIS y HBIM.
- Intensidad del retorno del escáner → Información útil para análisis de materiales y patologías.
- Clasificación de puntos → Segmentación en elementos arquitectónicos (muros, bóvedas, pavimentos, etc.).
- ID_Cluster → Relación con los procesos de segmentación y detección de formas geométricas.

4. Bases de Datos Documentales

- ID_Documento → Identificador único en la base de datos (puede incluir metadatos de origen y fecha).
- Elemento asociado → Vínculo con el ID_BIM o ID_GIS correspondiente.
- Fecha y autor del documento → Información clave para la trazabilidad de estudios e intervenciones.
- Tipo de documento (planos históricos, informes técnicos, registros fotográficos, etc.).
- Fuentes y referencias bibliográficas → Relación con otras investigaciones sobre la Catedral.

El uso de estos datos clave permite establecer una vinculación entre plataformas, facilitando una gestión integrada y coherente de la información patrimonial. La estructura ontológica garantiza la interoperabilidad de la Catedral Metropolitana de Valencia en entornos digitales unificados.

8.3. Integración de datos geométricos y semánticos

La integración de datos geométricos y semánticos es clave para optimizar la gestión y conservación del patrimonio arquitectónico. A través de una ontología se puede asociar información geoespacial (como las coordenadas o modelos 3D) con propiedades semánticas que brindan contexto y significado a esos datos. Esta asociación permite enriquecer la visualización y el análisis de los datos, garantizando que no solo se cuente con la geometría de los elementos arquitectónicos, sino también con información relevante sobre su estado, materiales, intervenciones previas y contexto legal.

La ontología establece relaciones lógicas entre la geometría de los objetos y el contexto histórico, material y jurídico asociado a ellos. Esta integración permite que cada dato geométrico, como las coordenadas XYZ de un muro, un modelo 3D de un capitel o un polígono GIS de un entorno, esté vinculado a propiedades semánticas que describen las características y el estado de esos elementos.

Por ejemplo, las coordenadas XYZ de un muro se pueden asociar con la propiedad semántica *Material*, en la que se indica que el muro está compuesto de *mampostería*. Esta relación se define mediante una propiedad ontológica como *hasMaterial*, que vincula la geometría del muro con el material de construcción. De manera similar, un modelo 3D de un capitel puede tener asociada una propiedad que indique una *Intervención previa*, como una restauración realizada en 1995, a través de la propiedad *hasIntervencion*, que conecta la geometría del capitel con el contexto histórico de esa intervención.

Por ejemplo, el polígono GIS correspondiente al entorno de un bien patrimonial puede vincularse semánticamente con una propiedad que indique su grado de protección, como la categoría de Bien de Interés Cultural (BIC). Esta asociación se establece mediante la propiedad *tieneProteccionJuridica*, que conecta los datos espaciales del polígono con la normativa legal aplicable. Del mismo modo, si se escanea el cimborrio de la catedral mediante tecnología láser, generando una nube de puntos, dicha información geométrica puede ser vinculada a la clase *ElementoEstructural* dentro de la ontología, identificando esos puntos como parte de un componente estructural específico del edificio. A su vez, se pueden asignar propiedades semánticas como *tieneEstadoConservacion*, con valores como “fisuras_activas”, o *tieneRiesgo*, con valores como “inestabilidad_estructural”, describiendo así tanto el estado actual como los posibles riesgos asociados. Esta integración entre datos geométricos y semánticos no solo mejora la visualización y comprensión de los elementos patrimoniales, sino que también proporciona una herramienta eficaz para el análisis y la toma de decisiones en procesos de conservación y gestión preventiva.

Así, se constata, por fin, que la integración de datos geométricos y semánticos a través de una ontología permite que la información técnica y contextualmente rica se gestione de manera más eficiente. Eso favorece la conservación, restauración y el monitoreo de los elementos arquitectónicos, permitiendo que sean realizados de forma precisa y con un contexto completo.

8.4. Implementación de la ontología

A partir del estudio de las estructuras de datos vinculadas al patrimonio cultural, y en particular de los bienes inmuebles como la Catedral de Valencia —incluida en el Plan Nacional de Catedrales—, se desarrollan diversos grafos que permiten organizar y estructurar la información patrimonial de forma coherente y relacional. Estos grafos recogen datos desde distintas dimensiones y sirven como base para su posterior integración mediante una ontología, que unifica los distintos nodos y relaciones bajo un marco semántico común, facilitando así una comprensión holística y la interoperabilidad de los datos.

A lo largo de esta sección se presentan una serie de grafos que representan la estructura de datos del patrimonio cultural inmueble, tomando como caso de estudio la Catedral de Valencia y su vinculación con el Plan Nacional de Catedrales. Cada uno de estos grafos ha sido desarrollado a partir del análisis y extracción de información contenida en documentos clave como el Plan Director, el Plan Especial de Protección de Ciutat Vella, el visor GVA de Bienes de Interés Cultural, así como modelos GIS y HBIM estructurados en torno a estándares como IFC.

Los grafos generados (Figuras 8.10 a 8.19) permiten visualizar de forma estructurada las relaciones entre agentes intervinientes, espacios arquitectónicos, elementos constructivos y sistemas de documentación patrimonial. Esta organización relacional facilita la interoperabilidad entre distintas fuentes de información y niveles de detalle, desde la escala territorial hasta la del elemento constructivo.

En la Figura 8.20 se presenta un esquema de síntesis donde se integran las diferentes estructuras de grafos previamente descritas, sentando las bases para la creación de una ontología patrimonial coherente y escalable. Finalmente, la Figura 8.21 muestra un ejemplo de consulta, donde la información asociada a un punto específico puede ser recuperada de manera estructurada gracias a la ontología resultante, evidenciando el potencial del sistema para la gestión, análisis y visualización del conocimiento patrimonial.



