

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD
CATÓLICA DEL PERÚ**

Escuela de Posgrado



S-HBIM: Herramientas de Digitalización 3D para el
Diagnóstico Estructural de Edificaciones Patrimoniales

Tesis para obtener el grado académico de Magíster en Ingeniería Civil
con mención en Diagnóstico y Reparación de Construcciones
Patrimoniales y Existentes que presenta:

Rony Wilman Reategui Arrue

Asesor:

Rafael Aguilar Velez

Lima, 2022

RESUMEN

De acuerdo al continuo progreso en el conocimiento del patrimonio cultural, la realización de modelos digitales 3D orientados a las construcciones históricas se ha convertido en un procedimiento estándar. Asimismo, los diversos ensayos de diagnóstico, conservación y restauración que se realizan en estas estructuras requieren de sistemas de información que permitan una constante actualización y colaboración entre los diferentes involucrados. En este sentido, la integración de esta información semántica con el modelo 3D en un único entorno virtual resulta de gran interés ya que permitiría un manejo unificado de toda la información, siendo las herramientas brindadas por el *Building Information Modeling* (BIM) las más adecuadas. El objetivo de la presente tesis es proponer la metodología S-HBIM como una herramienta que permita una documentación totalmente digital del estado de conservación estructural de edificaciones patrimoniales. El procedimiento inicia con la recolección de información en campo (e.g. escaneo láser, fotogrametría aérea, ensayos termográficos, ensayos sónicos, entre otros) para crear modelos digitales 3D en un entorno BIM. Se emplea modelado paramétrico y modelado semi-automático mediante programación gráfica para generar geometrías complejas como bóvedas y rellenos. Una vez generado el modelo 3D, se añade la información de diagnóstico de manera gráfica y textual. Se modelan patologías estructurales como elementos sólidos de espesor muy delgado que se adaptan a superficies curvas como bóvedas y cornisas. Además, la información textual del estado de conservación, procedimientos de restauración y resultados de ensayos no destructivos se ingresa como parámetros en cada elemento del modelo 3D, lo que permite generar mapas de daño de manera automática por medio de filtros de visualización. La metodología S-HBIM se valida en la iglesia de la Compañía de Jesús en Cusco, Perú. Los resultados muestran que es posible integrar información tanto geométrica como semántica en un único entorno virtual 3D. Asimismo, se observa que las herramientas BIM también son aplicables a estructuras patrimoniales, y otorgan gran ventaja visual, de almacenamiento y gestión de la información respecto a métodos de representación 2D tradicionales. La metodología S-HBIM permite el desarrollo de un procedimiento estándar para el reporte de resultados en estudios de diagnóstico estructural de edificaciones existentes, así como la creación de repositorios digitales para un manejo ordenado de información dentro del marco de la evaluación y diagnóstico estructural de edificaciones patrimoniales.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la Pontificia Universidad Católica del Perú por la beca Ángel San Bartolomé que fue otorgada a mi persona, ayuda económica que permitió costear mis estudios en la escuela de posgrado, así como dedicarme a tiempo completo al desarrollo de la presente investigación.

Asimismo, agradezco a mis profesores, compañeros de estudio y compañeros del laboratorio Engineering & Heritage, de los cuales rescato su experiencia y conocimientos que me han formado no solo como profesional, sino también como persona.

Agradezco a mi asesor de tesis el Dr. Rafael Aguilar, por ser un guía firme y exigente en todo momento. Los pequeños detalles que hacen la diferencia lo aprendí de usted.

Un agradecimiento especial a mi familia y amistades cercanas que en todo momento supieron animarme y darme confianza para culminar con esta etapa tan importante en mi vida.

For me, forever ago

CONTENIDO

Resumen	i
Agradecimientos	ii
Lista de figuras	iv
Lista de tablas	vi
1. Introducción.....	1
1.1 Motivación.....	2
1.2 Objetivos.....	7
1.3 Organización.....	7
1.4 Resultados.....	8
2. Estado del arte	9
2.1 Introducción.....	10
2.2 Aplicaciones del HBIM	10
3. Metodología S-HBIM.....	17
3.1 Introducción.....	18
3.2 Adquisición de datos	20
Información geométrica.....	20
Ensayos sónicos y de eco-impacto	21
Ensayos de vibración ambiental	22
Termografía infrarroja	22
Inspección visual	23
3.3 Generación de la nube de puntos	23
3.4 Procedimiento Scan-to-BIM.....	24
Modelado manual	26
Modelado semi-automático	28
Modelado de la información semántica.....	30
4. S-HBIM Aplicado en la Iglesia de la Compañía de Jesús.....	33
4.1 Iglesia de la Compañía de Jesús	34
4.2 Recolección de información en campo.....	36
4.2 Modelo BIM	44
4.3 Modelo BIM con información semántica.....	52
5. Conclusiones.....	57
Referencias	61

LISTA DE FIGURAS

Fig. 1.1 Diversidad de patrimonio cultural en Perú (Sandra Negro, 2019).....	2
Fig. 1.2 Madurez de adopción BIM según el BSI (adaptado de B/555 Roadmap, 2013)	4
Fig. 1.3 Esquema explicativo de la metodología HBIM (adaptado de Bruno, 2018)	5
Fig. 2.1 Discretización automática de la nube de puntos en componentes estructurales de la bóveda: (a) aproximación de superficie, y (b) nube de puntos densa aproximada a los arcos, nervios y corona (obtenido de Angjeliu et al., 2019).....	11
Fig. 2.2 Proyecto de realidad virtual del sitio arqueológico de Bajardo (obtenido de Banfi, 2020).....	12
Fig. 2.3 Proceso <i>Scan-to-FEM</i> de la torre de la Catedral de Senlis, Francia: (a) fotografía, (b) nube de puntos, (c) modelo 3D, (d) malla de elementos finitos, y (e) esfuerzos de compresión en la estructura (adaptado de Rolin et al., 2019)	13
Fig. 2.4 Interfaz gráfica generada para la gestión de la información en el software Revit (obtenido de Bruno & Roncella, 2019)	14
Fig. 2.5 Visualización gráfica de los materiales asignados a cada componente independiente del modelo HBIM de la fachada de la Catedral de Sevilla (obtenido de Angulo-Fornos & Castellano-Román, 2020)	15
Fig. 3.1 Metodología S-HBIM	19
Fig. 3.2 Modelado manual de un arco utilizando la nube de puntos como referencia ...	27
Fig. 3.3 Remate superior modelado como familia <i>In-place</i> a partir de la nube de puntos	28
Fig. 3.4 Diferentes GOGs para la generación de geometrías (adaptado de Banfi, 2017)	29
Fig. 3.5 Procedimiento de modelado semi-automático utilizando Revit y Dynamo.....	30
Fig. 3.6 Proyección de patologías estructurales en superficies complejas usando programación en Dynamo	32
Fig. 4.1 Proceso de restauración de los campanarios luego del sismo de 1950	35
Fig. 4.2 Iglesia de la Compañía de Jesús en Cusco: (a) fotografía de la fachada (Guía de Viaje Machu Picchu, 2015), (b) fotografía de la nave central, y (c) plano de ubicación (adaptado de Mike Weston Andean Travel, 2011).....	36
Fig. 4.3 Procedimiento de escaneo láser: (a) escáner láser Leica C10 y proceso de calibración, y (b) registro de nubes de puntos en Recap Pro.....	37

Fig. 4.4 Procedimiento de fotogrametría: (a) dron utilizado para capturas las fotografías (DJI, 2021), y (b) procesamiento de la información en el software Leica Cyclone	37
Fig. 4.5 Nube de puntos de la iglesia: (a) vista tridimensional, y (b) corte longitudinal	38
Fig. 4.6 Ensayos de eco-impacto: (a) ubicación de los puntos de medición, y (b) distribución de los acelerómetros en los ensayos en pilares (arriba) y muros (abajo) ...	39
Fig. 4.7 Ensayos de eco-impacto: (a) registro de aceleración, y (b) espectro de Fourier del registro con bandas de frecuencias identificadas.....	40
Fig. 4.8 Configuraciones empleadas en los ensayos de vibración ambiental.....	41
Fig. 4.9 Espectro de valores singulares y formas modales de los tres primeros modos de vibración identificados en la iglesia	42
Fig. 4.10 Patologías estructurales encontradas en la iglesia.....	43
Fig. 4.11 Anomalías detectadas con IRT pasiva: (a) diferentes materiales ubicados en la fachada, (b) humedad en un muro lateral, y (c) grietas y desprendimientos en un pilar	44
Fig. 4.12 Anomalías estructurales detectadas con IRT activa: (a) grieta en bloque de piedra, (b) sillería localizada, y (c) abultamiento del recubrimiento de yeso.....	44
Fig. 4.13 Modelado paramétrico de los pilares del crucero	46
Fig. 4.14 Elemento arquitectónico de la fachada modelado como elemento <i>In-place</i> ...	47
Fig. 4.15 Elementos arquitectónicos y estructurales de los campanarios de la iglesia ..	47
Fig. 4.16 Creación de pechina mediante programación en Dynamo.....	48
Fig. 4.17 Diferentes tipos de bóvedas presentes en la iglesia	49
Fig. 4.18 Sistema de bóvedas nervadas de la iglesia.....	50
Fig. 4.19 Análisis comparativo entre la nube de puntos y el modelo sólido creado	51
Fig. 4.20 Vistas del modelo geométrico 3D de la iglesia de la Compañía de Jesús en Cusco, Perú.....	52
Fig. 4.21 Proyección de mancha de humedad en la capilla de la Virgen de Loreto	53
Fig. 4.22 Representación del abultamiento del recubrimiento en muro de la cripta.....	54
Fig. 4.23 Mapa de daños en la fachada de la capilla de la Virgen de Loreto.....	54
Fig. 4.24 Inserción de fotografías en el modelo 3D: (a) fotografía de patologías superficiales, y (b) termograma evidenciando la presencia de humedad en el muro exterior	55
Fig. 4.25 Vistas automáticas usando filtros de visualización en base a parámetros	56
Fig. 4.26 Mapa del estado de conservación de los muros de la iglesia.....	56

LISTA DE TABLAS

Tabla 3.1 Información de modelado de los elementos en Revit.....	26
Tabla 4.1 Resultados de los ensayos de eco-impacto	40



CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN



1.1 MOTIVACIÓN

El Perú cuenta con gran cantidad de patrimonio cultural, el cual le otorga identidad al ciudadano y cumple un rol decisivo en la sociedad (ver Fig. 1.1). La diversidad tanto en tradiciones como en patrimonio arquitectónico como iglesias, portales, capillas, puentes, ruinas, entre otros, genera mucho interés por parte de turistas nacionales e internacionales, los cuales visitan estos lugares y generan así grandes ingresos económicos al estado. Debido a la relevancia cultural y económica, diagnosticar y conservar el patrimonio arquitectónico es necesario, dado que los procesos naturales afectan su salud estructural y con el tiempo pueden generar incluso el colapso. El daño de estas estructuras no solo representa una pérdida de identidad cultural, sino también involucra un peligro latente ante la vida de personas que se encuentren visitando estos complejos.



Fig. 1.1 Diversidad de patrimonio cultural en Perú (Sandra Negro, 2019)

Por el contrario, el sector Arquitectura, Ingeniería y Construcción (AEC) viene adecuándose a cambios importantes durante la última década. Conceptos como *Building Information Modeling* (BIM), *Digital Twin* (DT) o Construcción 4.0 son relevantes al hablar de proyectos de vanguardia en todo el mundo. Las ventajas que otorgan en la representación, gestión y mantenimiento los han convertido en estándares globales que requieren de más investigación dado que son metodologías nuevas desarrolladas recién en la última década.

Estos conceptos hacen referencia a la representación de instalaciones reales en un entorno virtual dinámico que sirva para su adecuada representación, gestión, operación y

mantenimiento y requiere cada vez más de una variedad y complejidad de fuentes de información (Badenko et al., 2021; Jouan & Hallot, 2019). Estas herramientas permiten el monitoreo de la estructura por medio de un modelo digital “gemelo”, el cual representa todas las variaciones que sufre la estructura en tiempo real (Jouan & Hallot, 2019). Llegar a este nivel de representación en la actualidad es posible, y en el sector AEC cada vez se invierte más en este tipo de tecnologías debido a su potencial en todas las etapas de un proyecto. Asimismo, tiene gran utilidad en la conservación y mantenimiento de infraestructura existente, sobre todo de infraestructura esencial como hospitales, puentes, represas, edificaciones gubernamentales, bases militares, presas de relaves y patrimonio arquitectónico dado que permite monitorear la salud estructural de la edificación.

Precisamente su aplicación en el patrimonio arquitectónico es de interés en el medio local debido a la cantidad de patrimonio tangible existente, muchos de ellos dejados al olvido y sin planes de restauración, conservación y mantenimiento. En este sentido, la aplicación de estas nuevas tecnologías al patrimonio arquitectónico supondría una nueva visión de la problemática, que serviría como referente local en temas de recuperación y puesta en valor del patrimonio. En la actualidad el ámbito de la gestión del patrimonio se está trasladando del enfoque de restauración a un enfoque de prevención (Bruno & Roncella, 2019; Jouan & Hallot, 2020), enfoque que debe ser adoptado.

El dibujo asistido por computadora (CAD) y los planos 2D han sido indispensables para la representación de aspectos geométricos e información textual. Sin embargo, según Saygi et al. (2013), las representaciones 2D poseen una limitante: no brindan información explícita sobre las características semánticas y estructurales entre distintos componentes geométricos. En otras palabras, existe información que podría estar oculta más allá de los datos geométricos o simplemente es difícil de representar mediante dichos medios. En este sentido, los sistemas de gestión de información son cruciales, en especial si son integrados en un mismo entorno virtual 3D.

En particular, BIM permite añadir y gestionar información de los objetos que están siendo construidos en un único entorno virtual 3D (Azhar, 2011). Su aplicación en proyectos de edificaciones ha ido creciendo en los últimos años, llegando a ser obligatorio en proyectos estatales en ciertos países. En Perú, se tiene previsto implementar su uso obligatorio en proyectos públicos para el año 2030, de acuerdo al Plan BIM al 2030 elaborado por el Ministerio de Economía y Finanzas (Ministerio de Economía y Finanzas, 2019). La

adopción de BIM en diversos proyectos corresponde a niveles de madurez, tal como lo definió el Instituto de Estándares Británico (BSI) (BSI, 2021). En la Fig. 1.2 se muestra un esquema elaborado por el BSI en el cual se presenta la madurez de adopción de BIM en un proyecto. Los niveles pasan de dibujos CAD 2D a una adopción total de BIM con trabajo colaborativo entre todas las partes involucradas. El Nivel 0 corresponde a un nivel en el que no se adopta BIM, y solo se trabaja con dibujos CAD 2D, y la información es presentada de manera impresa o electrónica. El Nivel 1 se refiere a un nivel más avanzado de gestión de la información, dado que se trabaja con modelos 2D y 3D de manera colaborativa en un entorno común. El Nivel 2 involucra el manejo de herramientas BIM en especialidades separadas, por lo general compartiendo toda la información en una única base de datos. Este nivel involucra la generación de modelos 4D (gestión del tiempo) y 5D (incluye análisis de costos). Finalmente, el Nivel 3 se conoce como *Integrated BIM* (iBIM), en el cual se consideran todos los procesos y análisis en un entorno colaborativo centralizado, y el intercambio de información se realiza usando los formatos del *Industry Foundation Classes* (IFC) (Bruno, 2018).

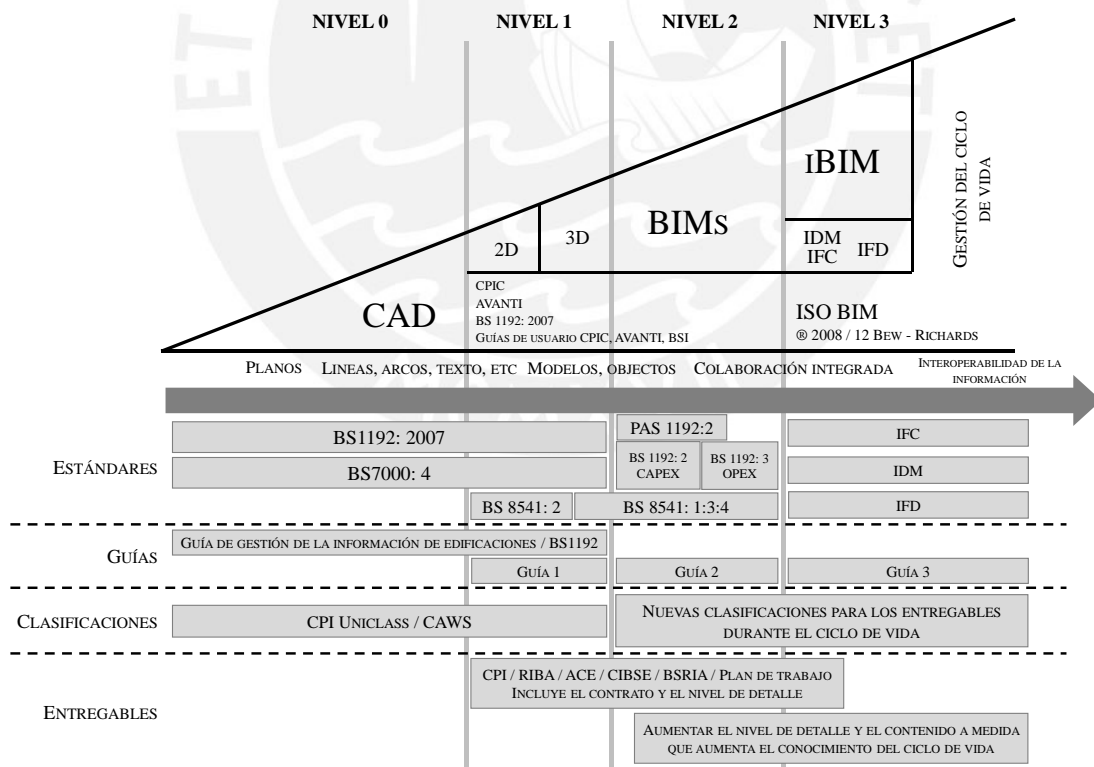


Fig. 1.2 Madurez de adopción BIM según el BSI (adaptado de B/555 Roadmap, 2013)

El uso de BIM aplicado al patrimonio se conoce como *Historic* o *Heritage Building Information Modeling* (HBIM). Al igual que el BIM, las ventajas de emplear HBIM en

proyectos de diagnóstico, conservación y restauración de patrimonio son muy favorables. La implementación de HBIM involucra principalmente tres bloques fundamentales: la adquisición de datos, el modelado 3D, y la creación de una base de datos con información semántica (ver Fig. 1.3). Los tres campos son necesarios al hablar de HBIM y no pueden tratarse como elementos independientes dado que se complementan. A pesar de ello, cada bloque posee dificultades diferentes y, precisamente, en los últimos años las investigaciones se han desarrollado en torno a ello. Sin embargo, aún se sigue desarrollando investigación en este campo, dado que aún no se establecen procedimientos estándares que sirvan como guía en el desarrollo de planes de conservación, documentación y restauración en el marco del HBIM, además de su integración con otras tecnologías como los Sistemas de Información Geográfica (GIS), Realidad Aumentada (AR) y Realidad Virtual (VR).