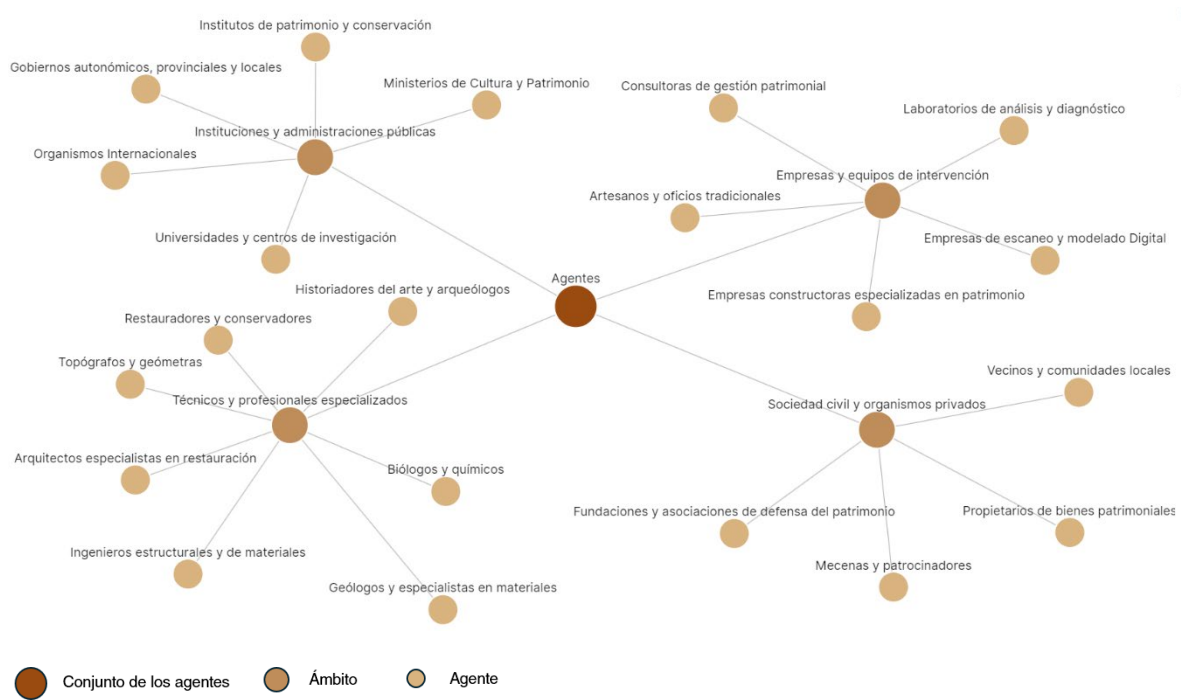


Figura 8.12: Grafo de datos de los agentes intervinientes (elaboración propia).

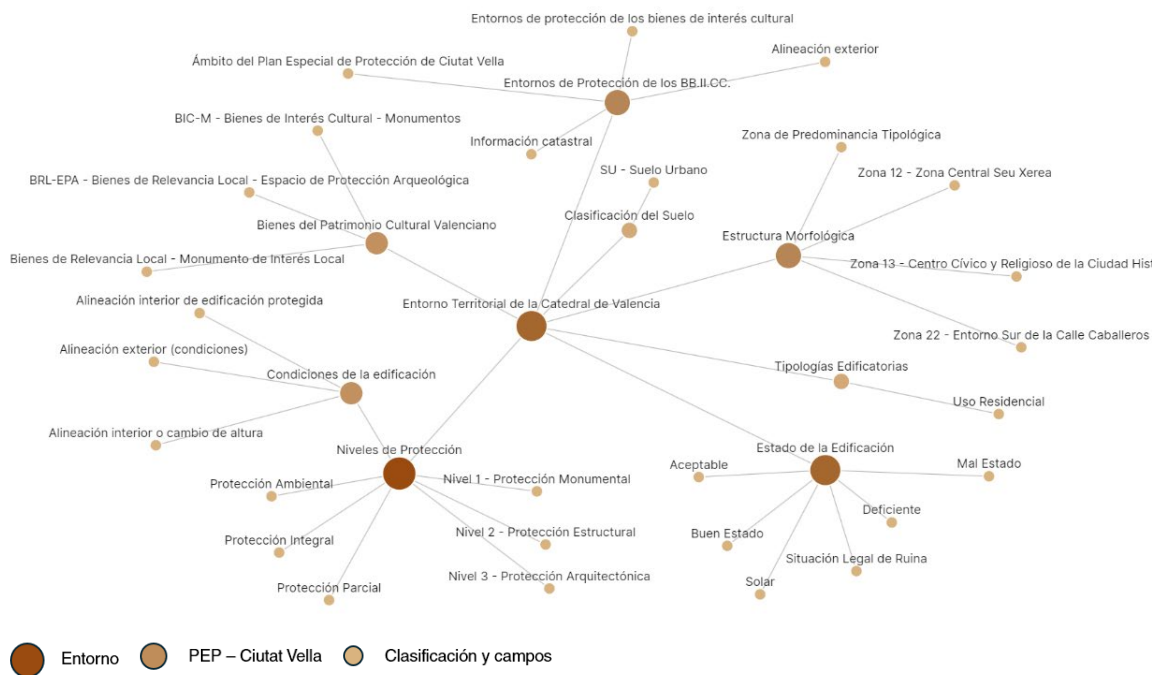


Figura 8.13: Grafo de datos del modelo GIS basado en la información del Plan Especial de Protección Ciutat Vella de Valencia (elaboración propia).