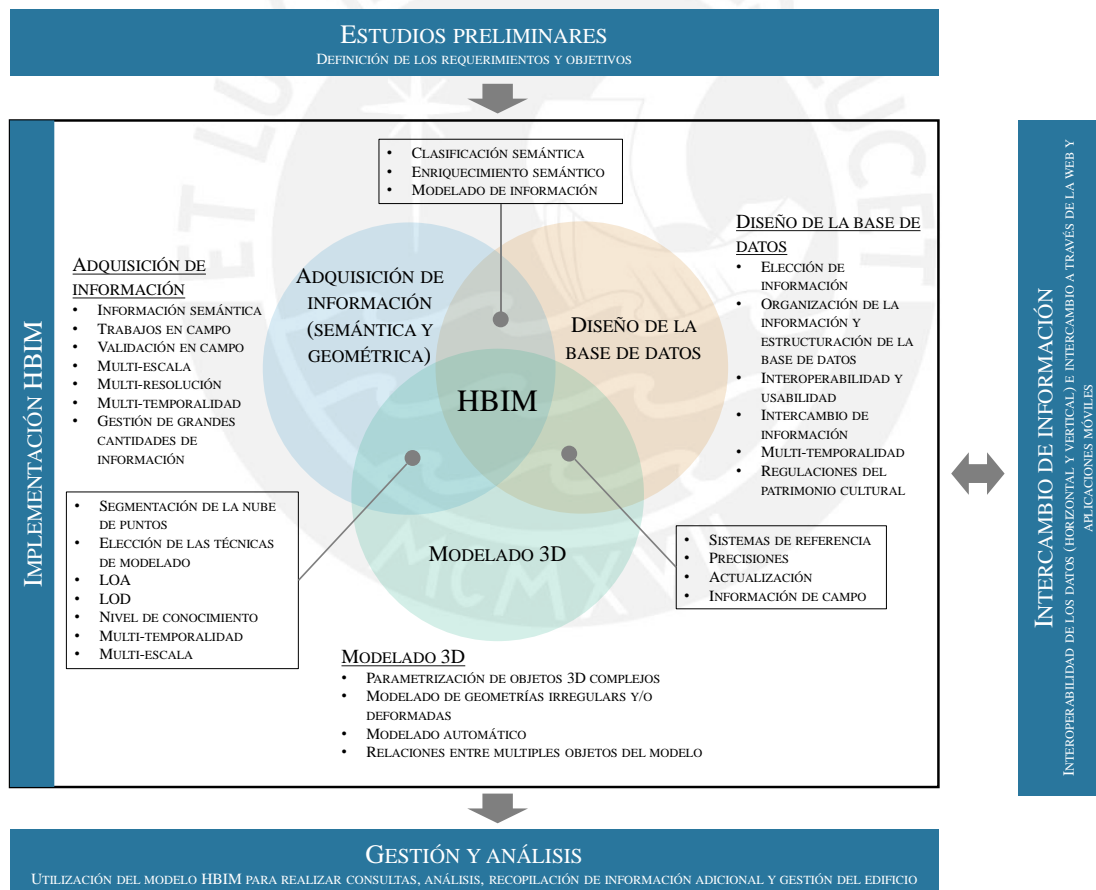


Fig. 1.3 Esquema explicativo de la metodología HBIM (adaptado de Bruno, 2018)

El HBIM ha sido motivo de estudio durante la última década principalmente en países como Italia, Portugal y España (López et al., 2018). Los estudios han demostrado el gran potencial que tiene esta herramienta para la representación y gestión de la información en

proyectos relacionados al patrimonio arquitectónico. Además, sirve como base para la generación de modelos de elementos finitos, modelos 3D para el monitoreo de salud estructural, así como modelos gemelos digitales (DT). Los proyectos relacionados al diagnóstico, conservación y restauración de patrimonio, al igual que los proyectos de edificaciones o infraestructura nueva, requieren de un equipo multidisciplinario. Por lo general este equipo involucra ingenieros, arquitectos, arqueólogos, restauradores, entre otros profesionales, además del equipo a cargo del mantenimiento de la estructura. En este sentido, para garantizar una adecuada comunicación e intercambio de información, los procedimientos de intervención y sus resultados deben ser presentados en un mismo entorno digital que facilite la gestión de la información y el acceso por parte de los diferentes actores involucrados, tal como lo permite el HBIM. Sobre todo, en un país como Perú en donde existe una alta cantidad de patrimonio arquitectónico, es necesario implementar este tipo de procedimientos.

En la presente investigación, se propone la metodología S-HBIM como herramienta para el diagnóstico de estructuras patrimoniales, la cual permite integrar información del estado de conservación estructural dentro de un modelo geométrico 3D. Esta metodología se valida y aplica en un caso de estudio. Se inicia con la recolección de información y la generación de una nube de puntos híbrida. A partir de esta, se desarrolla el modelado 3D de la estructura y se modela además la información semántica recolectada. La recolección de información se realiza por medio de ensayos no destructivos en campo, así como de documentación histórica de la estructura en evaluación. El modelado 3D se realiza mediante aproximaciones manuales y semi-automáticas basadas en la nube de puntos y programación gráfica usando el software BIM Autodesk Revit. El modelado de la información semántica se realiza mediante aproximaciones semi-automáticas de modo que la información sea accesible dentro del modelo 3D por cualquier usuario involucrado. Esta integración facilita el manejo, reporte y actualización de resultados lo cual sirve como base en la creación de repositorios digitales como un primer paso para la transformación digital a nivel de infraestructura existente. Además, se adoptan los principios planteados por Osello et al. (2018), quienes proponen mantener un nivel bajo de precisión gráfica con un nivel elevado de información no geométrica. De este modo se logra un balance entre tiempo empleado en la creación del modelo y los beneficios y usos reales que se puedan obtener del mismo.

1.2 OBJETIVOS

Objetivo general y alcance:

Desarrollar una metodología para documentar el estado de conservación estructural de edificaciones patrimoniales. Esta metodología integrará sistemáticamente procedimientos para el levantamiento de información a partir de nubes de puntos, con modelado paramétrico 3D y los resultados del diagnóstico estructural que son producto de la aplicación de diversos tipos de técnicas no invasivas.

Objetivos específicos:

- Proponer un procedimiento para incorporar información geométrica de nubes de puntos densas en modelos 3D paramétricos
- Proponer un procedimiento para incorporar información de pruebas de diagnóstico estructural y ensayos de caracterización de materiales en modelos 3D
- Validar la metodología propuesta en la iglesia de la Compañía de Jesús en Cusco

1.3 ORGANIZACIÓN

La presente tesis se organiza en cinco capítulos, de los cuales el segundo, tercer y cuarto capítulo presentan el estado del arte, la metodología propuesta para la documentación de información en un entorno HBIM y su aplicación en la iglesia de la Compañía de Jesús, respectivamente. El contenido de cada capítulo se presenta a continuación:

- El Capítulo 1 contiene la motivación, justificación y objetivos de la tesis. Presenta también la organización del trabajo con un resumen de cada uno de los capítulos, además de los artículos científicos publicados.
- El Capítulo 2 presenta el estado del arte respecto al uso de HBIM en el patrimonio arquitectónico. Se presenta la evolución del HBIM a lo largo de los años, el cual inicia como una propuesta de generar librerías de familias paramétricas, para luego ser utilizado en proyectos de conservación y restauración, documentación de información, procedimientos BIM-to-FEM, generación de paseos virtuales mediante realidad virtual, entre otras aplicaciones.
- El Capítulo 3 presenta la metodología para la documentación del estado de conservación estructural de construcciones patrimoniales en un entorno HBIM, la cual se divide en tres etapas. La primera etapa es el modelado 3D a partir de nubes de puntos densas mediante técnicas manuales y automáticas. La segunda etapa

consiste en la incorporación de la información de diagnóstico estructural dentro del modelo 3D. Finalmente, en la tercera etapa se propone un procedimiento para el almacenamiento y reporte de resultados.

- El Capítulo 4 presenta la aplicación de la metodología propuesta en la iglesia de la Compañía de Jesús en Cusco. Primero se describe la iglesia y se presenta la relevancia de dicha estructura en el entorno local. Luego, se presentan los resultados de la etapa de recolección de información en campo que consiste en el levantamiento geométrico, la caracterización mecánica y dinámica, y la inspección del estado de daño estructural. Finalmente, se muestran los resultados obtenidos mediante la aplicación de la metodología propuesta en el caso de estudio, así como las ventajas y potencialidades que otorga dicho procedimiento.
- El Capítulo 5 presenta las conclusiones del trabajo de tesis, así como recomendaciones, limitaciones y consideraciones para trabajos futuros acerca del uso de herramientas de digitalización para la documentación del diagnóstico estructural de edificaciones patrimoniales.

1.4 RESULTADOS

Como parte de la difusión de resultados, se han publicado dos artículos en dos conferencias internacionales:

- Preliminary In-Situ Structural Diagnosis of the Church of the Society of Jesus in Cusco, Peru Using Non-Destructive Testing en “Mechanics of Masonry Structures Strengthened with Composite Materials Murico7 2021”, en Italia.
- 3D Modeling Approach for Cultural Heritage Structures: The Case of Virgin of Loreto Chapel in Cusco, Perú en “International Conference on Digital Heritage ICDH 2021”, en Inglaterra.

CAPÍTULO 2: ESTADO DEL ARTE

Resumen:

En este capítulo se presentan los estudios relacionados a la aplicación de BIM en el patrimonio arquitectónico. El capítulo inicia con una descripción del HBIM y la conceptualización del término en sus inicios. De manera progresiva, se presentan los avances y nuevas aplicaciones del mismo en el patrimonio arquitectónico para la gestión de proyectos de conservación y restauración. Además, se presentan los trabajos que vinculan al HBIM con otras metodologías modernas como análisis de elementos finitos, modelos ontológicos, AR y VR. La aplicación de HBIM en estructuras patrimoniales resulta ser, en la actualidad, una herramienta necesaria si se desea realizar procesos de diagnóstico estructural de vanguardia que integren y faciliten el manejo de información entre los profesionales involucrados.

2.1 INTRODUCCIÓN

En la gestión de infraestructura civil, es necesario tener un modelo 3D que integre la mayor cantidad de información tanto tangible como intangible de la estructura. En el caso de patrimonio arquitectónico, esto toma mayor relevancia dada la complejidad y cantidad de información que poseen. Es así que el HBIM se presenta en la actualidad como una de las mejores opciones para desarrollar un modelo 3D que integre toda la información referente al patrimonio. Esto debido a que en un entorno BIM, cada objeto puede ser parametrizado mediante información gráfica y semántica que describe cada objeto del modelo (Cheng et al., 2015; López et al., 2017).

2.2 APLICACIONES DEL HBIM

El término HBIM lo acuñaron por primera vez Murphy et al. (2009) para hacer referencia a un nuevo sistema para el modelado de construcciones históricas a partir de información de nubes de puntos. El mismo concepto fue revisado por Pauwels et al. (2008) un año antes, pero bajo el término de *Architectural Information Modeling* (AIM) el cual no tuvo mayor alcance debido al bajo nivel de investigación respecto al tema. Luego de ello, siguieron investigaciones relacionadas al uso de nubes de puntos para el modelado paramétrico de elementos arquitectónicos en entornos 3D (Chevrier et al., 2010), el modelado automático de modelos as-built BIM (Tang et al., 2010) y el uso de BIM para la documentación de estructuras patrimoniales (Fai et al., 2011). Sin embargo, recién a partir del año 2013 el término HBIM empieza a ser usado como un término común para hacer referencia a la aplicación de BIM en construcciones patrimoniales.

El término HBIM se adopta también para hacer referencia a librerías de familias paramétricas de elementos presentes en estructuras patrimoniales (Baik et al., 2014; Fai & Rafeiro, 2014; Murphy et al., 2013). Esto permite “ver” más allá de solo la información geométrica dado que integra información de procesos constructivos, estado de daño, materiales y modificaciones sufridas a lo largo del tiempo (Dore et al., 2015; López et al., 2017; Quattrini & Baleani, 2015). Sin embargo, debido a la gran variabilidad presente en el patrimonio arquitectónico, la creación de una librería común no ha tenido el éxito esperado a pesar de los intentos. Tal como lo definieron Murphy et al. (2009), la generación de modelos HBIM consiste en el uso de nubes de puntos como referencia para el modelado 3D. El modelado se puede realizar de manera manual o mediante métodos semi-automáticos o automáticos. Así lo demuestran los estudios realizados por Angjeliu

et al. (2019), Jung et al. (2014), Román et al. (2019) y Zhang & Zakhor (2014), quienes proponen métodos de modelado automáticos para la creación de objetos a partir de la nube de puntos. Además, las superficies geométricas se pueden aproximar a la nube de puntos (ver Fig. 2.1a), lo que permite discretizar a esta última para la detección automática de elementos estructurales (ver Fig. 2.1b). Así también, el modelado de elementos específicos como bóvedas y domos requiere de aproximaciones paramétricas en un entorno BIM (Banfi, 2019a; Capone & Lanzara, 2019).

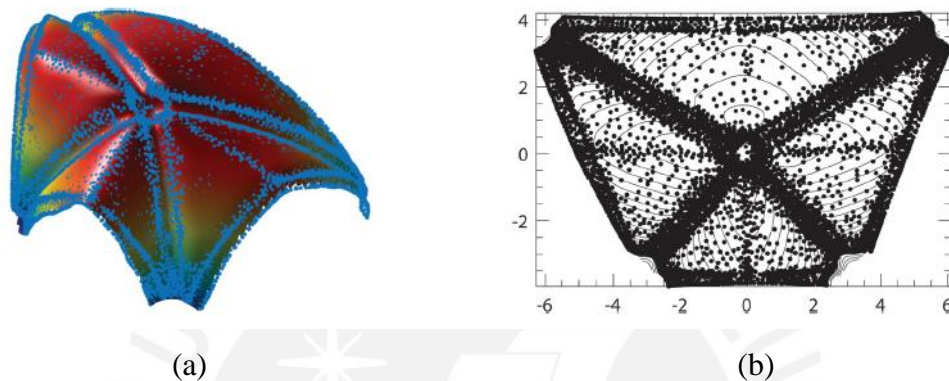


Fig. 2.1 Discretización automática de la nube de puntos en componentes estructurales de la bóveda: (a) aproximación de superficie, y (b) nube de puntos densa aproximada a los arcos, nervios y corona (obtenido de Angjeliu et al., 2019)

Por otro lado, Banfi (2017) añade nuevas escalas de Grado de Generación (GOG), el cual es un indicador sobre la aproximación de modelado geométrico que se adopta para representar los elementos estructurales. En este estudio, propone el uso de superficies NURBS (*Non-Uniform Rational B-Splines*) basadas en la nube de puntos para la generación de elementos sólidos 3D. Asimismo, al modelar en base a nubes de puntos, se requiere conocer la precisión con la cual el modelo sólido generado se asemeja a los datos de la nube de puntos. Este concepto se conoce como *Grade of Accuracy* (GOA), el cual es revisado por diferentes autores (Antón et al., 2018; Brumana et al., 2019).

La aplicación de la metodología HBIM en casos de estudio se ha realizado principalmente en países como Italia, Portugal y España y se ha incrementado en los últimos años (López et al., 2018). Tal es el caso de la investigación realizada por Oreni et al. (2014), quienes emplean HBIM para representar los procesos de restauración y los trabajos asociados en la Basílica de Collemaggio en Italia. Otro estudio es el de Wu et al. (2013), quienes mejoran los procesos tradicionales de restauración de patrimonio aplicando la metodología HBIM. Chiabrando et al. (2016) presentan la aplicación de técnicas de

detección y modelado semi-automáticos, así como la aplicación de VR y AR dentro de los procesos de gestión y representación de la información en un entorno HBIM. De la misma manera, Banfi (2020), Banfi et al. (2019) y De Fino et al. (2018) han desarrollado experiencias VR para la conservación de estructuras patrimoniales (ver Fig. 2.2). Además de los casos mencionados, en los últimos años se tienen diversos aportes en este ámbito, tales como los estudios de Castellano-Román & Pinto-Puerto (2019), Costantino et al. (2021), López et al. (2017), Mora et al. (2021) y Rocha et al. (2020), siendo revisado de manera exhaustiva por Khalil et al. (2021) y Sampaio et al. (2021).

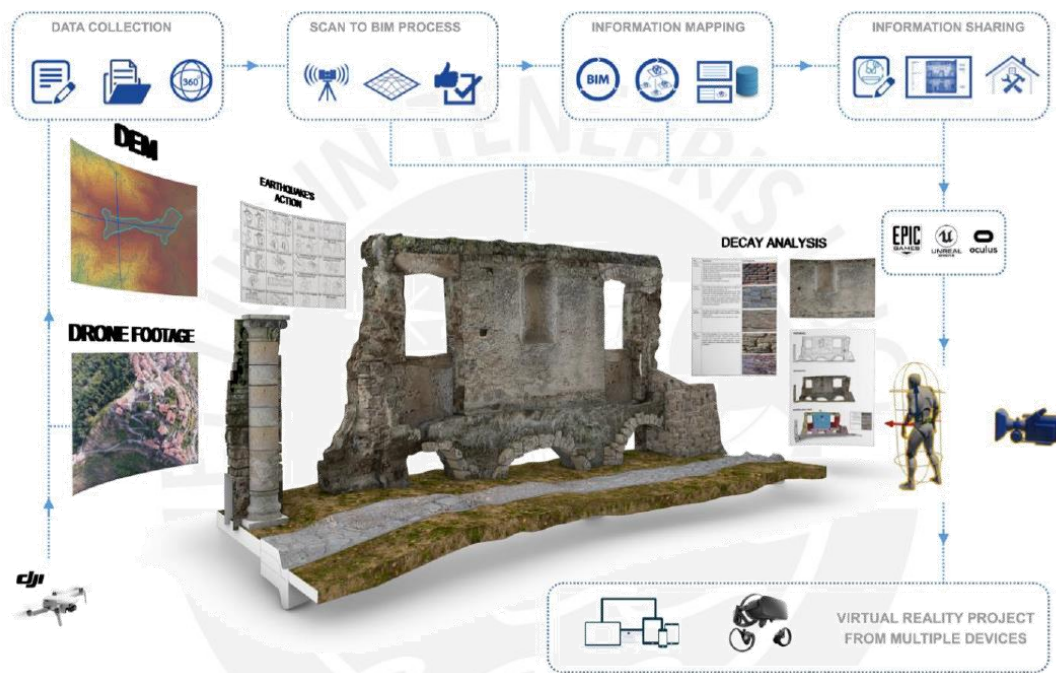


Fig. 2.2 Proyecto de realidad virtual del sitio arqueológico de Bajardo (obtenido de Banfi, 2020)

Además de la aplicación en casos de estudio, los modelos HBIM también sirven para la generación de modelos de elementos finitos. Tal es caso de los estudios realizados por Funari et al., 2021, Pepe et al., 2020, Rolin et al., 2019 y Suárez et al., 2020, en donde se utilizan modelos HBIM para análisis estructurales avanzados. En la Fig. 2.3a se observa la torre de la Catedral de Senlis en Francia. Mediante fotogrametría aérea se obtuvo la nube de puntos (ver Fig. 2.3b) y se desarrolló el modelo 3D (ver Fig. 2.3c). A partir de este modelo, se obtuvo la malla de elementos finitos (ver Fig. 2.3d) y se realizaron análisis estructurales para determinar los máximos esfuerzos de compresión a los cuales está sometida la estructura (ver Fig. 2.3e). Asimismo, mediante la aplicación de HBIM se puede representar patologías estructurales dentro de un modelo 3D, tal como lo realizan

Barontini et al., 2021, Chiabrando et al., 2017, Malinverni et al., 2019 y Pocobelli et al., 2018, incluso se pueden representar deformaciones observadas en la estructura dentro del modelo 3D (Nieto-Julián et al., 2020). Por otro lado, el uso de modelos ontológicos para la representación, conservación y adecuada conexión entre información semántica y geométrica de modelos HBIM también es un tópico revisado por diversos autores (Colucci et al., 2020; Messaoudi et al., 2018; Previtali et al., 2020). Estos modelos ontológicos permiten unificar conceptos, definiciones y relaciones entre objetos pertenecientes a una rama en particular del conocimiento.

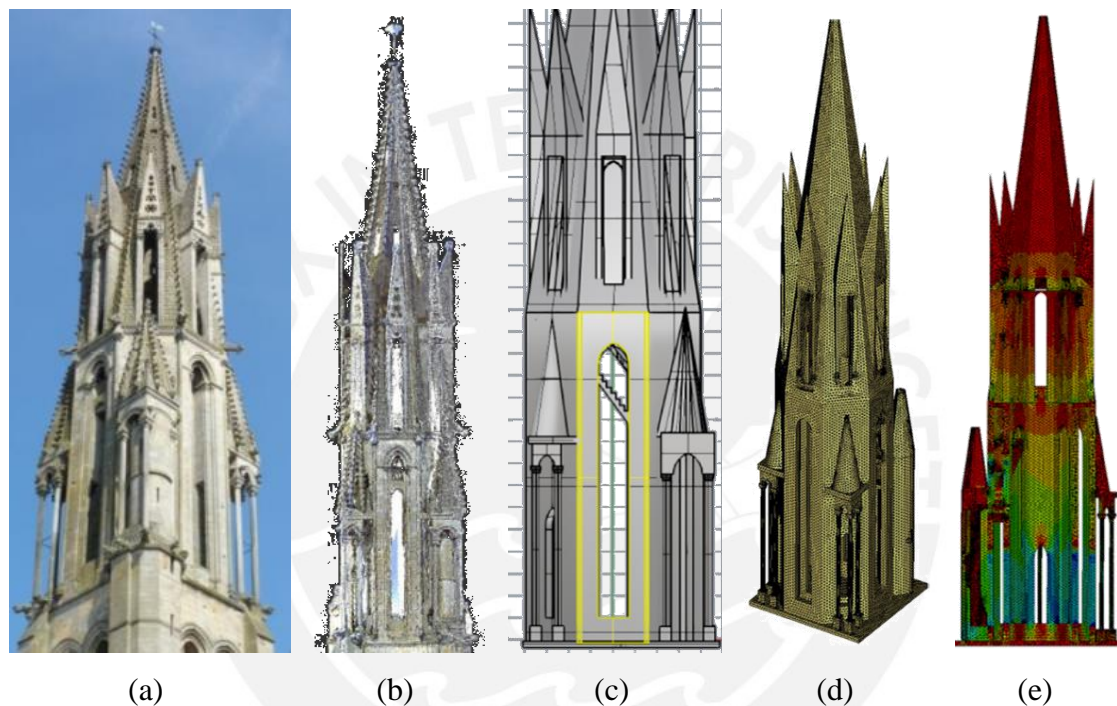


Fig. 2.3 Proceso *Scan-to-FEM* de la torre de la Catedral de Senlis, Francia: (a) fotografía, (b) nube de puntos, (c) modelo 3D, (d) malla de elementos finitos, y (e) esfuerzos de compresión en la estructura (adaptado de Rolin et al., 2019)

A pesar de los avances en este campo, como mencionan Bruno & Roncella, 2019, en la actualidad no existe software comercial que logre suplir todas las exigencias que requiere el modelado 3D de estructuras patrimoniales y su adecuada gestión de información. Para lograr el modelo HBIM se requiere conocer y contratar diverso software especializado en tareas específicas, sobre todo en la etapa de modelado 3D. Estas condiciones muchas veces no pueden ser cubiertas por estudiantes e investigadores. A pesar de ello, existen algunos intentos por generar *plugins* para software BIM que permita procesar datos, generar geometría compleja, gestionar información semántica, entre otras aplicaciones dentro del marco del HBIM (Banfi, 2019b; Bruno & Roncella, 2019). Esto es de especial

interés debido a las grandes ventajas que conlleva el uso de programación en la gestión de la información. Tal como se muestra en la Fig. 2.4, Bruno & Roncella, 2019 desarrollaron una interfaz dinámica dentro de Revit que permite al usuario no solo visualizar información semántica de elementos dentro del modelo, sino también actualizar y sobrescribir parámetros, crear una base de datos, generar listados de intervenciones estructurales, entre otras funcionalidades. A pesar de ello, no existen muchas investigaciones al respecto debido al complejo sistema que involucra la creación de bases de datos y su vinculación con el software especializado. Una aproximación alternativa consiste en usar programación dentro del mismo software BIM para todo el proceso de generación del modelo HBIM, de modo que se minimiza la cantidad de software especializado requerido. Angulo-Fornos & Castellano-Román, 2020 implementan programación gráfica mediante Dynamo (Autodesk INC, 2014) en el software Revit, logrando automatizar la creación de elementos geométricos, así como presentar información semántica dentro del modelo 3D (ver Fig. 2.5).

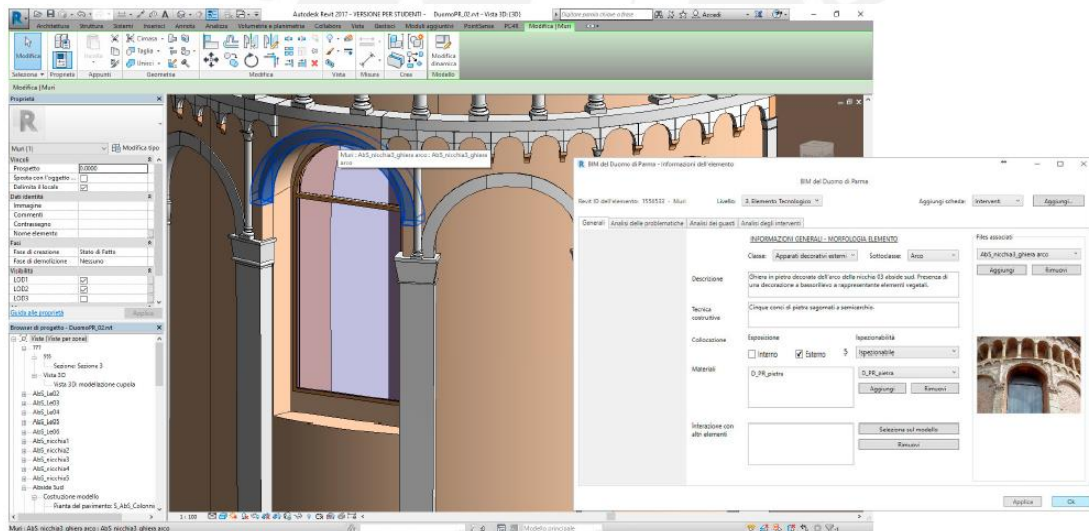


Fig. 2.4 Interfaz gráfica generada para la gestión de la información en el software Revit (obtenido de Bruno & Roncella, 2019)

La aplicación de HBIM en el diagnóstico estructural también ha generado interés en los últimos años. El estudio de Santoni et al., 2021 muestra la creación de un modelo HBIM de la Basílica de San Isidoro en León, España, en donde se representan los procesos constructivos de la estructura, así como los procesos de estratificación temporal. Además, se emplea programación en Dynamo para identificar y filtrar elementos estructurales específicos en base a la selección de parámetros. Esto permite generar vistas personalizadas para una mejor gestión de los procesos de diagnóstico y conservación

estructural, y una gestión más eficiente de proyectos de restauración. De la misma manera, en la investigación de Santagati et al., 2021 se realiza un modelo HBIM de la Catedral de St. John el Teólogo para documentar el proceso de diagnóstico del estado de conservación de la estructura. En esta investigación se modela a partir de nube de puntos y se representan las patologías estructurales usando *filled regions* y componentes adaptativos en combinación con programación en Dynamo.

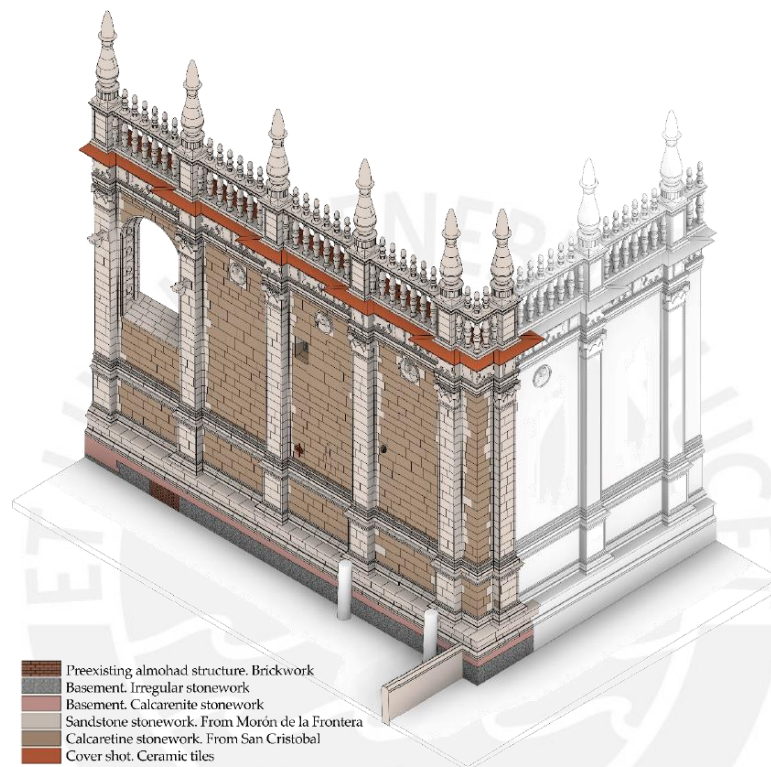


Fig. 2.5 Visualización gráfica de los materiales asignados a cada componente independiente del modelo HBIM de la fachada de la Catedral de Sevilla (obtenido de Angulo-Fornos & Castellano-Román, 2020)

De la misma manera, en el estudio de Mol et al., 2020 se emplea la metodología HBIM para almacenar información sobre el diagnóstico de estructuras existentes de madera. Para ello, se vincula información semántica del estado de conservación de los elementos dentro del entorno HBIM incluyendo información geométrica, secciones de los elementos de madera, deformaciones presentes y propiedades mecánicas de los elementos. También, se categoriza la información en dos principales condiciones: información sin procesar e información procesada. Esto permite realizar análisis en base a objetivos específicos, interpretar la información e incluso realizar comparaciones utilizando otras técnicas de procesamiento, lo cual tiene una gran relevancia en proyectos de diagnóstico estructural. Por su parte, la investigación de Moyano et al., 2022 presenta el análisis de deformaciones

estructurales por medio de modelos paramétricos HBIM. Para ello, utiliza la nube de puntos dentro del software Revit para el modelado geométrico, y CloudCompare en conjunto con Dynamo para el procesamiento de la información entre los elementos sólidos y la nube de puntos. El sistema diseñado permite que se actualice la nube de puntos a lo largo del tiempo y con ello se pueda determinar la variación de las deformaciones durante el ciclo de vida de la estructura.



CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA S-HBIM

Resumen:

En el capítulo se desarrolla la metodología S-HBIM propuesta para la generación de un modelo 3D HBIM a partir de información de campo. Primero se plantea el procedimiento general, y se desarrolla cada una de las etapas. La primera etapa corresponde a la recolección de información en campo mediante ensayos no destructivos. En la segunda etapa se desarrolla la nube de puntos híbrida a partir de fotogrametría y escaneo láser terrestre. Finalmente, en la tercera etapa se desarrollan técnicas manuales y semiautomáticas de modelado geométrico 3D dentro de software BIM a partir de la nube de puntos. Asimismo, se implementan técnicas semiautomáticas de modelado de información semántica, como patologías estructurales, para la representación del estado de conservación estructural dentro del modelo 3D.

3.1 INTRODUCCIÓN

Para generar un modelo fiable se requiere recolectar información en campo que represente el estado actual de una estructura. En el caso de patrimonio arquitectónico, se requiere aplicar ensayos no destructivos debido al valor patrimonial que poseen las estructuras. En este sentido, se plantea recolectar la información en campo por medio de técnicas no destructivas y el desarrollo del modelo HBIM por medio de un procedimiento de tres etapas para el modelado (ver Fig. 3.1).

La etapa de recolección de información en campo consiste en tres bloques: recolección de información geométrica, caracterización mecánica de materiales y caracterización dinámica de la estructura, e inspección visual para documentar el estado de daño. La etapa de recolección de información geométrica consiste en la aplicación de fotogrametría aérea en conjunto con escaneo láser terrestre (TLS), los cuales garantizan precisión, rapidez y fiabilidad en las mediciones. Por su parte, la caracterización mecánica de materiales se desarrolla por medio de ensayos sísmicos de eco-impacto, los cuales permiten estimar el módulo de elasticidad dinámico (E_d) de los materiales. La caracterización dinámica se realiza mediante Análisis Modal Operacional (OMA), con lo cual se obtienen los modos de vibración de la estructura. Finalmente, el estado de daño se documenta por medio de inspección visual con ayuda de una cámara fotográfica. Además, se emplean ensayos de Termografía Infrarroja (IRT) para documentar patologías ocultas, humedad en los muros, cambios de material, entre otras.

La generación del modelo HBIM se desarrolla en su totalidad dentro del software BIM Revit. La primera etapa consiste en el modelado manual de los muros, columnas, pisos, techos y otros detalles arquitectónicos en base a la nube de puntos. La segunda etapa consiste en el modelado semi-automático de los sistemas complejos de bóvedas y rellenos usando el lenguaje de programación gráfico Dynamo. Finalmente, la última etapa de modelado consiste en la creación de patologías estructurales dentro del modelo, así como la documentación de información de materiales y estado de conservación de los elementos del modelo.

Se presenta el procedimiento seguido para la generación del modelo HBIM, iniciando con la etapa de recolección de adquisición de datos, luego con la generación de la nube de puntos y finalmente con el procedimiento Scan-to-BIM.

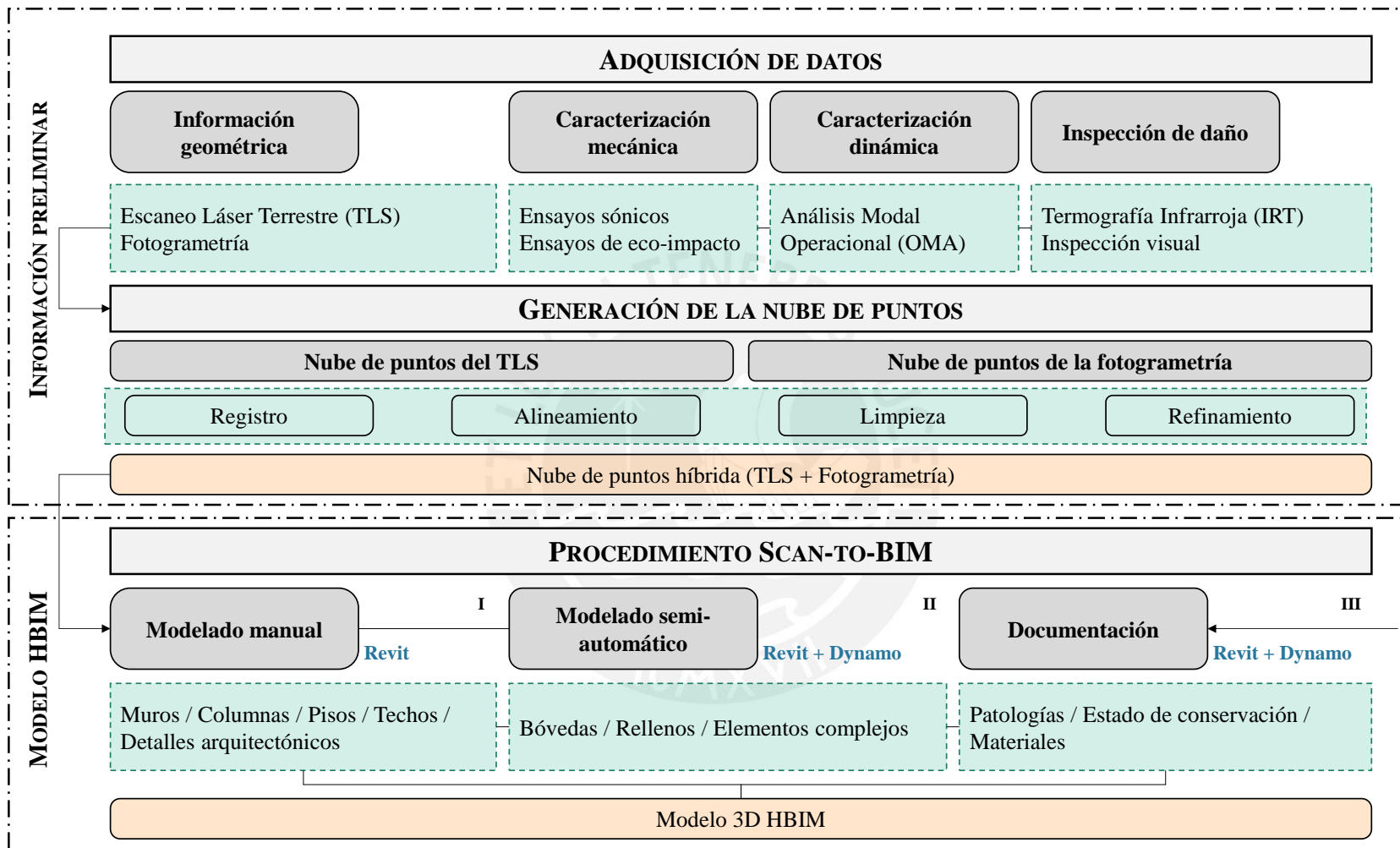


Fig. 3.1 Metodología S-HBIM

3.2 ADQUISICIÓN DE DATOS

Información geométrica

Representar físicamente una estructura ya sea en bocetos, planos, o incluso modelos 3D es una tarea que se viene realizando desde hace cientos de años. Las herramientas disponibles para realizarlo se han ido desarrollando cada vez más en el tiempo, pasando desde procesos manuales de medición usando partes del cuerpo como referencia, hasta procesos de alta precisión usando equipos avanzados. Con ello se garantiza exactitud no solo en mediciones en planta, sino también en altura. En el caso particular de estructuras patrimoniales, este último detalle es de mucha importancia dado el complejo sistema estructural y arquitectónico que presentan. Además, al tratarse de estructuras de grandes dimensiones, realizar un levantamiento geométrico en campo requiere de herramientas precisas rápidas. Algunas de estas herramientas son la reconstrucción 3D por fotogrametría y el TLS. Diversas investigaciones (Bitelli et al., 2017; Croce et al., 2019) han demostrado que, en conjunto, son herramientas ideales para representar fielmente la geometría de estructuras patrimoniales en un entorno digital.