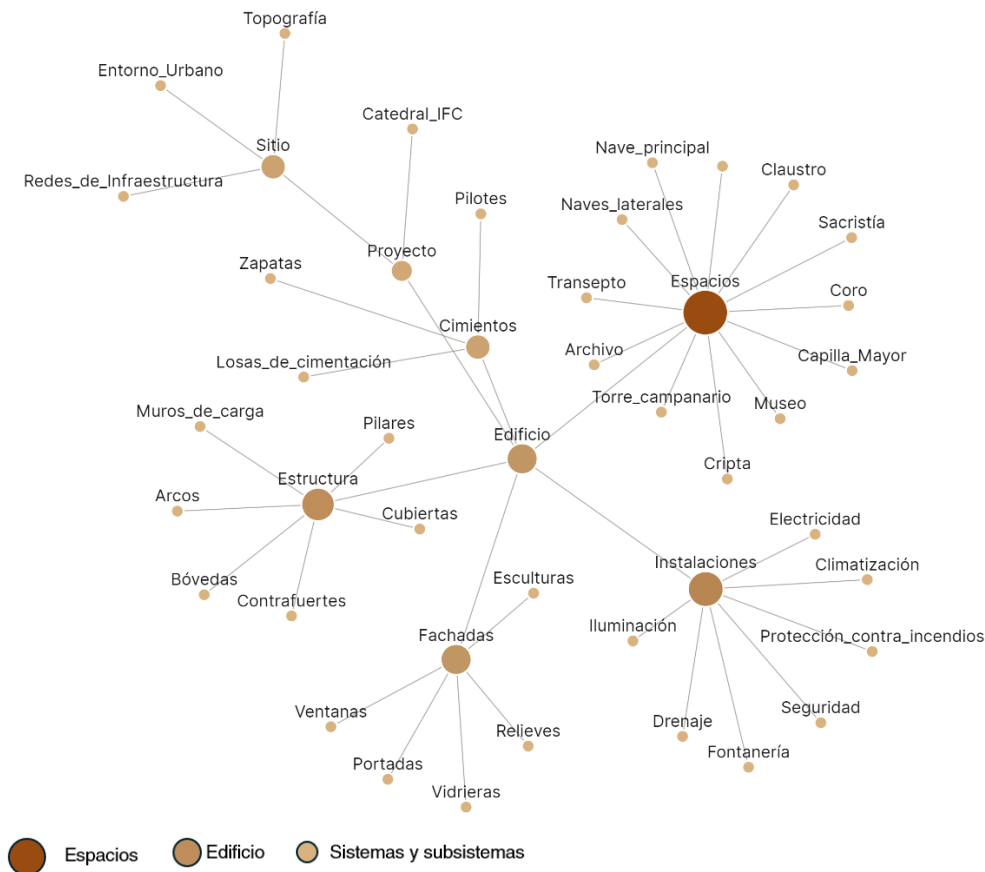


Figura 8.14: Grafo básico de datos del modelo HBIM basado en la estructura IFC (elaboración propia).

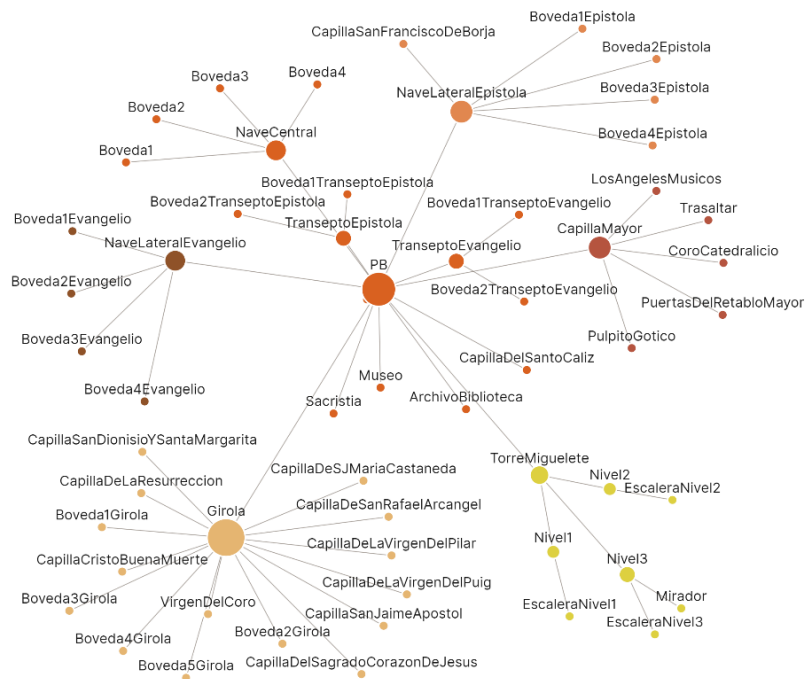


Figura 8.15: Grafo básico de los espacios de la Catedral de Valencia organizado por niveles > unidad espacial > recintos (elaboración propia).

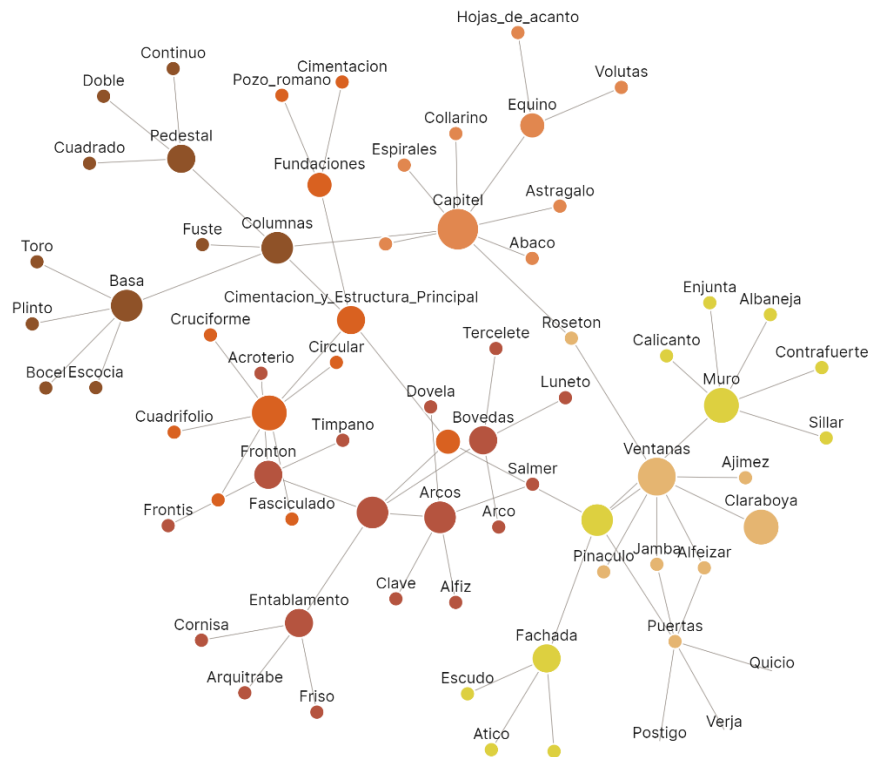


Figura 8.18: Grafo básico de los elementos constructivos, sistemas, subsistemas y elementos (elaboración propia).