La fotogrametría es un proceso que consiste en la captura de una serie de fotografías desde una posición constante de algún objeto o estructura. Las fotos deben compartir áreas en común entre una y otra, dado que se usa la información de los píxeles de las imágenes para hallar una correlación entre fotos, generando así un conjunto de puntos que guardan relaciones de distancia de acuerdo a las presentadas en cada uno de los píxeles de las fotografías. Además, la información de color también se conserva para cada punto, obteniendo así una nube de puntos con información geométrica (coordenadas X, Y, Z) y de color (RGB) la cual representa fielmente al objeto o estructura en estudio.

Por otro lado, el TLS es uno de los métodos más precisos para adquirir una nube de puntos, dado que utiliza un escáner láser para obtener la información geométrica (coordenadas X, Y, Z), así como las características de color (datos RGB de cada punto) de una estructura. El escáner láser emite un haz de luz que rebota en cualquier superficie sólida, regresando hasta el equipo desde donde se emitió. Según el tiempo de viaje del láser, se calculan las coordenadas del punto donde ha rebotado. Este proceso se realiza de manera muy rápida y en una rotación de 360°, logrando captar gran cantidad de información de manera rápida y precisa.

Ensayos sónicos y de eco-impacto

Los ensayos sónicos consisten en la propagación de ondas en un medio continuo. Las ondas mecánicas se mueven en medios sólidos, y la velocidad con la cual lo hacen depende de las características propias del medio, tales como el módulo de la elasticidad dinámico (E_d), módulo de Poisson (ν) y la densidad (ρ). Dependiendo del ensayo empleado y la configuración del mismo, se emplean las velocidades de onda P (V_p), onda S (V_s) u onda R (V_r), existiendo correlaciones y fórmulas entre unas y otras (L. Miranda et al., 2016). El registro de estas ondas se hace mediante transductores de medida, por lo general sensores de aceleración, los cuales son colocados en el espécimen en estudio y se dan pequeños golpes que logren propagar una onda acústica dentro del medio. Las ondas perturban el material y dicho fenómeno se registra mediante los acelerómetros. Dicho registro permite calcular la velocidad de propagación de las ondas, y con ello se estima E_d . Este valor se conoce como módulo de elasticidad dinámico dado que ha sido estimado en base a la perturbación del material mediante ondas dinámicas. Su valor se calcula utilizando ν , ρ y V_p , despejando E_d en la Ec. 3.1.

$$V_p = \sqrt{\frac{E_d(1 - \nu)}{\rho(1 + \nu)(1 - 2\nu)}} \quad \text{Ec. 3.1}$$

Los ensayos de eco-impacto están basados en el registro de ondas P que rebotan dentro de un medio en zonas donde la onda deja de propagarse, es decir, zonas donde existe aire. La característica principal de este ensayo consiste en el rebote de ondas P de una cara a otra del ejemplar en estudio (e.g. muro de albañilería). El rebote continuo de un lado a otro es un proceso cíclico que va perdiendo energía mientras más rebotes haya. Este proceso tiene asociada una frecuencia de rebote que corresponde a un espesor, la cual puede ser observada si se procesan los registros de aceleración mediante la Transformada de Fourier (FFT). Luego, V_p se calcula como la división de dos veces el espacio recorrido por la onda (e) entre el periodo (T) asociado a la frecuencia de rebote (f) (L. Miranda et al., 2013) (ver Ec. 3.2).

$$V_p = \frac{2e}{T} = 2ef \quad \text{Ec. 3.2}$$

La interpretación original del método de eco-impacto es asumir el valor de E_d , mediante el cual se calcula V_p acorde a la Ec. 3.1. Luego, con el valor de V_p y un valor f observado

en el espectro se calcula el espesor asociado a dicha frecuencia. Esto suele ser aplicado para detectar la posición de vacíos internos dentro de estructuras de albañilería o de concreto (L. F. Miranda et al., 2012).

Ensayos de vibración ambiental

Los ensayos de vibración ambiental (AVT), o también conocidos como análisis modal operacional (OMA), son pruebas que se aplican a estructuras para determinar sus modos de vibración a partir de excitaciones ambientales (viento, tráfico, movimiento de personas, entre otros). Se utilizan transductores de medida, por lo general acelerómetros, que registran los movimientos de la estructura en diferentes puntos de la misma. Las mediciones deben realizarse durante un tiempo mínimo que garantice el registro adecuado de todas las frecuencias buscadas de la estructura. Por lo general este tiempo se estima como 1000 a 2000 veces el periodo fundamental de la estructura. Asimismo, la frecuencia con la cual se adquieren las aceleraciones también determina las frecuencias máximas que pueden registrarse (Rainieri & Fabbrocino, 2014).

La información recolectada luego debe procesarse para obtener las frecuencias fundamentales y las formas modales y amortiguamientos asociados. Existen técnicas de procesamiento en el dominio de la frecuencia y del tiempo. Las primeras aplican la FFT a las señales de aceleración y en base a ello estiman las frecuencias del sistema. Para determinar los modos de vibración y amortiguamientos se emplean técnicas más avanzadas como *Frequency Domain Decomposition* (FDD) o *Enhanced Frequency Domain Decomposition* (EFDD). Por su parte, las técnicas en el dominio del tiempo emplean funciones paramétricas para representar las señales de aceleración. El método *Stochastic Sub-space Identification* (SSI) es uno de los más empleados y fiables para una estimación precisa tanto de las frecuencias como formas modales y grados de amortiguamiento de la estructura.

Termografía infrarroja

Las pruebas de termografía infrarroja (IRT) son una herramienta adecuada para el diagnóstico estructural de las construcciones patrimoniales debido a su naturaleza no destructiva, la rápida ejecución de las pruebas y la viabilidad de una evaluación a distancia (González Fernández, 2007). Esta técnica se basa en que los cuerpos sólidos absorben radiación del medio de acuerdo a sus propiedades térmicas. Dependiendo de factores como la humedad o densidad del material, absorberán mayor o menor cantidad de

radiación, lo cual permite determinar la presencia de diferentes materiales, humedad, grietas y otras patologías superficiales o subsuperficiales observando una imagen térmica del objeto en estudio.

Los ensayos IRT se clasifican en activos y pasivos. En los primeros se requiere de una fuente de calor que irradie el objeto en estudio y genere un flujo de calor en su superficie de modo que puedan observarse adecuadamente las diferencias de temperatura en el termograma. Esto por lo general suele aplicarse en zonas internas donde no hay radiación solar que genere un flujo de calor en el material. Por otro lado, los ensayos IRT pasivos no requieren de fuente externa de calor dado que la propia radiación del ambiente logra calentar lo suficiente al objeto en estudio y se pueden observar diferencias de temperatura en los termogramas.

Inspección visual

La inspección visual resulta ser la técnica imprescindible al momento de realizar un diagnóstico del estado de daño. Da una primera impresión sobre el estado actual de la estructura en estudio y, además, acorde a la experiencia del equipo evaluador, sirve para la toma de decisiones sobre puntos clave en donde se deban realizar ensayos. Tiene la ventaja de ser una técnica muy económica y rápida.

3.3 GENERACIÓN DE LA NUBE DE PUNTOS

El uso de fotogrametría y escaneo láser dentro del sector AEC ha ido creciendo cada vez más en la última década. Integrar información geométrica dentro de un entorno virtual no solo permite verificar las dimensiones de los proyectos nuevos, sino que también se pueden observar cambios a lo largo del tiempo, registrar errores en los procesos constructivos y desarrollar modelos *as-built* que documenten todo lo observado en campo.

La aplicación de estas tecnologías en la intervención de estructuras existentes también es de gran relevancia dado que permite levantar información geométrica precisa de manera rápida en comparación con métodos tradicionales. En estructuras patrimoniales, estas técnicas se presentan como las alternativas más eficaces ya que la compleja información geométrica, así como los abundantes ornamentos, piezas de arte, y mobiliario pueden ser fácilmente capturados. Al integrar ambas técnicas se garantiza una adecuada representación geométrica de la estructura real.

Como resultado del proceso de reconstrucción 3D se obtienen varios archivos de nubes de puntos tanto del escaneo láser como del proceso de fotogrametría. Cada archivo puede contener varios miles o hasta millones de puntos, dependiendo de la precisión de los equipos empleados. En el caso del TLS, la ubicación de cada estación de escaneo debe ser ubicada respecto al resto de nubes de puntos correspondientes a las diferentes estaciones ubicadas a lo largo de la estructura. Este proceso es conocido como registro, luego del cual se procede con el alineamiento de las nubes de puntos. El alineamiento se puede llevar a cabo de manera automática en caso exista un adecuado solapamiento, o de manera manual en caso el software no detecte congruencias entre nubes de puntos. Por otro lado, en el proceso de fotogrametría debe existir un adecuado traslape entre información contenida en cada fotografía para que el software pueda detectar zonas en común y en base a ello genere la nube de puntos. Luego, se genera una nube de puntos densa a partir de los puntos recolectados mediante interpolación de coordenadas y se procede con el escalamiento de la misma en base a una dimensión referencial conocida. Además, si se ha realizado fotogrametría en diferentes áreas, luego se realiza el alineamiento correspondiente entre ellas.

Una vez que se tenga cada una de las nubes de puntos, se procede con un proceso de limpieza y filtrado general. Las nubes de puntos finales, es decir, la proveniente del proceso de TLS y del proceso de fotogrametría se unen y son alineadas manualmente en un software externo, de modo que se obtiene una nube de puntos híbrida. Esta nube de puntos puede refinarse en base a los requerimientos que se necesiten, como seccionamiento, limpieza, cambio de orientación, entre otras acciones.

3.4 PROCEDIMIENTO SCAN-TO-BIM

El patrimonio arquitectónico suele presentar geometrías complejas. En particular, en la arquitectura andina, se suele encontrar influencia de elementos del tipo Barroco y vestigios del gótico. La arquitectura barroca está caracterizada por gran exuberancia ornamental, llegando a ser interpretada de manera particular según la región en la que se desarrolle. Además, otorga dinamismo a las estructuras mediante el uso de ondulaciones en interiores y en la fachada (Conti, 1980). Sin embargo, el sistema estructural encargado de soportar las cargas verticales se compone principalmente de elementos de forma regular cuya geometría se representa fácilmente por poliedros sencillos.

En este sentido, para lograr modelos geométricos fiables y representativos de la realidad es necesario tomar en cuenta el proceso constructivo de los elementos estructurales y arquitectónicos. Esto implica separar los elementos estructurales de los elementos arquitectónicos, es decir, modelarlos como entidades independientes. Además, se requiere una revisión bibliográfica extensiva sobre los métodos constructivos locales, así como de los principios geométricos detrás de elementos como bóvedas, arcos y domos.

Dentro del procedimiento Scan-to-BIM, el modelado de los elementos consiste primero en generar geometrías sólidas a partir de la nube de puntos, y luego realizar la parametrización de las mismas en el software BIM. Existen diversas metodologías para la generación de modelos sólidos y la elección de una u otra dependerá de la finalidad del modelo. Si se desea representar las deformaciones y desviaciones verticales de los muros, el modelado debe realizarse en algún software externo de modelado *free-form* como Mc Nell Rhinoceros (Robert McNeel & Associates, 2021), Autodesk Inventor, Solidworks (Dassault Systèmes, 2015), entre otros. Por el contrario, si se desea realizar un modelo aproximado de los elementos estructurales dado que el propósito es realizar un análisis estructural o no se requiere dicho nivel de representación, entonces el modelado puede realizarse de manera manual o semi-automática mediante modelado generativo en software externo y luego importar la geometría al software BIM para la correspondiente parametrización. Otra opción es realizar el modelado dentro del mismo entorno BIM, siguiendo procedimientos manuales y semi-automáticos con ayuda de *plugins* que faciliten el modelado de geometrías complejas.

En esta investigación se propone el modelado únicamente empleando software BIM y un *plugin* nativo del mismo. En este caso se ha elegido Autodesk Revit dado que es un entorno ampliamente usado y con bastante respaldo tanto de soporte técnico como de información en internet. El *plugin* empleado es Dynamo (Autodesk INC, 2014), el cual está basado en programación gráfica y/o textual que permite interactuar con Revit para la automatización de tareas, la creación de geometrías complejas mediante modelado generativo, así como la gestión y el intercambio de información con software externo.

El procedimiento se separó en modelado manual y modelado semi-automático. Se separaron los principales elementos tanto estructurales como arquitectónicos de acuerdo a su complejidad geométrica y según ello se adoptó un procedimiento de modelado. La Tabla 3.1 resume las categorías de los elementos del modelo y describe la familia de Revit

asociada y qué proceso de modelado se adoptó. El modelado inicia importando la nube de puntos dentro del software Autodesk Recap Pro, dado que únicamente mediante este puede insertarse información de nube de puntos al software Revit mediante los formatos .rcp o .rcs. Una vez insertada la de nube de puntos dentro de Revit, se procede a orientarla y fijarla en su posición final dado que es información que debe mantenerse fija en todo momento para evitar inconvenientes futuros durante el modelado.

Tabla 3.1 Información de modelado de los elementos en Revit

Tipo de modelado	Clase de familia	Clase de elemento
Manual	Sistema	Pisos
		Techos
	Cargable	Muros
		Vanos
Semiautomático	<i>In Place / Cargable</i>	Columnas
		Arcos
	<i>In Place</i>	Remates / fachada
		Cornisas
		Ménsulas
		Bóvedas
		Rellenos

Modelado manual

El modelado en software BIM usualmente está marcado por el uso de librerías de componentes preestablecidos. En el caso de Revit, se denominan familias. Esto es de mucha ayuda para la mayoría de proyectos de estructuras modernas, donde la repetición de elementos y geometrías es una constante. Sin embargo, este tipo de modelado no logra adaptarse del todo a las exigencias presentadas en estructuras patrimoniales (Garagnani & Manferdini, 2013). Mas aún, si se desea alcanzar un GOA elevado, el uso de familias preestablecidas en Revit puede convertirse en una tarea agotadora. A pesar de ello, se puede modelar de manera aproximada diversos elementos estructurales de manera manual mediante las familias de sistema y familias paramétricas cargables de Revit. Al usar las familias preestablecidas para cada tipo de elemento, se garantiza la adecuada interacción entre ellos, dado que Revit, al ser un software BIM, mantiene relaciones entre elementos que en la realidad están relacionados, facilitando así el modelado.

Al utilizar las familias de sistema o familias cargables, en la mayoría de casos, se requiere de una vista en planta o en elevación en donde se observe claramente el elemento a modelar en la nube de puntos. Luego, mediante planos de trabajo, se procede a crear el

elemento, o curvas guías que sirvan para insertar las familias correspondientes. En la Fig. 3.2 se observa el proceso de creación de un arco dentro de Revit. Primero se establece una vista adecuada tomando en cuenta la nube de puntos como elemento referencias para dar forma a la geometría. Luego, se crea un plano de trabajo en el cual se crean las curvas que sirven como referencia para insertar el arco. Finalmente, se inserta la familia correspondiente tomando en cuenta la curva creada como curva guía, y luego se posiciona el elemento en su ubicación final en caso se requiera modificar.

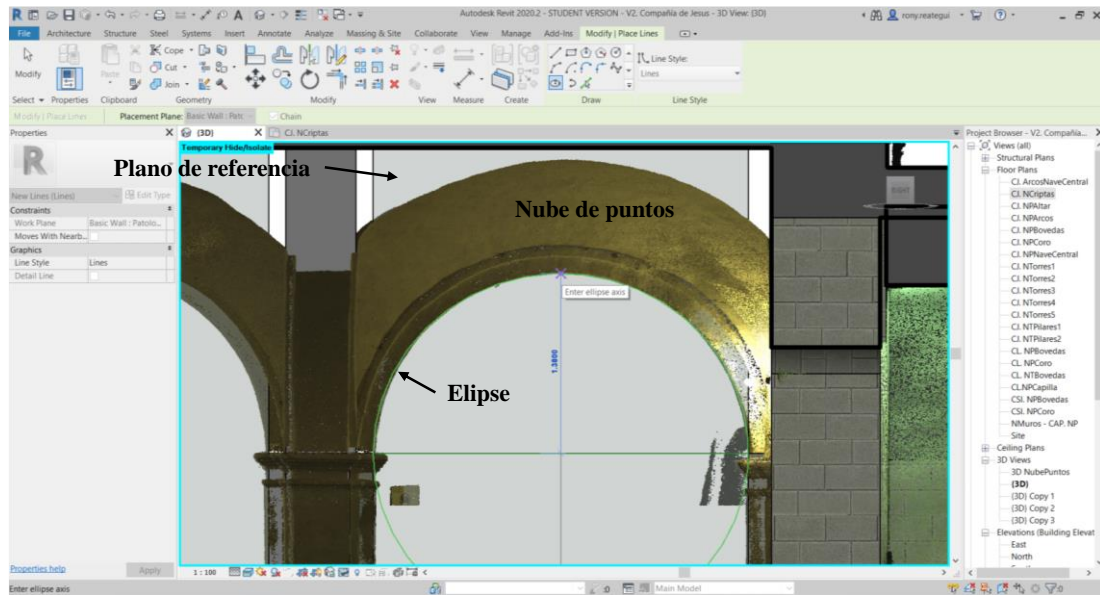


Fig. 3.2 Modelado manual de un arco utilizando la nube de puntos como referencia

Del mismo modo, la creación de familias cargables en Revit es un procedimiento imprescindible y depende también de la nube de puntos. Para la creación de estas, se debe abrir el editor de familias y seleccionar un *template* correspondiente al tipo de familia que se desea crear (e.g. columna, arco, mobiliario, puerta, modelo genérico, entre otros). El problema es que la interfaz de Revit no permite cargar archivos de nube de puntos dentro del editor de familias. En este sentido, se decidió elaborar todas las familias cargables como familias paramétricas, es decir, todas sus dimensiones fueron parametrizadas, de modo que puedan insertarse dentro del proyecto, y se modifiquen las dimensiones acordes a las medidas que indique la nube de puntos.

Algunos elementos arquitectónicos, tales como remates superiores, cornisas, pilastras, entre otros, son elementos de forma compleja que requieren seguir el patrón geométrico capturado por la nube de puntos. En estos casos, al tratarse de objetos que deben modelarse dentro del mismo proyecto, se decidió modelarlos como familias *In-place*. Este

tipo de modelado debe evitarse dado que la geometría únicamente se almacena dentro del proyecto y no puede reusarse en otros proyectos similares. Sin embargo, dada la complejidad geométrica presentada, se decidió adoptar esta aproximación y luego exportar la geometría como un modelo de grupo. Esta opción permite guardar una geometría creada dentro de un proyecto en formato .DWG o .SAT. A continuación, se decidió abrir un *template* de familia cargable de modelo genérico, en donde se insertó el archivo .DWG o .SAT exportado previamente. De esta manera, si bien las dimensiones no están parametrizadas, la geometría final se puede insertar dentro del proyecto como una familia cargable. Tal es el caso del remate presentado en la Fig. 3.3. Se observa que ha sido creado como una familia cargable, y los elementos sólidos se asemejan de manera aproximada a la nube de puntos. Es importante mencionar también que, dependiendo del tamaño del proyecto, la nube de puntos contendrá información precisa y densa que permita modelar de manera muy exacta, o bien puede contener poca información que solo permita adoptar geometrías aproximadas de los elementos estructurales y arquitectónicos. En el caso de la Fig. 3.3, el remate se encuentra a 30m del nivel del suelo, y la información solo ha sido capturada mediante fotogrametría aérea por medio de un dron.



Fig. 3.3 Remate superior modelado como familia *In-place* a partir de la nube de puntos

Modelado semi-automático

Si bien los principales elementos estructurales pueden ser modelados manualmente mediante familias de sistema o paramétricas de Revit, el sistema de bóvedas y rellenos

que usualmente se encuentra en las estructuras patrimoniales no tiene algún soporte de modelado en el software BIM de la actualidad. Existen algunos estudios que buscan, justamente, generar herramientas que ayuden al modelado de dichos elementos estructurales. Sin embargo, aún no se ha llegado a estandarizar el uso de algún software en particular o algún plugin para software existente. Además, el uso de librerías paramétricas existentes no logra acoplarse del todo a las situaciones particulares de cada entorno debido a la variabilidad que se encuentra en cada estructura, sumado al hecho de que no existe un entorno común en donde se pueda acceder a dicha información a pesar de los intentos ya realizados.

En este sentido, aún es necesario modelar desde cero para cada caso en particular los sistemas estructurales complejos. El uso de software especializado ha sido un enfoque ampliamente utilizado en los últimos años debido a su gran potencial mediante el uso de superficies NURBS (*non-uniform rational B-spline*), fiabilidad de resultados e integración con el software BIM. Banfi, 2017 añade dos niveles de desarrollo geométrico denominados *Grade of Generation* (GOG) 9 y 10. Los ocho primeros GOGs corresponden a operaciones booleanas conocidas como *extrusion*, *loft*, *sweep* y *blend* las cuales se adaptan a los perfiles de la nube de puntos, mientras que los GOGs 9 y 10 corresponden al uso de los mismos puntos como referencia para crear superficies que sirven para crear los elementos sólidos. Esto se aplica sobre todo en cúpulas, bóvedas, o muros con desviaciones en altura. La Fig. 3.4 presenta la descripción de los GOGs y sus aplicaciones en la generación de geometría.

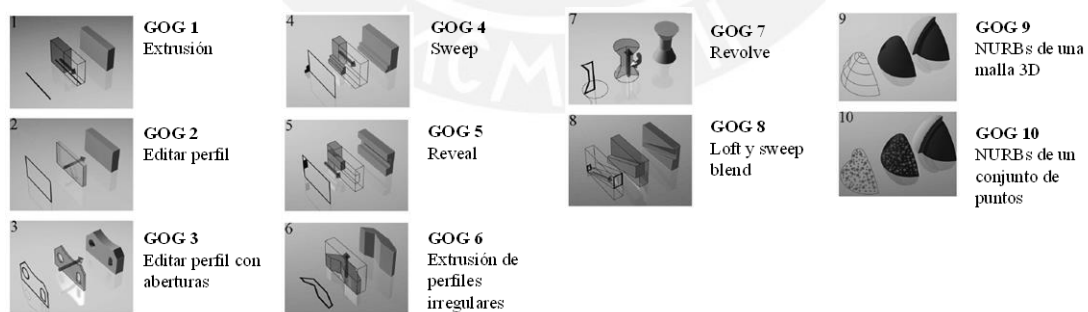


Fig. 3.4 Diferentes GOGs para la generación de geometrías (adaptado de Banfi, 2017)

Precisamente debido a la complejidad en las formas de las bóvedas y rellenos, se usó una metodología similar a la propuesta por Banfi, 2017 respecto al GOG 9 para la creación de las mismas. Este proceso consiste en definir curvas interiores y exteriores de la superficie a modelar en base a la nube de puntos, y mediante operaciones de extrusión y

loft se crean superficies interiores que luego sirven para crear los sólidos por medio de asignación de espesores a las curvas. La diferencia respecto del procedimiento propuesto por Banfi, 2017 es que las operaciones se realizan dentro del mismo software BIM con ayuda del *plugin* Dynamo. Esto aumenta considerablemente la compatibilidad y facilidad de implementación de geometrías complejas en software BIM, dado que por lo general se emplea software externo para el modelado de las mismas.

En la Fig. 3.5 se observa el procedimiento de creación de un sistema de bóveda / relleno / techo. Inicia con la creación de una familia paramétrica de curvas 3D basada en una familia de masas de Revit. Dicha familia, al ser paramétrica, adopta las dimensiones exactas de cada uno de los ejemplares de las bóvedas acorde a la nube de puntos. Luego, una vez colocadas en su sitio y con los parámetros correspondientes, se ejecuta un código de Dynamo encargado de crear los elementos sólidos correspondientes al sistema de bóvedas. Se requiere seleccionar la familia de curvas 3D e ingresar parámetros como el espesor de la bóveda, dimensiones de la sección de los nervios, radio de las claves, nombre de la familia resultante, entre otros parámetros dependiendo del tipo de bóveda. El proceso está basado en seguir el sistema constructivo de las bóvedas, por lo que cada elemento es representado por un ejemplar de familia independiente dentro de Revit. Con ello se logra representar de manera más real e incluso realizar análisis de incidencia en base a considerar o no las claves, o los rellenos en un análisis estructural. Este procedimiento se aplica para cada tipo de bóveda existente en el proyecto.

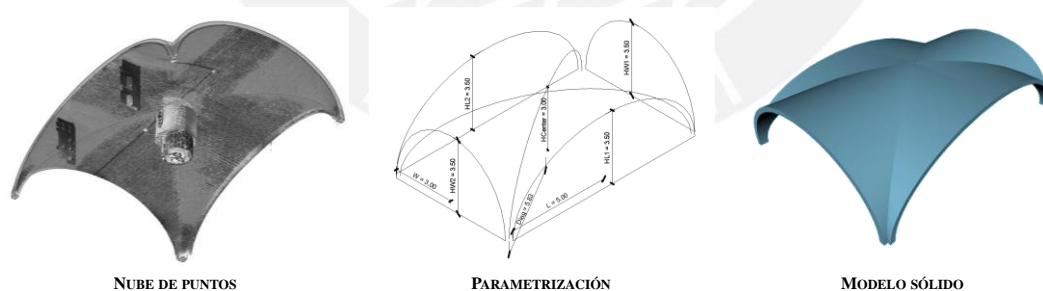


Fig. 3.5 Procedimiento de modelado semi-automático utilizando Revit y Dynamo

Modelado de la información semántica

Los ensayos no destructivos realizados en la estructura (por ejemplo, ensayos sísmicos, AVT, IRT) implican información que debe adjuntarse al modelo HBIM, ya sea porque es necesario identificar las zonas en las que se han realizado o porque indican propiedades particulares de determinadas zonas de la estructura. Tal y como lo indican Bruno &

Roncella, 2019, las herramientas BIM proporcionan un conocimiento global de la estructura y ayudan a optimizar los procesos de mantenimiento, conservación y gestión de estructuras, gracias a su capacidad para integrar y gestionar tanto la información geométrica como la no geométrica en un modelo virtual. En este sentido, la necesidad de integrar la información de diagnóstico dentro del modelo HBIM es imprescindible hoy en día para llevar a cabo proyectos de documentación, conservación y restauración de estructuras patrimoniales.

La información semántica recolectada tiene naturaleza tanto gráfica como textual. La información gráfica corresponde a patologías estructurales identificadas dentro de la estructura evaluada. Estas pueden ser manchas de humedad, grietas, deposiciones, ataque biológico a los materiales, desprendimientos, abultamiento del recubrimiento, manchas negras, entre otras. Representar esta información dentro de un modelo 3D puede representar una gran ventaja respecto a su representación 2D, dado que puede llevarse un control adecuado de cómo van variando a lo largo del tiempo la presencia de las mismas, o incluso generar vistas personalizadas usando filtros de visualización por patología. Por su parte, la información textual como materiales, estado de conservación de los elementos, información de intervenciones, restauración, entre otros parámetros, requiere ser agregada al modelo 3D si se desea crear vistas automatizadas del estado de conservación, zonas de intervención y restauración usando filtros de visualización. Además, al contener toda la información existente respecto a algún elemento estructural dentro de un mismo entorno virtual se genera una integración y centralización de la información, y con ello los procesos de gestión mejoran.

En este sentido, se desarrolló una metodología para insertar información de diagnóstico estructural dentro del modelo geométrico 3D. En las investigaciones de Chiabrando et al., 2017; Malinverni et al., 2019 se ha demostrado que es posible crear elementos y asignar propiedades visuales dentro del software BIM para el mapeo de daños. Para ello utilizan componentes adaptativos que se adaptan a las diferentes curvaturas y formas sólidas complejas que existen en las estructuras patrimoniales. En esta investigación se utiliza un enfoque similar, con la diferencia que para la creación y visualización de las patologías se utiliza Dynamo (ver Fig. 3.6). El procedimiento consiste en crear un plano de referencia paralelo a la superficie donde se proyectará la patología. A continuación, se dibuja la forma de la patología como una curva cerrada en el plano de referencia, y se ejecuta un

código de Dynamo que se encarga de proyectar la curva 2D en la superficie y crea la patología como una familia de modelos genéricos con un grosor muy fino. La ventaja de este método es que permite proyectar dibujos planos sobre superficies curvas como bóvedas y cúpulas, o incluso sobre elementos más complejos como cornisas. Los parámetros de entrada son: la curva cerrada que representa a la patología, la dirección de proyección, el tipo de patología que se va a proyectar, la superficie en donde se desea proyectar la patología, y algún elemento genérico que se encuentre por sobre la superficie donde se proyectará, de modo que la proyección se adapte a dicha forma también, por ejemplo, una cornisa.

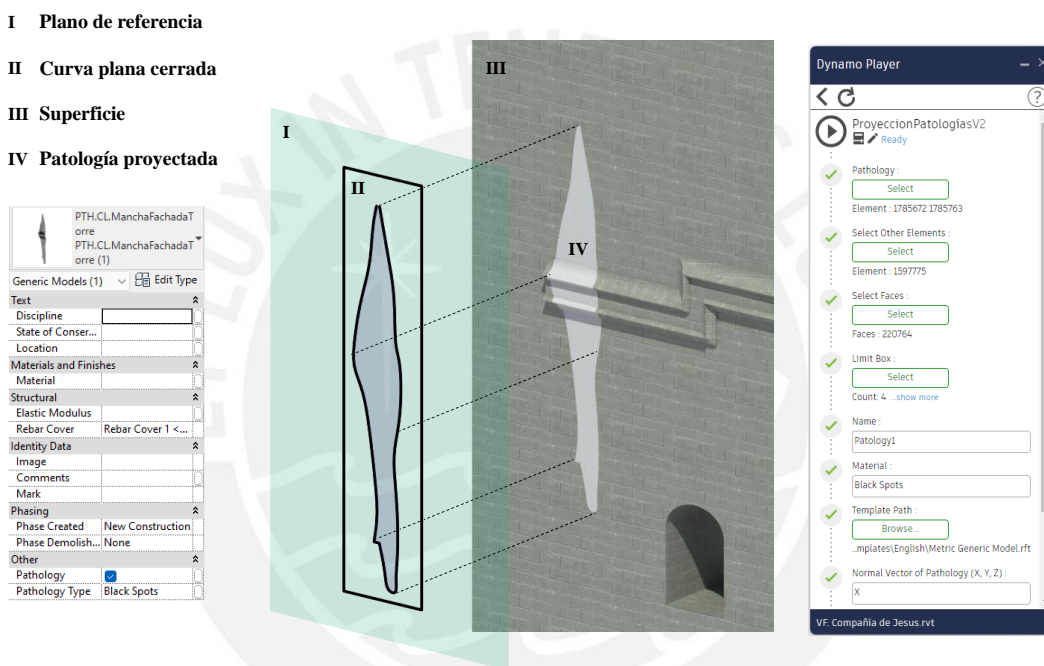


Fig. 3.6 Proyección de patologías estructurales usando programación en Dynamo

En vista de general mapas de daño temáticos con coloraciones diferentes para cada tipo de patología, se utiliza nuevamente Dynamo para asignar filtros de visualización a las patologías acorde al tipo. Para ello, se asigna un parámetro de sistema del tipo *checkbox*, el cual indique si el elemento es una patología o no. Con dicha información, se marca la casilla con un *check* en caso sea un elemento que represente una patología, creando un primer filtro para seleccionar únicamente las patologías del resto de elementos como muros, pilares, detalles arquitectónicos, entre otros. Luego, se crea un segundo filtro utilizando la información del tipo de patología asignado al momento de la creación de las mismas. Cada tipo de patología está asociado a un color, el cual sirve para resaltar al elemento con dicho color al momento de ejecutar el código.

CAPÍTULO 4: S-HBIM APLICADO EN LA IGLESIA DE LA COMPAÑÍA DE JESÚS

Resumen:

Se presenta la aplicación de la metodología propuesta en el caso de estudio: la iglesia de la Compañía de Jesús, en Cusco. Se inicia con una recopilación de información histórica de la iglesia, así como una descripción geométrica y de los procesos de restauración que ha sufrido. Se presentan luego los trabajos y resultados de la campaña experimental de recolección de información mediante ensayos no destructivos, la cual incluye ensayos de eco-impacto, ensayos OMA, escaneo láser terrestre, fotogrametría aérea y ensayos de termografía infrarroja. Finalmente, se presenta la aplicación de la metodología de modelado 3D y los resultados en la iglesia. Se logró generar adecuadamente el modelo 3D a partir de la nube de puntos, así como insertar patologías estructurales y otra información semántica dentro del modelo 3D de la iglesia. Además, se obtuvieron mapas de daño y del estado de conservación de la estructura de manera automática mediante el uso de filtros de visualización dentro del modelo.

4.1 IGLESIA DE LA COMPAÑÍA DE JESÚS

La iglesia de la Compañía de Jesús se encuentra ubicada en la ciudad de Cusco, Perú, una zona andina muy conocida por su riqueza cultural y por haber sido la capital del imperio inca. La ciudad está ubicada a 3400 m.s.n.m, con un clima seco con horas de sol durante el día y temperaturas frías por las noches. La iglesia está ubicada a un lado de la Plaza de Armas de Cusco, donde también se ubica la Catedral de Cusco. Ambas estructuras fueron construidas a mediados del siglo XVI, con un estilo predominantemente Renacentista en la Catedral y Barroco en la Compañía de Jesús, influenciado por los arquitectos españoles de la época. Sin embargo, durante el terremoto de 1650 la Iglesia de la Compañía de Jesús fue severamente dañada y tuvo que demolerse por completo, caso contrario al de la Catedral, la cual solo sufrió daños menores y el colapso de la bóveda de crucería (Cuenca, 1991). La construcción de la nueva iglesia tuvo ciertas críticas en su momento debido al diseño de su fachada la cual restaría importancia a la Catedral. A pesar de ello, la iglesia se terminó de construir luego de 17 años, a finales de 1668.

En 1950 ocurrió un sismo importante en la ciudad de Cusco, el cual, además de dañar otras estructuras importantes en la ciudad, ocasionó el colapso parcial de los campanarios de la iglesia. Además, se derrumbó un arco importante en la fachada lo que ocasionó fallas en la bóveda del coro, además de otras fallas en los sistemas de techos y la cúpula de la iglesia (Kubler, 1953). Luego de ello, se iniciaron procesos de restauración los cuales buscaron reusar los materiales de piedra originales; sin embargo, se tuvo que emplear mortero de cemento e incluso varillas de acero para darle más estabilidad a la estructura de los campanarios (ver Fig. 4.1).

Tal como se describe en Angeles Vargas, 1983, la iglesia se compone de una nave central, con dos capillas laterales adosadas a la estructura: la capilla de la Virgen de Loreto en el lado izquierdo y la capilla de San Ignacio de Loyola al lado derecho. La planta es en forma de cruz latina y cuenta con un coro, un presbiterio y la sacristía. Además, tiene una capilla subterránea que se encuentra debajo del altar mayor que fue descubierta en 1986. El sistema de techos está conformado por bóvedas de cañón con lunetos, bóvedas de crucería con nervios, bóvedas de arista y bóvedas vaídas, según la zona donde estén ubicadas. Cuenta además con una cúpula de 13m de diámetro interior. Asimismo, presenta dos torres-campanarios de tres cuerpos: el primero de sección constante y robusta que termina en ménsulas que soportan una cornisa; el cuerpo intermedio que

presenta una ventana sobre la cornisa inferior que sirve como balcón dado que se puede acceder desde el coro interior y termina en una cornisa sostenida por vigas pétreas; y finalmente el tercio superior en donde se ubica el campanario, el cual consta de cuatro vanos de forma cuasi elíptica, adornados a los lados por varias falsas pilastras que terminan en una cornisa que rodea los cuatro lados, desde donde nace el tambor que sostiene la cúpula del campanario.

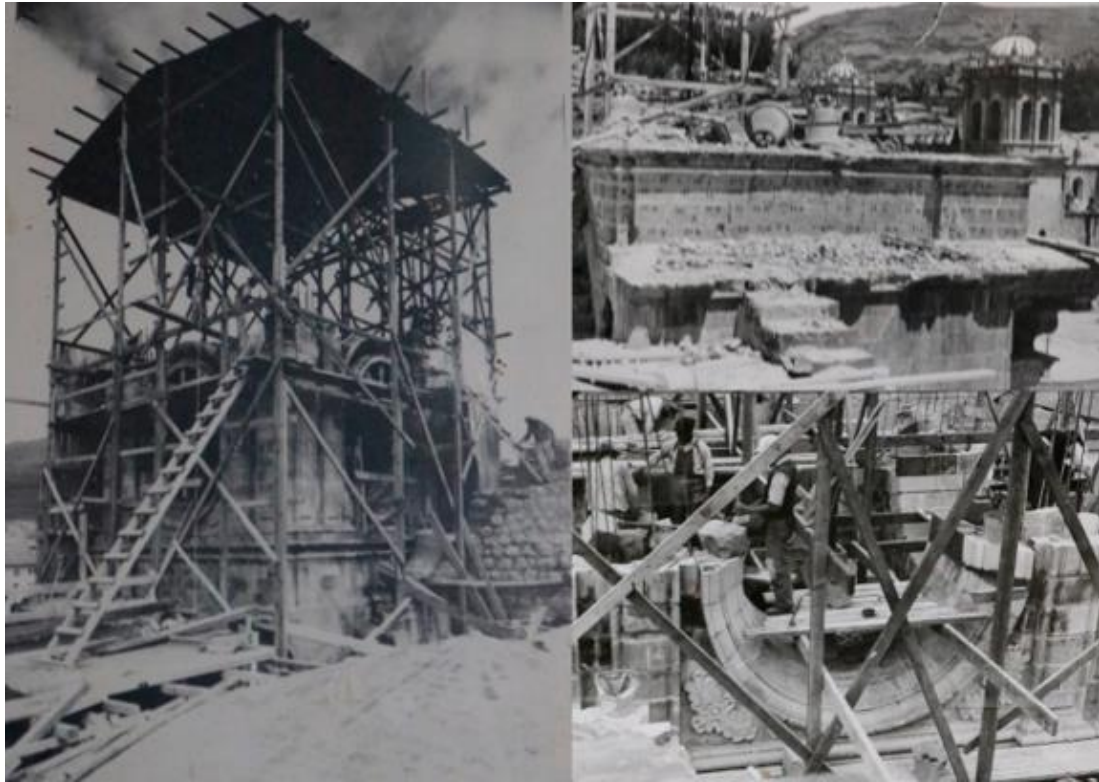


Fig. 4.1 Proceso de restauración de los campanarios luego del sismo de 1950

La fachada es de estilo barroco andino, con una configuración de portada retablo. Este tipo de portadas ofrecían una presentación artística que acentúa el carácter religioso y espiritual del lugar en conjunto con el paisaje (Luks, 1973). De esta manera, la iglesia se convirtió en un referente para muchas iglesias en la región, tanto por su fachada llena de ornamentos, como por su diseño y distribución espacial (Kubiak, 2012). Una descripción más detallada de la fachada se encuentra en (Chara Zereceda, 1998). En la Fig. 4.2a y Fig. 4.2b se presentan fotografías de la iglesia de la Compañía de Jesús, y la Fig. 4.2c muestra su ubicación en la ciudad de Cusco.