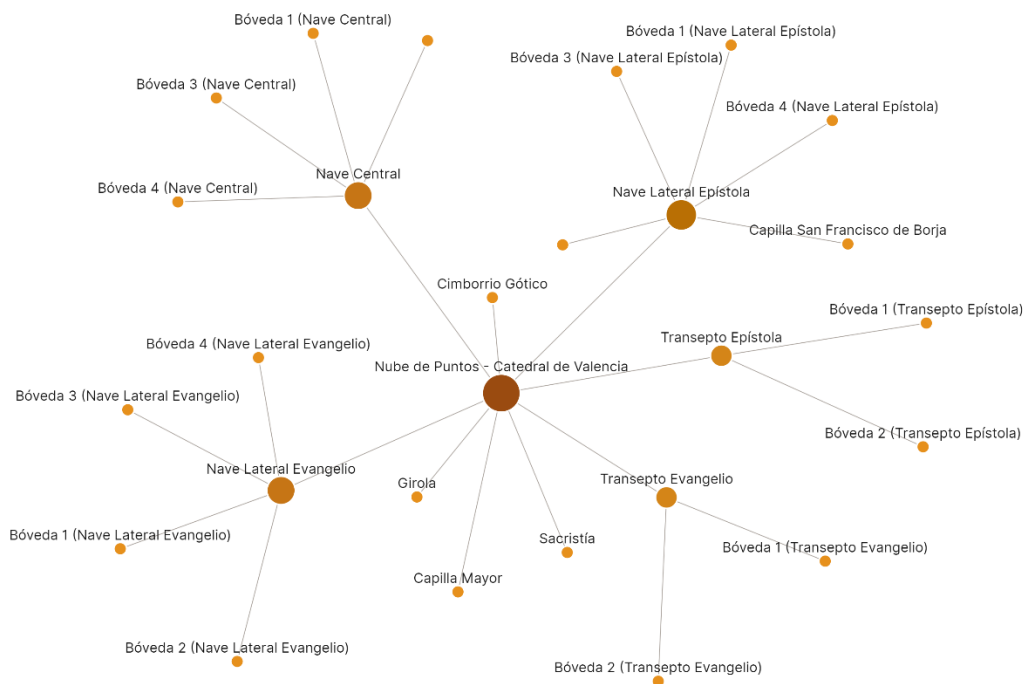


Figura 8.19: Grafo básico de la estructura de nube de puntos, unidad espacial y espacio (elaboración propia).

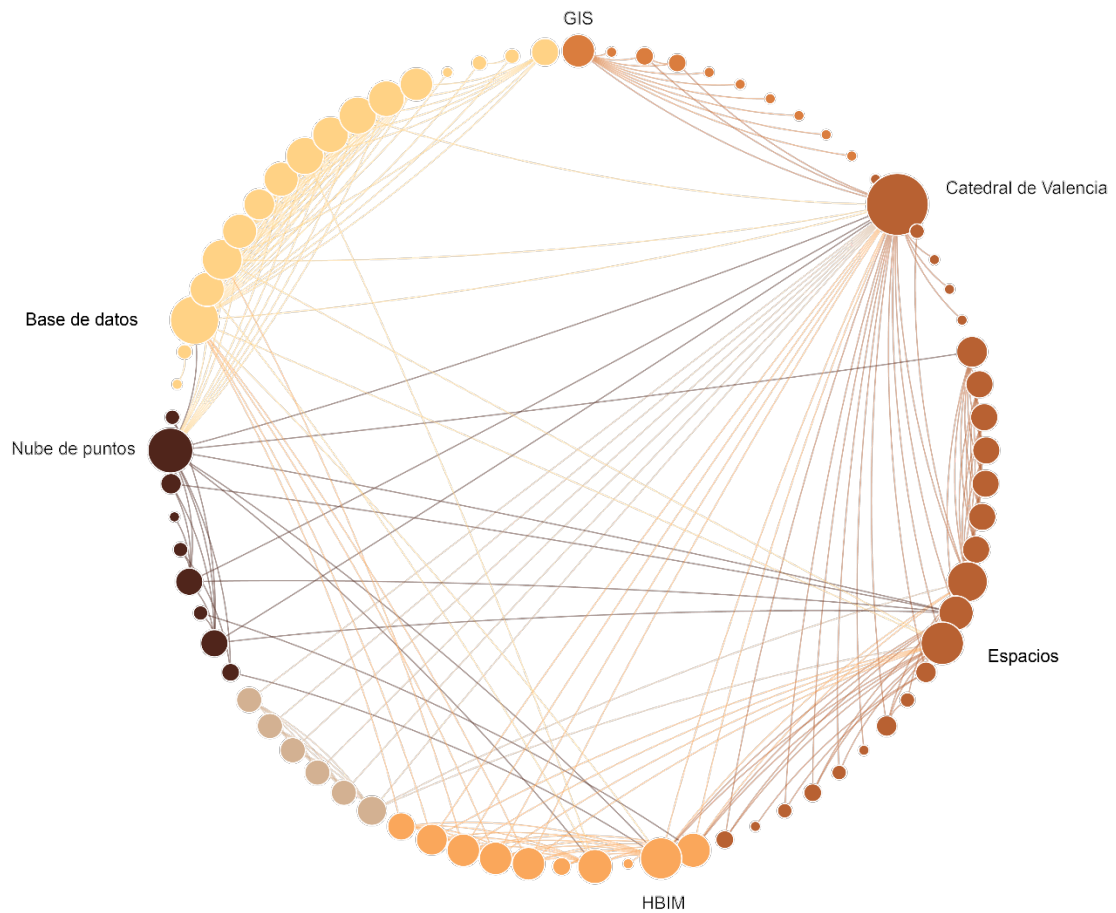


Figura 8.20: Esquema de relación entre las diferentes estructuras de grafos para la creación de la ontología (elaboración propia).

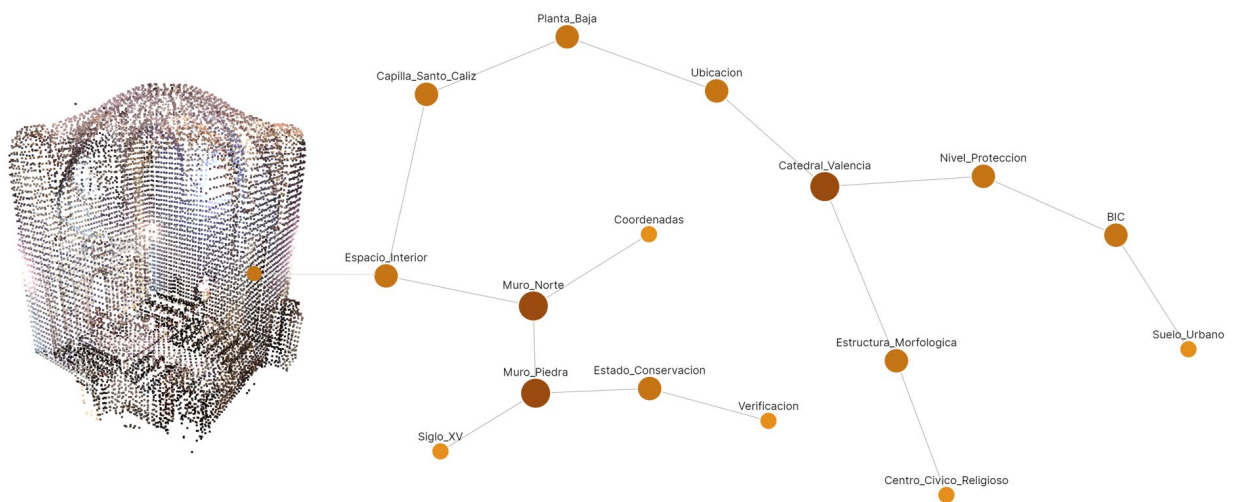
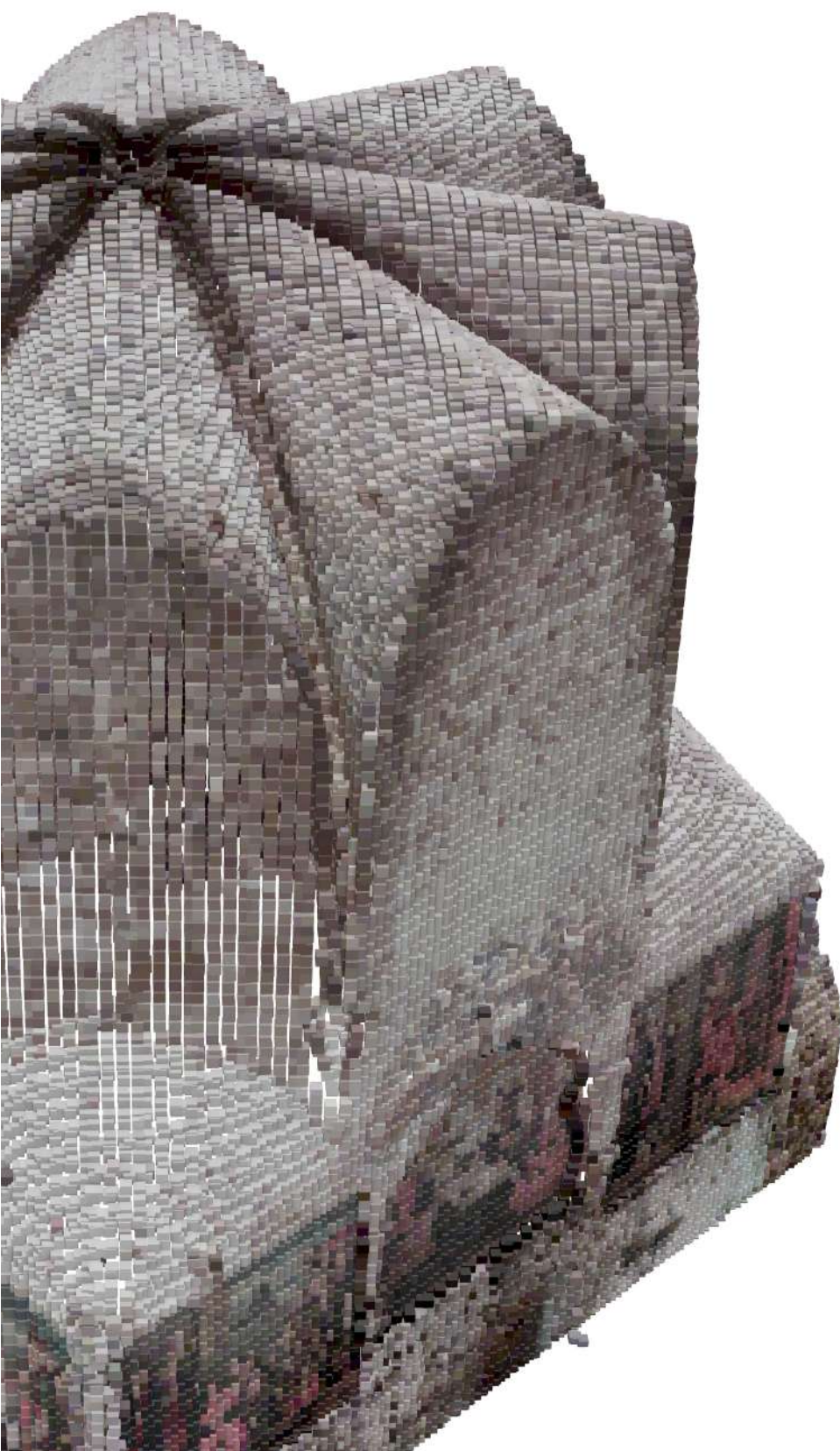


Figura 8.21: Esquema de consulta de un punto y recuperación de información desde la ontología (elaboración propia).

Capítulo 9. Síntesis y contribuciones



Capítulo 9: Síntesis y contribuciones

9.1. Síntesis

Este trabajo constituye un marco de referencia para la gestión y estructuración de la información de los bienes patrimoniales, proporcionando una base metodológica que puede facilitar la aplicación de tecnologías digitales avanzadas como las ontologías y la inteligencia artificial. Lejos de pretender abarcar la totalidad del proceso, dada su inherente complejidad, la investigación se centró en identificar y analizar los componentes clave que permiten una integración efectiva de datos alfanuméricos, geográficos y geométricos en la gestión del patrimonio arquitectónico.

El estudio partió de la premisa de que la conservación y documentación del patrimonio inmueble exige un enfoque multidisciplinar, en el que convergen profesionales de diversas áreas del conocimiento. En este contexto, la investigación buscó acercar la implementación tecnológica a la gestión patrimonial, proporcionando herramientas y estrategias que favorezcan su aplicación en entornos reales.