Fig. 4.2 Iglesia de la Compañía de Jesús en Cusco: (a) fotografía de la fachada (Guía de Viaje Machu Picchu, 2015), (b) fotografía de la nave central, y (c) plano de ubicación (adaptado de Mike Weston Andean Travel, 2011).

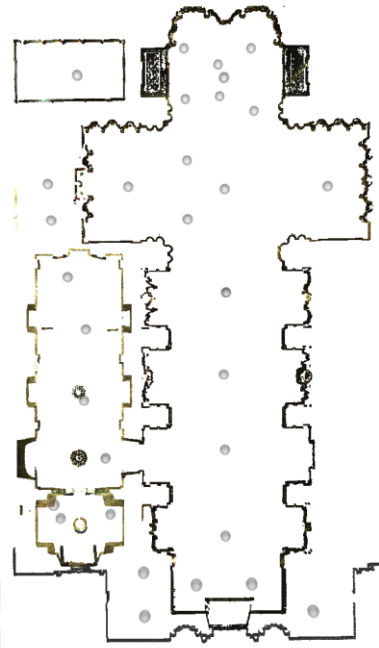
4.2 RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN EN CAMPO

Información geométrica

En la investigación se aplicó TLS y fotogrametría aérea para obtener una nube de puntos híbrida con información tanto del interior de la iglesia como del exterior. Se llevaron a cabo 44 sesiones de escaneo, que consistieron en un escaneo de 360° en resolución media mediante un escáner láser Leica C10. Estas sesiones se realizaron en el interior de la nave principal, el coro, los campanarios, la capilla subterránea y en el interior de las capillas de la Virgen de Loreto y de San Ignacio. Se realizó un escaneo unificado de toda la nave central de la iglesia en conjunto con la capilla de la Virgen de Loreto. La capilla de San Ignacio se escaneó en un proyecto diferente debido a que no había conexión directa con la nave central. De la misma manera, se realizó un escaneo adicional con tres puntos de medición desde el exterior de la iglesia para recolectar la información de la fachada. Este escaneo se realizó a una resolución baja y sin registro fotográfico, es decir, sin información de color, dado que el tráfico de vehículos y personas impidió realizar mediciones muy prolongadas. El registro y alineamiento de las nubes de puntos se realizó en el software Leica Cyclone (C.R.Kennedy & Company, 2017). En la Fig. 4.3a se presentan fotografías del proceso de adquisición de datos mediante el escaneo láser en el interior de la iglesia y en la Fig. 4.3b el procedimiento de registro de nubes de puntos.



(a)



(b)

Fig. 4.3 Procedimiento de escaneo láser: (a) escáner láser Leica C10 y proceso de calibración, y (b) registro de nubes de puntos en Recap Pro

Por su parte, mediante fotogrametría aérea se recolectó la información geométrica del exterior de la iglesia. El procedimiento se realizó mediante un dron con una cámara fotográfica de 20 Mpx, siguiendo un programa de vuelo a una altura de 40-50 m medido desde el nivel del suelo. En total fueron 250 fotografías que fueron procesadas en el software Agisoft Metashape (Agisoft LLC, 2021). La información final fue escalada, limpiada y orientada de acuerdo a ejes de referencia establecidos. En la Fig. 4.4a se presenta el dron usado en el trabajo y en la Fig. 4.4b el proceso de registro de fotografías para la generación de la nube de puntos.



(a)



(b)

Fig. 4.4 Procedimiento de fotogrametría: (a) dron utilizado para capturas las fotografías (DJI, 2021), y (b) procesamiento de la información en el software Leica Cyclone

Finalmente resultaron tres nubes de puntos: Compañía de Jesús (nave central + capilla de la Virgen de Loreto), escaneo exterior, y capilla de San Ignacio. Las tres nubes de puntos fueron limpiadas y compatibilizadas en una única nube de puntos híbrida en el software Geomagic Design X (Artec 3D, 2013). El proceso involucró una demanda computacional significativa debido a la cantidad de datos contenida en cada una de las nubes de puntos. El procedimiento de alineamiento y orientación entre las tres fue tedioso debido a las aproximaciones manuales que tuvieron que realizarse; sin embargo, se logró compatibilizar las tres nubes de puntos, como se aprecia en la vista 3D de la Fig. 4.5a y en el corte longitudinal donde se aprecian los espesores de bóvedas de la Fig. 4.5b. El procedimiento siguiente consistió en importar las 3 nubes de puntos compatibilizadas en el software Autodesk Recap Pro, para guardarlo como formato .rcp y pueda ser importado dentro del entorno de Revit.

(a)



(b)

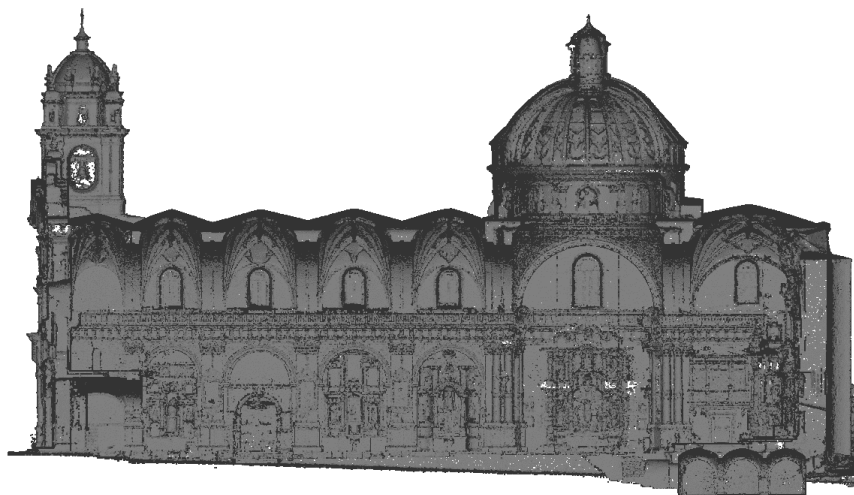


Fig. 4.5 Nube de puntos de la iglesia: (a) vista tridimensional, y (b) corte longitudinal

Caracterización mecánica

En la investigación se aplicaron ensayos sónicos y de eco-impacto en algunas zonas de la iglesia con el fin de determinar las propiedades mecánicas de los materiales. Sin embargo, solo pudieron obtenerse resultados de los ensayos de eco-impacto debido a inconvenientes en el registro de datos de los ensayos sónicos. En total se evaluaron cuatro puntos como se aprecia en la Fig. 4.6a: dos en muros y dos en pilares. Los ensayos se realizaron mediante acelerómetros piezoeléctricos unidireccionales PCB 393B12 y un Dispositivo de Adquisición de Datos DAQ NI-SCXI 1000/NI-SCXI 1531 de 24 bits. La distribución de los sensores en cada ensayo se presenta en la Fig. 4.6b.

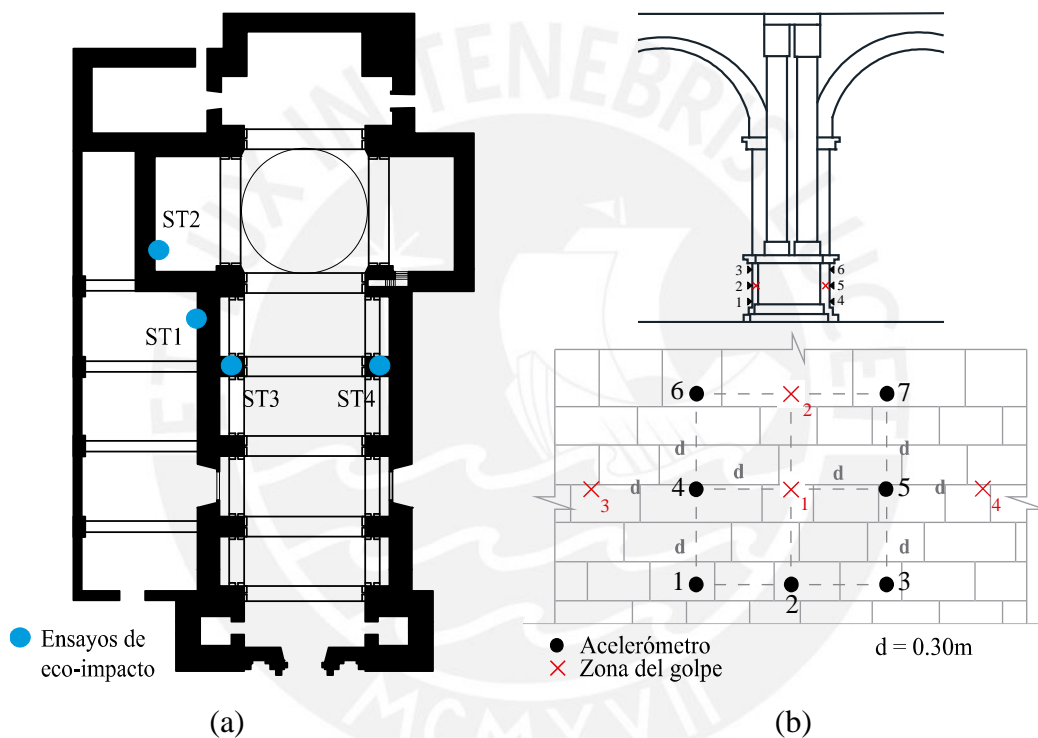


Fig. 4.6 Ensayos de eco-impacto: (a) ubicación de los puntos de medición, y (b) distribución de los acelerómetros en los ensayos en pilares (arriba) y muros (abajo)

Los datos se procesaron usando un programa en Matlab, mediante el cual se calculó la Transformada de Fourier de cada registro de aceleración y se evaluaron las frecuencias presentes (ver Fig. 4.7). Luego, se evaluaron espesores correspondientes a los muros o pilares evaluados y de acuerdo a eso se calculó V_p y con ello el E_d equivalente del material. Los resultados muestran valores para V_p entre 715 y 1033 m/s, con desviaciones estándar entre 5 y 10 m/s. Acorde a L. Miranda et al., 2013, se recomienda corregir estos valores de velocidad de onda P dividiendo entre 0.83 para obtener un valor similar al obtenido mediante ensayos sónicos directos. El cálculo de E_d se realizó considerando un

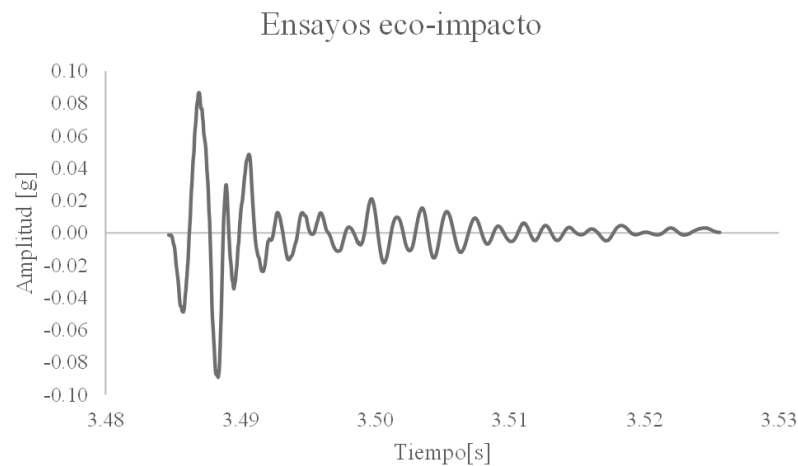
módulo de Poisson igual a 0.20 y una densidad de 1900 kg/m³ para todos los casos. Los resultados se muestran en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1 Resultados de los ensayos de eco-impacto

	ST1	ST2	ST3	ST3
E_d [GPa]	1.44	1.16	1.31	2.41

Estos resultados muestran valores cercanos en el caso de los muros evaluados (ST1, ST2); sin embargo, para los pilares los valores son notoriamente diferentes. Esta diferencia podría ser debido a que existe daño dentro del pilar correspondiente al ST3, mientras que el otro pilar pudo haberse conservado en mejor estado, o haber sido restaurado en algún momento.

(a)



(b)

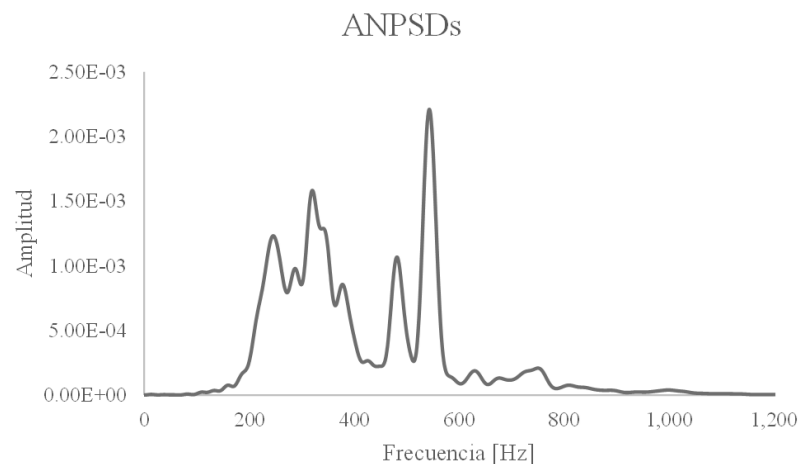


Fig. 4.7 Ensayos de eco-impacto: (a) registro de aceleración, y (b) espectro de Fourier del registro con bandas de frecuencias identificadas

Caracterización dinámica

Los ensayos OMA se realizaron con el objetivo de estimar las frecuencias naturales y las formas modales de la estructura. Sin embargo, debido a las constantes precipitaciones durante la campaña experimental, no fue posible acceder a las cubiertas para una mejor adquisición de los datos. En este sentido, sólo se analizaron los campanarios y un muro perimetral de la capilla de la Virgen de Loreto. La adquisición de datos se realizó con tres acelerómetros triaxiales que presentan una sincronización GPS incorporada. Los ensayos de vibración ambiental se realizaron en tres configuraciones separadas, con dos acelerómetros de referencia situados en los campanarios y otro móvil situado sobre el muro lateral (ver Fig. 4.8). La duración de las pruebas se fijó en 25 minutos, con una frecuencia de muestreo de 200 Hz.

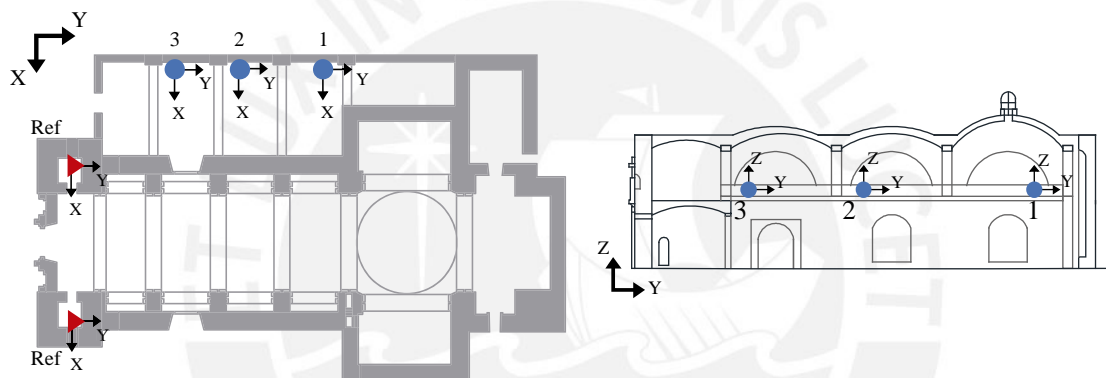


Fig. 4.8 Configuraciones empleadas en los ensayos de vibración ambiental

El procesamiento de los datos se llevó a cabo mediante la técnica EFDD implementada en el software ARTeMIS Modal Pro. Se identificaron los tres primeros modos de vibración de la iglesia. Los dos primeros modos están relacionados exclusivamente con los campanarios. El primero es una traslación a lo largo del eje X con una frecuencia natural de 2.3 Hz y un grado de amortiguamiento $\zeta_1 = 3.9 \%$, mientras que el segundo es una traslación a lo largo del eje Y con una frecuencia igual a 3.1 Hz y $\zeta_2 = 3.3 \%$. En el tercer modo la pared lateral de la capilla de la Virgen de Loreto se comportó en un modo de traslación y flexión a una frecuencia de 4.9 Hz y $\zeta_3 = 3.9 \%$. El espectro de valores singulares junto con las formas modales, las frecuencias naturales y grados de amortiguamiento de estos modos de vibración se ilustran en la Fig. 4.9.

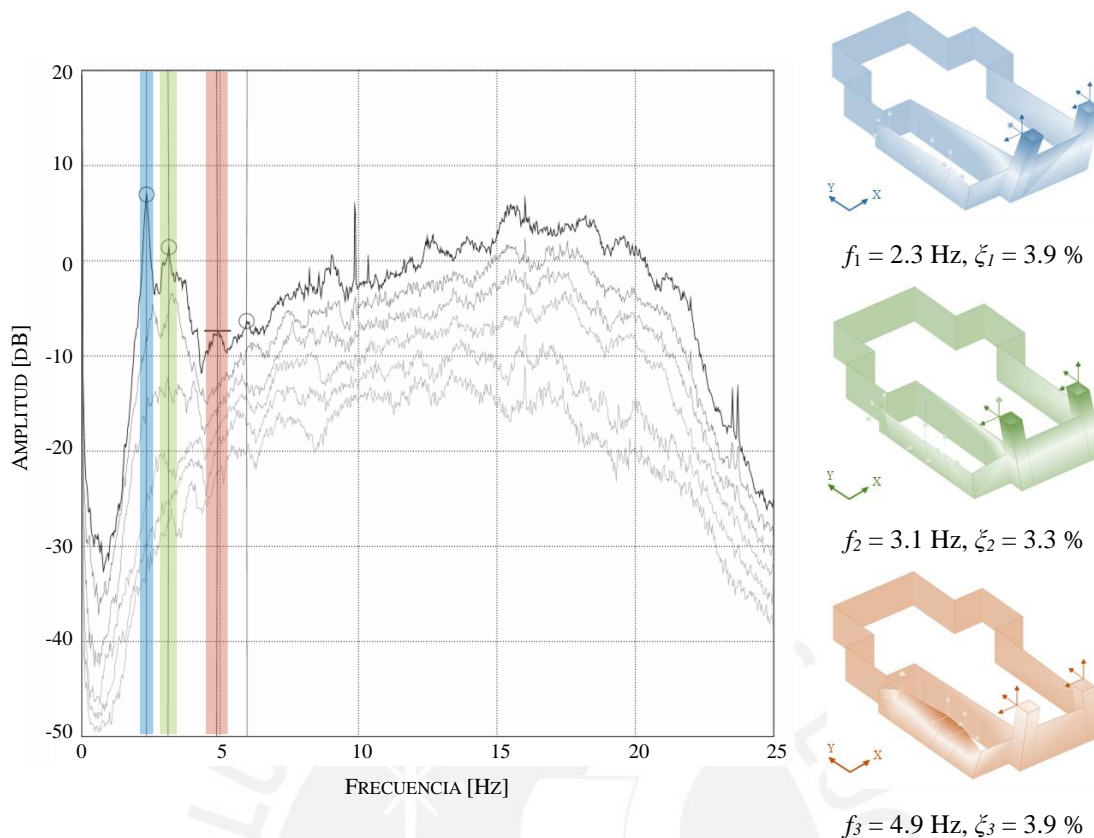


Fig. 4.9 Espectro de valores singulares y formas modales de los tres primeros modos de vibración identificados en la iglesia

Inspección del estado de conservación

La inspección visual permitió identificar patologías superficiales a lo largo de la estructura. Se identificaron grietas superficiales y estructurales, así como manchas de humedad en varios muros, tanto en el interior como en el exterior de la estructura. Además, se identificaron algunos desprendimientos principalmente en las cornisas situadas a lo largo de la nave principal. Se encontró abultamiento del recubrimiento de yeso en algunas paredes, sobre todo en la capilla subterránea, donde el nivel de humedad es más alto por estar situada bajo el nivel del suelo. Algunas fotografías de las patologías identificadas se muestran en la Fig. 4.10.

Se aplicaron ensayos IRT pasivos y activos dentro y fuera de la iglesia. Para ello, se empleó una cámara termográfica FLIR modelo ThermaCAM T440 con una sensibilidad térmica de $0,04^\circ\text{C}$ a 30°C . En las pruebas activas, se aumentó la temperatura de las superficies a evaluar mediante reflectores halógenos de 500 W por un tiempo de 10 a 25 minutos. El pos-procesamiento de las imágenes se realizó con el software FLIR Tools 5.13 (Infrared Training Center, 2016).



Fig. 4.10 Patologías estructurales encontradas en la iglesia

La aplicación de la IRT activa y pasiva permitió identificar sistemas estructurales, así como anomalías estructurales. La IRT pasiva evidenció un cambio en el tipo de material constitutivo del campanario, que puede atribuirse a su reconstrucción tras el terremoto de 1950 (ver la Fig. 4.11a). Se identificó también humedad en un muro exterior de la iglesia. Las zonas más oscuras observadas en el termograma de la Fig. 4.11b corresponden a las partes más dañadas del muro de piedra por la presencia de humedad. Esto concuerda con la presencia de algunos bloques de piedra con daños considerables en estas zonas, posiblemente causados por condiciones de congelación y descongelación. Durante la inspección visual se detectaron grietas en la estructura. Sin embargo, la termografía pasiva mejoró la visualización de estas anomalías estructurales (ver la Fig. 4.11c).

Además, la aplicación de la IRT activa permitió visualizar algunas grietas en unidades de mampostería de piedra que no se detectaron durante la inspección visual. La Fig. 4.12a muestra un termograma en el que se puede identificar una grieta vertical en un bloque de piedra mediante el uso de calor externo. En este sentido, se puede concluir que no sólo el mortero de la mampostería de piedra ha sufrido daños, sino que también algunos bloques de piedra presentan graves grietas. Además, la aplicación de calor en una sección del muro ayudó a mejorar las diferencias térmicas entre el bloque de piedra y el mortero haciendo adecuada la identificación de una mampostería de sillería en el termograma mostrado en la Fig. 4.12b. Por último, el abombamiento del recubrimiento de yeso de los muros de piedra del sótano también se detectó con la IRT activa (ver la Fig. 4.12c). Las áreas representadas por los colores más claros indican las zonas en las que el

recubrimiento está completamente separado de la piedra debido a un abombamiento excesivo.

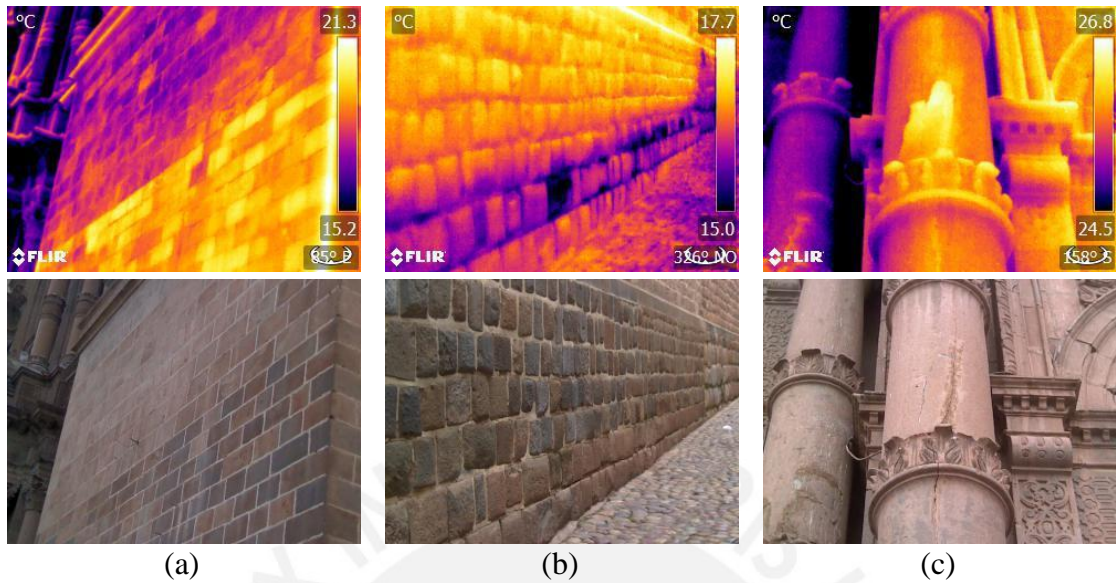


Fig. 4.11 Anomalías detectadas con IRT pasiva: (a) diferentes materiales ubicados en la fachada, (b) humedad en un muro lateral, y (c) grietas y desprendimientos en un pilar

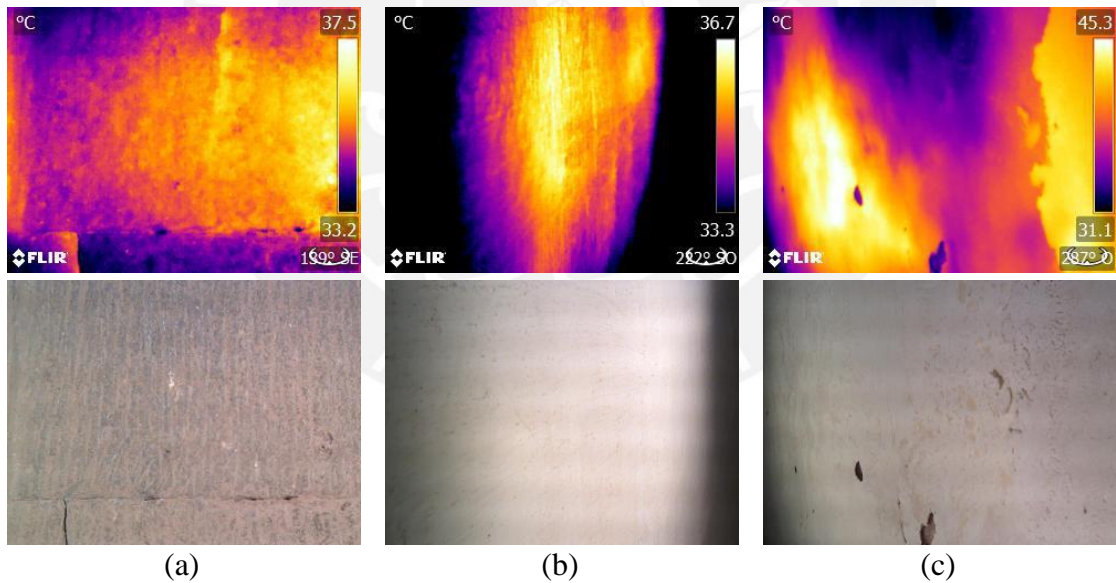


Fig. 4.12 Anomalías estructurales detectadas con IRT activa: (a) grieta en bloque de piedra, (b) sillería localizada, y (c) abultamiento del recubrimiento de yeso

4.2 MODELO BIM

La iglesia de la Compañía de Jesús está compuesta principalmente por muros de albañilería de piedra de entre 1.0 a 2.5 metros de espesor. Además, posee pilares robustos de sección aproximadamente cuadrada de 2.45 metros de lado. Al costado de cada pilar,

existen contrafuertes de sección rectangular que otorgan mayor rigidez a la estructura. Estos elementos principales se modelaron de manera manual y son la estructura resistente principal de la iglesia. Se usaron las familias de sistema predeterminadas de Revit para el modelado de los muros. Debido a que no se conoce la composición interna de estos, se consideró como un muro de una hoja, es decir con un material uniforme a lo largo de todo su espesor. Estas propiedades fueron asignadas a cada uno de los tipos de familia de muro, creándose tantos tipos de muro como espesores se encontraron en la iglesia. Respecto a los pilares principales y contrafuertes, se modelaron usando una familia de columna rectangular parametrizada en ambas dimensiones de la sección. De la misma manera que los muros, debido a que no se conoce la composición interna de los mismos, se consideró como un único material en toda la sección.

Un caso notorio de modelado paramétrico se empleó en los pilares ubicados en la crucería. Dichos pilares tienen una sección particular con un chaflán en una de las esquinas debido a que reciben las cargas de la pechina, y cuentan con varios pilares secundarios que sirven de apoyo a las cornisas y otros ornamentos presentes. Además, según su ubicación dentro de las cuatro esquinas del crucero, la posición del chaflán cambia, por lo que se decidió crear una familia paramétrica con diferentes tipos según la posición del chaflán (ver Fig. 4.13). El modelado incluyó la parametrización completa de todas las dimensiones, así como el uso de fórmulas para mantener las relaciones geométricas entre ciertas distancias, además de fórmulas condicionales para los cuatro tipos de familia creados. Asimismo, se incluyó un parámetro que permite ocultar los detalles arquitectónicos exteriores, dejando únicamente la componente estructural del pilar.

Gran cantidad de elementos tanto estructurales como arquitectónicos poseen formas geométricas complejas que son tediosas de parametrizar. En dichas ocasiones, se optó por elegir un modelado *In-place* adoptando la nube de puntos como referencia y usando operaciones de extrusión, *sweep* o *revolve* ya implementadas en Revit. Tal es el caso de varios detalles arquitectónicos de la fachada y torres (ver Fig. 4.14). Estos elementos se modelaron dentro del mismo proyecto, y luego fueron exportados como una familia de grupo en formato .DWG. Luego, se importaron dentro de un editor de familia de modelo genérico con la intención de poder cargar la familia al proyecto y reusarla en diferentes ubicaciones.

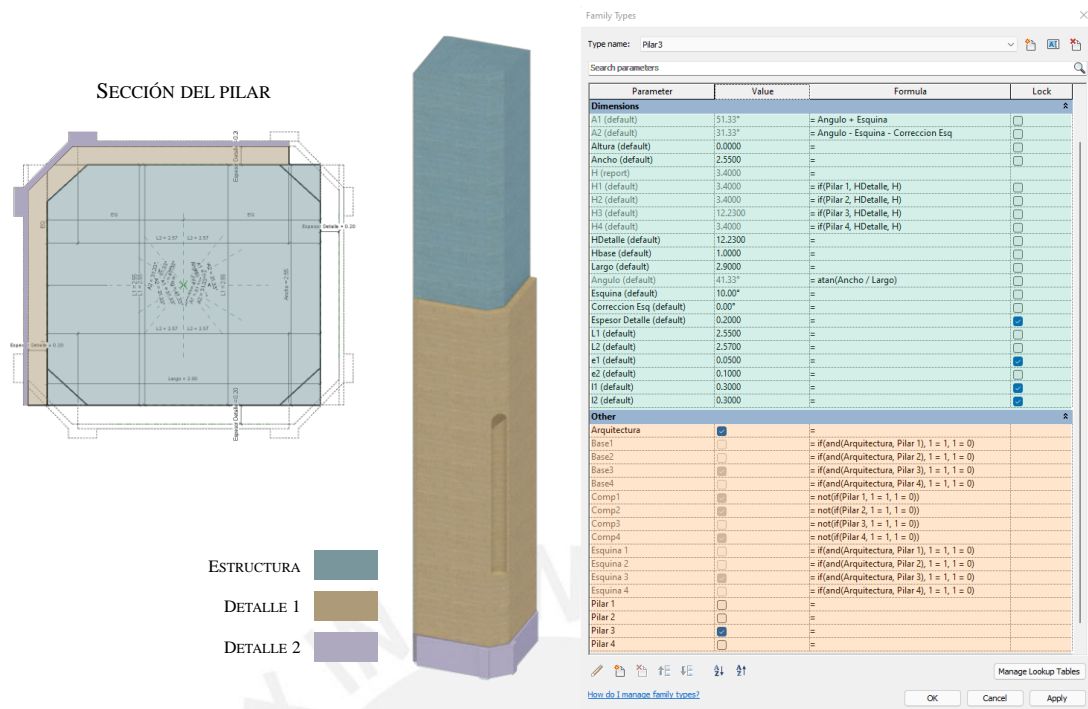


Fig. 4.13 Modelado paramétrico de los pilares del crucero

Asimismo, los elementos se modelaron tomando en cuenta los procesos constructivos. En este sentido, se trató de modelar, en la medida de lo posible, cada elemento como una entidad independiente del resto. Esta tarea, si bien requiere de mayor tiempo de modelado, trae ventajas de interoperabilidad dado que puede discretizarse el modelo en partes independientes de manera sencilla, por lo que pueden retirarse elementos que no se requieren, por ejemplo, si se desea utilizar el modelo para un análisis estructural. Además, es importante tener los elementos como entidades independientes si se desea introducir información semántica a cada uno de ellos. En la Fig. 4.15 se presenta el modelo 3D de los campanarios de la iglesia. Se observa que cada elemento se modeló como entidades diferentes, incluso, las cornisas y aberturas presentes son independientes, por lo que pueden eliminarse u ocultarse si se desea.

Un elemento arquitectónico presente tanto en el interior como el exterior de la iglesia fueron las cornisas. Estas, según la ubicación, presentan desde secciones sencillas como semi-elipses a secciones complejas con varias curvaturas. Estos elementos se modelaron dibujando manualmente un perfil en base a la nube de puntos dentro de un plano de referencia. Una vez dibujado el perfil, se dibujó el trayecto por el cual se arrastra la sección mediante una operación *sweep*. El resultado es una familia *In-place* que sigue el

trayecto de la cornisa y se le asigna el material y las propiedades correspondientes de acuerdo a su ubicación y estado de conservación.

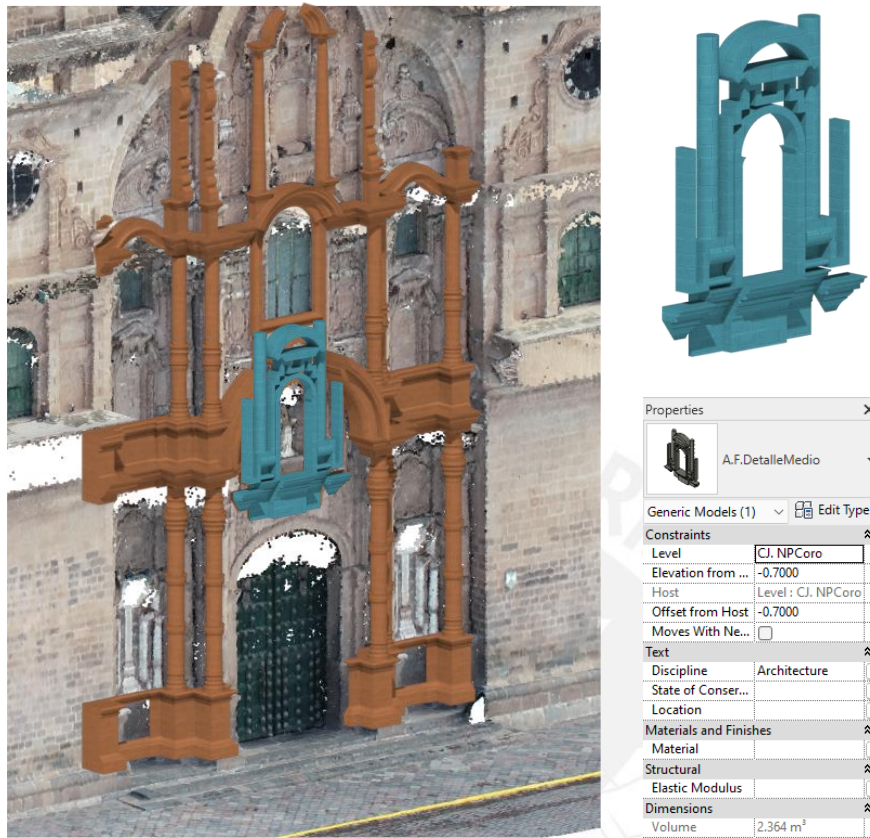


Fig. 4.14 Elemento arquitectónico de la fachada modelado como elemento *In-place*



Fig. 4.15 Elementos arquitectónicos y estructurales de los campanarios de la iglesia

La iglesia también posee elementos estructurales de geometrías complejas, tales como bóvedas, cúpulas, rellenos, techos, pechina, entre otros. Para crear dichos elementos se utilizó Dynamo como soporte de modelado debido a la amplitud de operaciones geométricas que otorga. Tal es el caso, por ejemplo, de la pechina ubicada en el crucero. Este elemento se encarga de soportar las cargas del tambor de la cúpula y las traslada hacia los cuatro pilares del crucero. Es un elemento relativamente sencillo de crear, dado que su interpretación geométrica resulta de cortar con 4 planos verticales perpendiculares entre sí a una semi-esfera. Este procedimiento se parametrizó mediante Dynamo, lo cual permitió utilizar el mismo script para diferentes ejemplares de la iglesia. El script se encarga de seleccionar dos arcos guía que delimitan los límites de la pechina, se asigna un radio de curvatura, el espesor, la categoría de la familia, el material y el nombre de la familia a crearse y se ejecuta el código. Automáticamente se crea una nueva familia que es cargada en el proyecto y ubicada en la posición respectiva (ver Fig. 4.16). Un procedimiento similar se siguió para la creación de zonas de los techos con curvaturas difíciles de crear mediante modelado *In-place* en Revit.