Para ello, se desarrolló una metodología que integre los datos provenientes de modelos BIM, GIS, nubes de puntos y ontologías semánticas, con el propósito de mejorar la interoperabilidad entre las distintas plataformas digitales empleadas en la documentación y conservación de bienes patrimoniales. Esta metodología se validó mediante la experimentación en la Catedral Metropolitana de Valencia, lo que permitió evaluar su eficacia en la integración de datos multiescales en un contexto patrimonial real a partir de buscar integrar y estructurar la información necesaria para la elaboración de un Plan Director.

Los resultados obtenidos demostraron que la integración de HBIM, GIS y ontologías semánticas no solo optimiza la estructuración, acceso y gestión de la información patrimonial, sino que también mejora significativamente la eficiencia en los procesos de documentación y análisis del patrimonio edificado. Esta sinergia tecnológica facilita la toma de decisiones fundamentadas en materia de conservación y restauración, al tiempo que proporciona un marco metodológico sólido para la gestión patrimonial digital.

Esta propuesta se sustenta en la necesidad de centralizar la información del bien patrimonial, permitiendo su consolidación en un entorno interoperable que integre datos procedentes de múltiples fuentes. En este sentido, la recuperación de información desde repositorios digitales existentes juega un papel clave, al facilitar el acceso a datos históricos, normativos y técnicos previamente documentados, enriqueciendo así el proceso de análisis y gestión patrimonial.

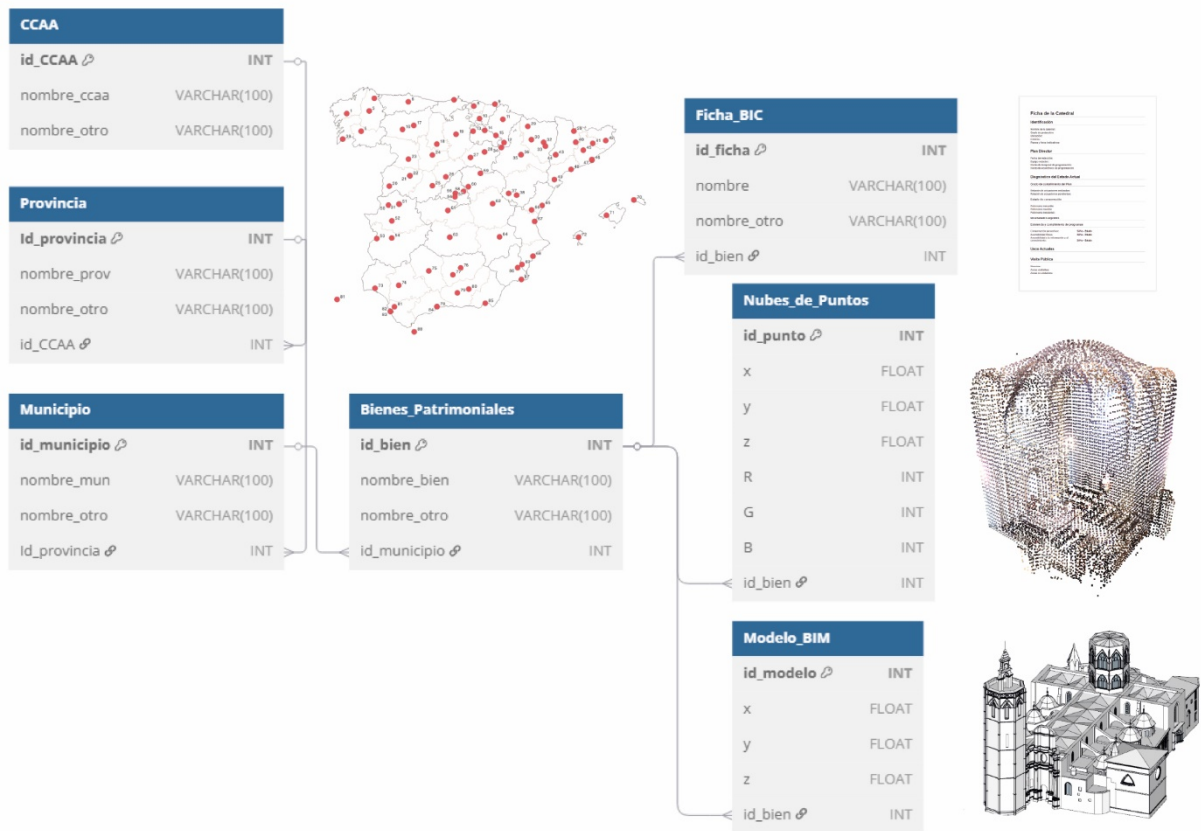


Figura 9.1: Síntesis del modelo de integración de datos (elaboración propia).

A futuro, se vislumbra un escenario en el que la información patrimonial esté completamente integrada en visores interactivos y repositorios digitales interconectados, garantizando un acceso unificado y dinámico a los datos. En este contexto, el papel de la Inteligencia Artificial y las ontologías semánticas será crucial, ya que permitirán la automatización de la clasificación, vinculación y análisis de la información, optimizando los procesos de documentación y facilitando nuevas estrategias para la conservación y difusión del patrimonio arquitectónico.

9.2. Flujo de trabajo

Efectuando una síntesis de la metodología desarrollada a lo largo de nuestra investigación, se basa en un flujo de trabajo general que es complementado con flujos específicos, abordando desde la captura de datos hasta su estructuración y análisis mediante bases de datos SQL y ontologías semánticas:

1. Flujo General

1.1 Articulación de escalas (Edificio, Ciudad, Territorio)

- Recopilación y generación de datos geospaciales de bienes inmuebles.
- Creación de una base de datos SQL espacial en un Sistema de Gestión de Bases de Datos (SGBD), integrando información de diferentes fuentes.

1.2 Integración de datos multiescala

- Desarrollo de un modelo conceptual que conecta fichas de catálogo, CAD, BIM, GIS y nubes de puntos.

1.3 Captura y procesamiento de datos

- Escaneo láser terrestre y fotogrametría para obtención de nubes de puntos.
- Registro, limpieza y georreferenciación de la nube de puntos.

1.4 Estructuración e interoperabilidad de la base de datos

- Diseño de una base de datos en SQL para organizar información geométrica y semántica de los elementos patrimoniales.
- Tablas relacionales que incluyen:
- **Edificios:** ID, nombre, ubicación, año de construcción.
- **Elementos arquitectónicos:** ID, tipo, material, relación con el edificio.
- **Nube de puntos:** ID, coordenadas XYZ, color RGB, referencia a elementos.

1.5 Generación de Ontologías para Interoperabilidad Semántica

- Creación de una ontología en RDF/OWL para estructurar la información del patrimonio.
- Definición de entidades y relaciones en base a vocabularios controlados (CIDOC CRM, IfcOWL).
- Asociación con bases de datos SQL, permitiendo consultas semánticas mediante SPARQL.

- Automatización con IA para generación de relaciones jerárquicas y validación ontológica.

2. Flujos Específicos

2.1 *Scan-to-CAD* para pavimentos, cubiertas y muros

- Filtrado de puntos según altura.
- Generación de polígonos y exportación a DXF.

2.2 Segmentación con DBSCAN y K-means

- Agrupamiento de puntos coplanares.

2.3 *Scan-to-HBIM*

- Procesamiento de nube de puntos.
- Conversión en formatos compatibles.
- Generación de geometrías con atributos RGB y exportación a GIS.

2.4 Detección automática de patologías

- Segmentación de superficies y análisis colorimétrico.
- Integración de información patológica en BIM.

2.5 Generación automatizada de fichas HBIM

- Modelado geométrico 3D con información semántica.
- Creación de bases de datos SQL y ontologías RDF/OWL.
- Automatizaciones para la extracción de datos y generación de fichas con imágenes y parámetros estructurados.

9.3. Aportaciones

Se considera que la investigación aportó avances sustanciales en el ámbito de la gestión y conservación del patrimonio arquitectónico mediante el empleo de tecnologías digitales de última generación. En primer lugar, se desarrolló un modelo ontológico que integra de manera efectiva datos multiescalares, permitiendo una organización coherente y precisa de la información estructurada según el esquema de un Plan Director, y eliminando las barreras de interoperabilidad existentes entre sistemas heterogéneos. Este modelo sienta las bases para una documentación más sistemática y detallada del patrimonio.

Asimismo, se diseñó y validó una metodología integral que fusiona herramientas como BIM, GIS, nubes de puntos y ontologías semánticas. La aplicación de esta metodología en el estudio de caso de la Catedral Metropolitana de Valencia demostró, en un entorno real, su capacidad para documentar, analizar y conservar edificaciones históricas con altos niveles de precisión y eficacia. Esta estrategia metodológica no solo ha facilitado la integración de datos geométricos y semánticos, sino que también ha optimizado la toma de decisiones en la gestión patrimonial, abriendo la puerta a futuras mejoras en la estructura de los Planes Directores de Catedrales mediante la incorporación de tecnologías digitales.

Además, también se exploró el papel transformador de la Inteligencia Artificial en la estructuración semántica y automatización de procesos, lo que ha permitido la identificación de patrones estructurales y la detección automática de patologías en las estructuras patrimoniales. De manera complementaria, se estableció una metodología para la integración de nubes de puntos en flujos de trabajo CAD y BIM, logrando documentar edificaciones históricas con una precisión sin precedentes.

Adicionalmente, se desarrollaron fichas informativas basadas en modelos HBIM que facilitan la consulta y gestión de datos, haciendo la información más accesible para conservadores, investigadores y gestores. Por último, la aplicación de tecnologías semánticas y los principios de *Linked Open Data* fortalecieron la interoperabilidad de repositorios digitales, impulsando la creación de un entorno global en el que la información patrimonial se integra de manera unificada y escalable.

9.4. Conclusiones y futuras líneas de investigación

La investigación sobre la integración multiescala de datos para la gestión del patrimonio arquitectónico representa un avance paradigmático en la conservación del legado histórico. Al superar los desafíos técnicos, metodológicos y normativos, se estableció un marco semántico unificador capaz de transformar datos fragmentados en conocimiento accionable. La aplicación del modelo ontológico, combinada con la metodología validada en la Catedral Metropolitana de Valencia, evidenció que es posible optimizar procesos críticos como la documentación, la detección de patologías y la planificación de intervenciones, elevando la precisión y eficacia en la gestión del patrimonio.

Sin embargo, el estudio también enfrentó diversas dificultades, entre ellas, la integración de fuentes de datos heterogéneas y la necesidad de adaptar los modelos a contextos específicos. Estos desafíos resaltan la importancia de seguir desarrollando estándares más flexibles y adaptables para la gestión de la información sobre el patrimonio. En comparación con enfoques previos, este estudio ha demostrado que la integración multiescala puede mejorar significativamente la eficiencia en la conservación, pero todavía existen retos en cuanto a la interoperabilidad de los sistemas.

Asimismo, es crucial que las bases de datos públicas contemplen modelos como el propuesto, ya que no solo optimizan la gestión de bienes patrimoniales a nivel local, sino

que permiten su aplicación a gran escala, promoviendo una conservación más eficiente y accesible. La colaboración interinstitucional y el acceso a datos abiertos son fundamentales para garantizar la sostenibilidad de los esfuerzos de conservación a largo plazo.

La sinergia entre tecnologías emergentes —desde el escaneo láser hasta la inteligencia artificial— ha permitido automatizar la generación de fichas informativas y el análisis semántico de la información, facilitando así la toma de decisiones fundamentadas. Este enfoque no solo enriquece la accesibilidad y organización de la información para los diversos actores involucrados, sino que también potencia la colaboración interdisciplinaria, integrando aportes de arquitectos, historiadores, ingenieros y otros especialistas en un entorno digital cohesionado.

Además, la incorporación de ontologías y los principios de Linked Open Data ha sentado las bases para la creación de repositorios globales interoperables, capaces de preservar y compartir el conocimiento patrimonial a nivel internacional. Si bien persisten desafíos relacionados con la estandarización de formatos y la adaptación de marcos legales, las soluciones propuestas en este trabajo equilibran innovación y rigor en la preservación cultural.

Basadas en los avances de esta investigación, se proponen algunas líneas futuras de investigación, que podrían enriquecer y expandir el alcance del trabajo realizado:

1. Mejora de la integración y visualización de datos multiescala

Se podría profundizar en la investigación de nuevas metodologías y plataformas para la integración y visualización de datos multiescala, con el objetivo de crear soluciones interactivas que permitan la representación integral de información de diferentes tipos y escalas. Para ello, se pueden desarrollar plataformas avanzadas que integren modelos BIM, GIS, nubes de puntos, datos semánticos y otras fuentes de información complementarias.

La mejora en la interoperabilidad entre estos sistemas podría abordarse mediante el uso de nuevas arquitecturas de software, como plataformas basadas en la nube o sistemas distribuidos, que permitan a los profesionales acceder a una representación unificada y coherente del patrimonio desde diferentes niveles de detalle, desde el edificio individual hasta el contexto urbano o territorial.

Asimismo, se podría explorar la implementación de interfaces de usuario intuitivas y herramientas de visualización avanzada, como la realidad aumentada (AR) o la realidad virtual (VR), para facilitar la comprensión espacial de la información, permitiendo a los usuarios interactuar de manera dinámica con los modelos 3D del patrimonio y visualizar datos de forma contextualizada.

Además, se puede mejorar el rendimiento de estas plataformas mediante técnicas de optimización de datos, como el uso de compresión en tiempo real, el desarrollo de

algoritmos de visualización más eficientes y la mejora de la sincronización de datos entre diferentes fuentes. Esto facilitaría la toma de decisiones en tiempo real sobre intervenciones de conservación y restauración, reduciendo tiempos y costes asociados a la gestión del patrimonio arquitectónico.

2. Automatización de la clasificación y diagnóstico de patologías con Inteligencia Artificial

El avance de la Inteligencia Artificial y el aprendizaje profundo abre nuevas posibilidades para la automatización del diagnóstico de patologías en el patrimonio arquitectónico. Actualmente, existen sistemas basados en visión artificial y redes neuronales convolucionales (CNN) capaces de identificar daños estructurales en imágenes, pero su aplicación al ámbito patrimonial sigue siendo incipiente y fragmentada.

Un desarrollo más ambicioso implicaría la creación de modelos entrenados con grandes volúmenes de datos específicos de patrimonio arquitectónico, incluyendo imágenes multiespectrales, termografía, escaneos láser y datos históricos de intervenciones previas. La combinación de estas fuentes permitiría la identificación precisa de patologías como fisuras, humedades, biodeterioro o desprendimientos, proporcionando análisis en tiempo real con un alto grado de fiabilidad.

Además, la integración de estos sistemas con herramientas BIM y GIS permitiría georreferenciar los diagnósticos y registrar la evolución de los daños a lo largo del tiempo. Un sistema de este tipo podría no solo detectar patologías, sino también predecir su evolución, generando alertas tempranas y facilitando una planificación más eficiente de las intervenciones de conservación.

Para que esta tecnología tenga un impacto real, es fundamental desarrollar bases de datos de referencia que permitan entrenar modelos de IA con datos patrimoniales de diferentes regiones y tipologías constructivas. La colaboración entre instituciones, universidades y organismos de conservación sería clave para estandarizar criterios y mejorar la precisión de los diagnósticos automatizados.

3. Desarrollo de estándares internacionales para la interoperabilidad

La interoperabilidad sigue siendo un reto importante, especialmente en un contexto global. Fomentar el desarrollo de estándares abiertos que integren tecnologías como BIM, GIS, ontologías semánticas y nubes de puntos podría permitir la creación de repositorios globales interoperables que unifiquen los datos de patrimonio a nivel internacional. La colaboración entre diferentes países y disciplinas sería clave para la consolidación de estos estándares.

Es cierto que existen diferentes estándares internacionales, pero aún no han sido plenamente desarrollados para este propósito. A pesar de estos avances, la creación de los mencionados repositorios globales interoperables que unifiquen los datos de patrimonio a nivel internacional requiere una colaboración más estrecha entre países y

disciplinas. Esta colaboración debe enfocarse en la adopción y adaptación de estos estándares, asegurando su aplicabilidad y eficacia en la gestión del patrimonio arquitectónico.

4. Implementación de plataformas de datos abiertos para la gestión del patrimonio

La creación de plataformas basadas en datos abiertos específicos para el patrimonio arquitectónico como tesauros y ontologías predefinidas permitiría la recopilación y el acceso a información del patrimonio arquitectónico de manera más eficiente. Estas plataformas podrían estar vinculadas a la infraestructura del gobierno digital y ofrecer acceso gratuito y en tiempo real a datos sobre el estado de conservación, intervenciones realizadas, e incluso información histórica y cultural de los bienes patrimoniales.

5. Desarrollo de modelos predictivos para la conservación proactiva

Aunque las tecnologías necesarias para el desarrollo de modelos predictivos ya están disponibles, su implementación en la conservación patrimonial aún está en sus primeras etapas. La combinación de datos históricos, actuales y en tiempo real, junto con herramientas avanzadas de análisis y aprendizaje automático, abre la posibilidad de crear modelos que anticipen de manera proactiva las necesidades de intervención en los bienes arquitectónicos. Estos modelos podrían basarse en factores como el desgaste de los materiales, las condiciones climáticas y las patologías detectadas, permitiendo planificar acciones preventivas antes de que los daños sean graves. Si bien ya existen las herramientas tecnológicas para llevar a cabo este tipo de iniciativas, su adopción generalizada y la implementación práctica de estos modelos depende de una mayor colaboración entre expertos en patrimonio, ingenieros y desarrolladores, se considera que es solo cuestión de tiempo.

6. Colaboración internacional para la creación de un catálogo global de patrimonio

Es cierto que ya existen plataformas aisladas que operan a nivel nacional, provincial o mediante organismos internacionales, pero la digitalización del patrimonio aún se encuentra en una etapa temprana de desarrollo. A pesar de los avances, la integración global de estos datos sigue siendo un desafío significativo. Una línea futura particularmente interesante sería la creación de un catálogo global de patrimonio arquitectónico que combine datos de todo el mundo, integrando fuentes tanto locales como internacionales. Este esfuerzo colaborativo, que reuniría el conocimiento de diversas culturas y contextos, podría ser un catalizador para la protección global del patrimonio cultural. Además, facilitaría el intercambio de conocimientos y experiencias, y promovería un enfoque más holístico en la conservación, permitiendo una mayor eficiencia y eficacia en la preservación de nuestros legados históricos. Aunque la tecnología necesaria para llevar a cabo este proyecto está disponible, el reto radica en establecer un marco de colaboración internacional que unifique estos esfuerzos y garantice su aplicación práctica y sostenible. Este tipo de iniciativas impulsaría la creación de entornos más sostenibles, accesibles y efectivos para la conservación del patrimonio arquitectónico, contribuyendo al fortalecimiento del legado cultural global.



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