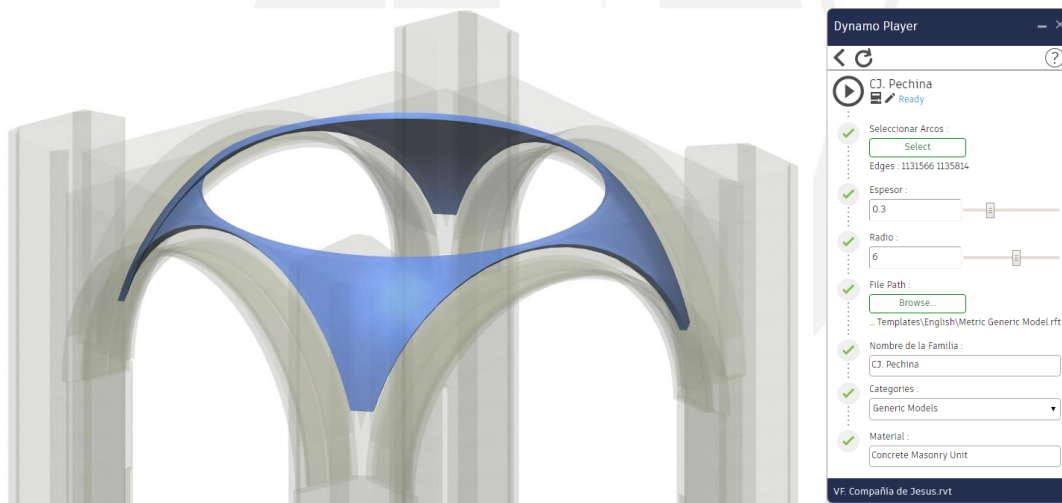


Fig. 4.16 Creación de pechina mediante programación en Dynamo

Por otro lado, un elemento presente en varias zonas de la iglesia y con variedades diferentes son las bóvedas. En la estructura se encontraron bóvedas de arista, de arista con lunetos, vaídas, nervadas y de cañón (ver Fig. 4.17). Algunas de ellas fueron sencillas de implementar utilizando familias *In-place* o incluso familias de sistema (bóveda de cañón); sin embargo, en el caso de las bóvedas de arista, arista con lunetos y nervadas se tuvo que aplicar el procedimiento de modelado semi-automático. El modelado del relleno ubicado entre el extradós de las bóvedas y los techos se realizó también mediante

programación en Dynamo, dado que se requiere utilizar operaciones booleanas de resta entre elementos sólidos.

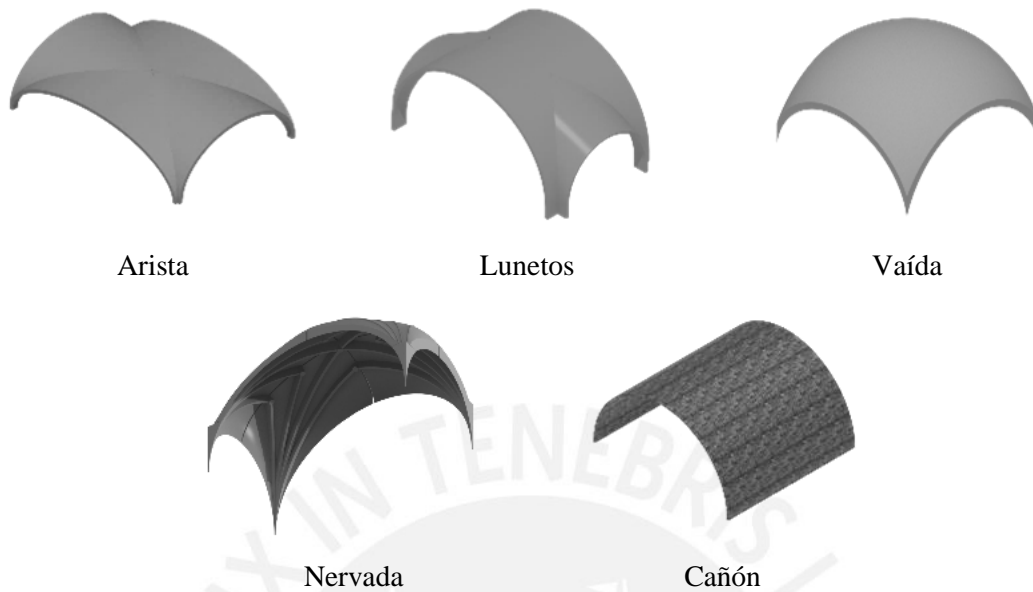


Fig. 4.17 Diferentes tipos de bóvedas presentes en la iglesia

El sistema de bóvedas nervadas fue el más complejo de modelar. Debido a la naturaleza del mismo, se tuvo que separar en cada uno de sus componentes estructurales: tas-de-charge, nervios, claves, bóveda y relleno. Primero se creó la familia de curvas 3D paramétrica que se adapta a la geometría dada por la nube de puntos. Los parámetros de dicha familia sirven como datos de entrada para el script de Dynamo. Dentro del código desarrollado, se crearon módulos específicos para la creación de cada componente a partir de la familia de curvas 3D paramétrica. Además, un aspecto importante es la orientación de la bóveda respecto de los ejes globales. En este sentido, se crearon vectores locales que sirven para orientar a la bóveda en la posición correcta respecto a los ejes globales del proyecto. El modelado del relleno depende de la posición y forma del extradós de la bóveda y de los techos. Por ello, se tuvo que ingresar la geometría de los techos como un elemento de entrada en el código. Esto se realizó fácilmente con el comando *Select Revit Element* implementado en Dynamo, mediante el cual se selecciona un elemento del proyecto y se pueden extraer sus parámetros o, en este caso, la geometría sólida que lo compone. Una vez creados todos los elementos en Dynamo, son regresados al proyecto de Revit como familias independientes. En la Fig. 4.18 se muestra un ejemplar del sistema de bóvedas nervadas, y su descomposición en cada uno de sus componentes estructurales.

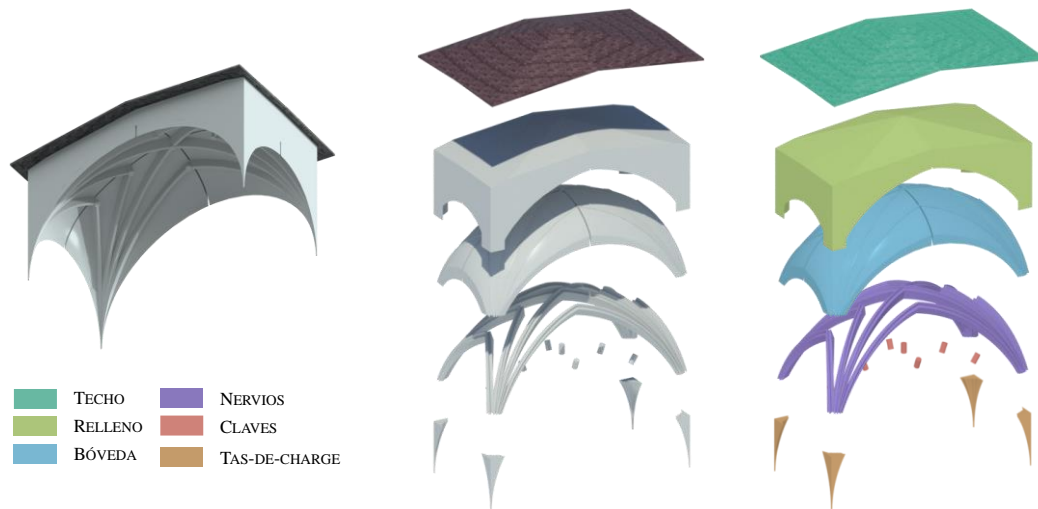


Fig. 4.18 Sistema de bóvedas nervadas de la iglesia

Un aspecto importante al crear los elementos sólidos en Revit es el grado de precisión alcanzado. Dado que el propósito de la investigación es llevar a cabo una representación digital para el diagnóstico y conservación de estructuras patrimoniales, obtener modelos con precisión milimétrica no es la intención, sino más bien basta con que cada elemento sea reconocible y esté referido espacialmente dentro del edificio. Sin embargo, se realizó un análisis comparativo entre un ejemplar de una bóveda nervada y la nube de puntos. Para ello, se utilizó el software de acceso libre CloudCompare para estimar las distancias Cloud-to-Mesh, es decir las distancias entre la nube de puntos y un mesh correspondiente a un elemento sólido creado en Revit. Los resultados se presentan en la Fig. 4.19. El procedimiento consistió en utilizar Dynamo para crear directamente el mesh de la bóveda y exportarlo en formato .obj. Luego, en CloudCompare se cargó la nube de puntos segmentada correspondiente a esa bóveda y también el mesh generado en Dynamo, se alinearon manualmente ambos elementos y se calcularon las distancias entre los mismos. Se observa que existen diferencias de hasta 30 cm, las cuales corresponden a detalles arquitectónicos presentes en la nube de puntos que no se modelaron en el elemento sólido. Se aprecia también que la mayoría de puntos se encuentra contenido en un rango de ± 10 cm por lo que es una estimación aceptable considerando todas las simplificaciones realizadas en el modelado.

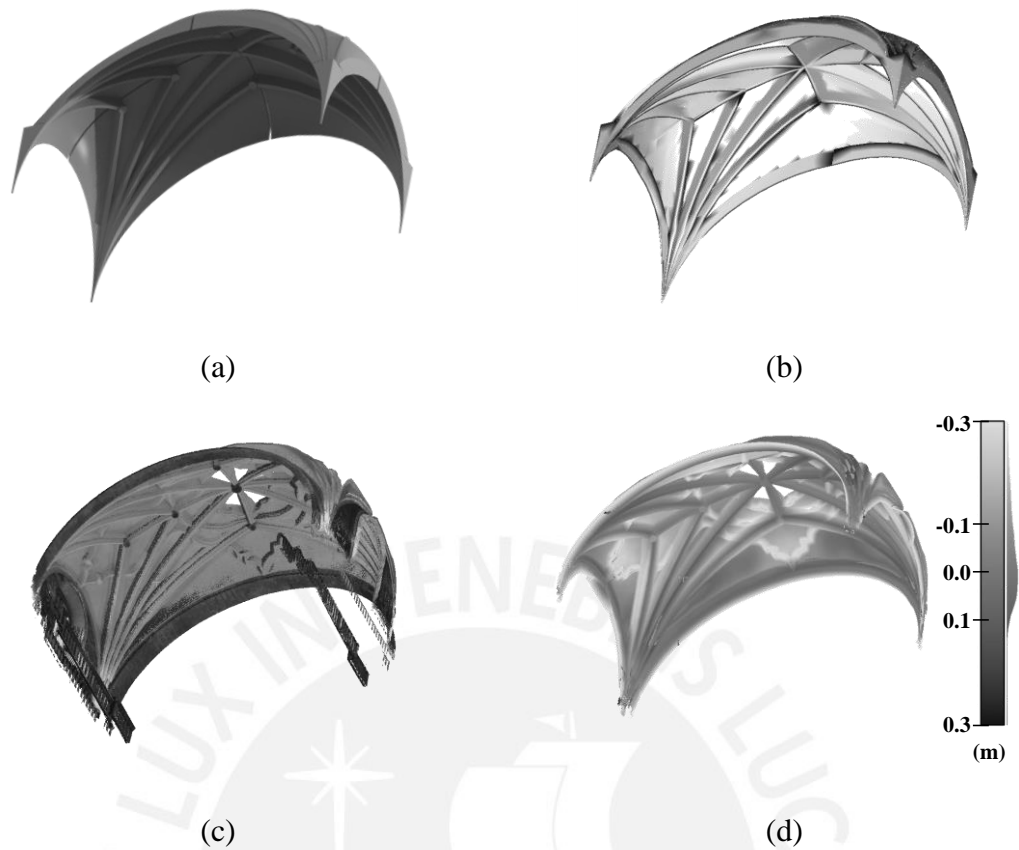


Fig. 4.19 Análisis comparativo entre la nube de puntos y el modelo sólido creado: (a) modelo sólido en Revit, (b) mesh creado en Dynamo, (c) nube de puntos, y (d) cloud-to-mesh analysis

El modelo final de la iglesia se presenta en la Fig. 4.20. Los equipos mobiliarios, puertas y ventanas no se modelaron dado que la intención es utilizar el modelo para fines representativos y para trabajos adicionales como análisis estructurales avanzados. Sin embargo, queda abierta la posibilidad de seguir añadiendo elementos al modelo 3D.





Fig. 4.20 Vistas del modelo geométrico 3D de la iglesia de la Compañía de Jesús en Cusco, Perú

4.3 MODELO BIM CON INFORMACIÓN SEMÁNTICA

Una vez generado el modelo geométrico 3D, se debe ingresar toda la información semántica dentro del modelo. Esta información se presenta de manera gráfica como textual. La información gráfica, en este caso, patologías estructurales identificadas, se ingresaron al modelo como elementos genéricos de espesor muy delgado utilizando el script desarrollado en Dynamo. Primero se definieron las zonas en las cuales se desea insertar las patologías estructurales, y luego se crearon planos de referencia paralelos a la superficie donde se proyectan las patologías. En el caso de bóvedas, el plano de referencia

tuvo que ser un plano horizontal. Luego, en el plano de trabajo se dibujó la forma de la patología como una curva cerrada, y se ejecutó el código de Dynamo. El resultado se presenta en la Fig. 4.21, donde se aprecia que se proyectaron bóveda manchas de humedad sobre un muro con cornisa y en la cúpula de la capilla de la Virgen de Loreto.

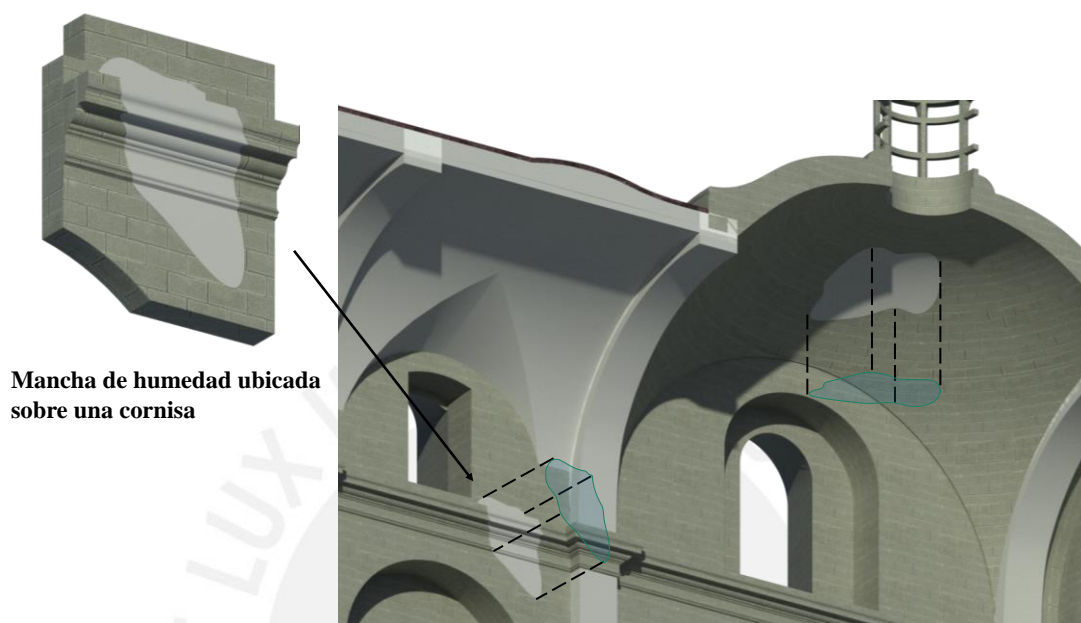


Fig. 4.21 Proyección de mancha de humedad en la capilla de la Virgen de Loreto

Asimismo, en algunas zonas donde existe abultamiento del recubrimiento de yeso se representó dicho fenómeno mediante la misma técnica (ver Fig. 4.22). Tal es el caso del muro de la cripta ubicada debajo del altar, una zona con alto contenido de humedad dado que se encuentra bajo el nivel del suelo. Se observa la fotografía original y su representación dentro del modelo HBIM. En el caso de grietas, desprendimientos y otras patologías se realizó el mismo procedimiento, adoptando la forma geométrica específica de la patología y no solo una representación aproximada del fenómeno. El procedimiento siguiente consiste en asignar a cada tipo de patología un color diferente de modo que puedan generarse mapas de patología de manera automática. Para ello se empleó el script de Dynamo que utiliza los parámetros asignados en cada patología para resaltarlas de diferente color acorde a su naturaleza. Mediante ello se generaron mapas de daño como el mostrado en la Fig. 4.23.



Fig. 4.22 Representación del abultamiento del recubrimiento en muro de la cripta

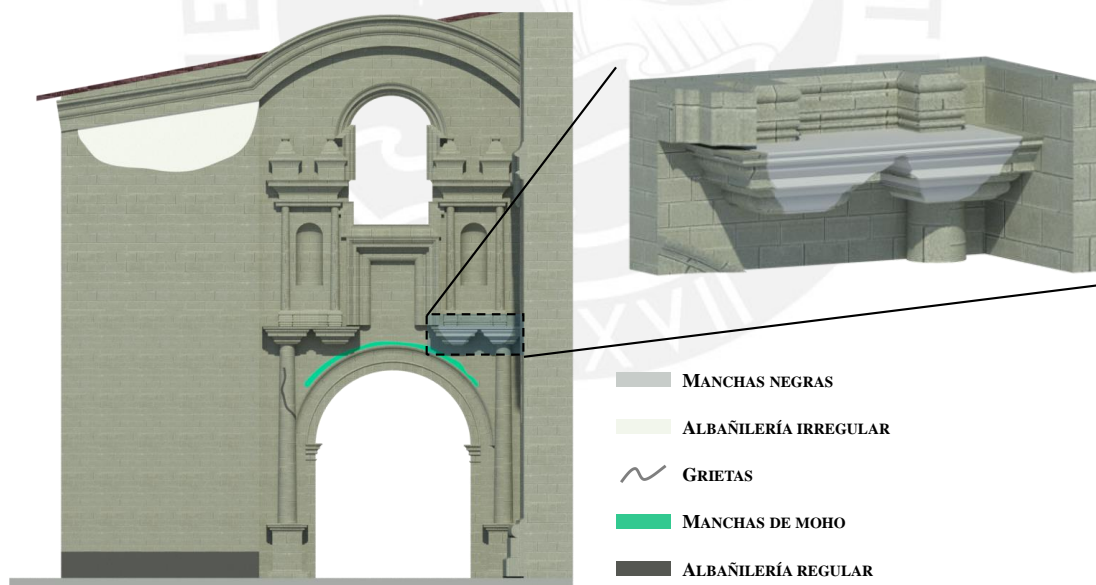


Fig. 4.23 Mapa de daños en la fachada de la capilla de la Virgen de Loreto

Las fotografías tomadas en ciertas zonas de la iglesia se insertaron usando la función *Decal*, la cual permite colocar una fotografía a manera de textura sobre algún elemento de Revit. Un caso se presenta en la Fig. 4.24a, en donde se insertó la fotografía como referencia en procesos de restauración, dado que permite observar una imagen real de lo

que se está colocando en el modelo 3D. De la misma manera, se insertaron termogramas en las zonas en donde se realizaron dichos ensayos, evidenciando así la patología estructural presente en la zona (ver Fig. 4.24b).

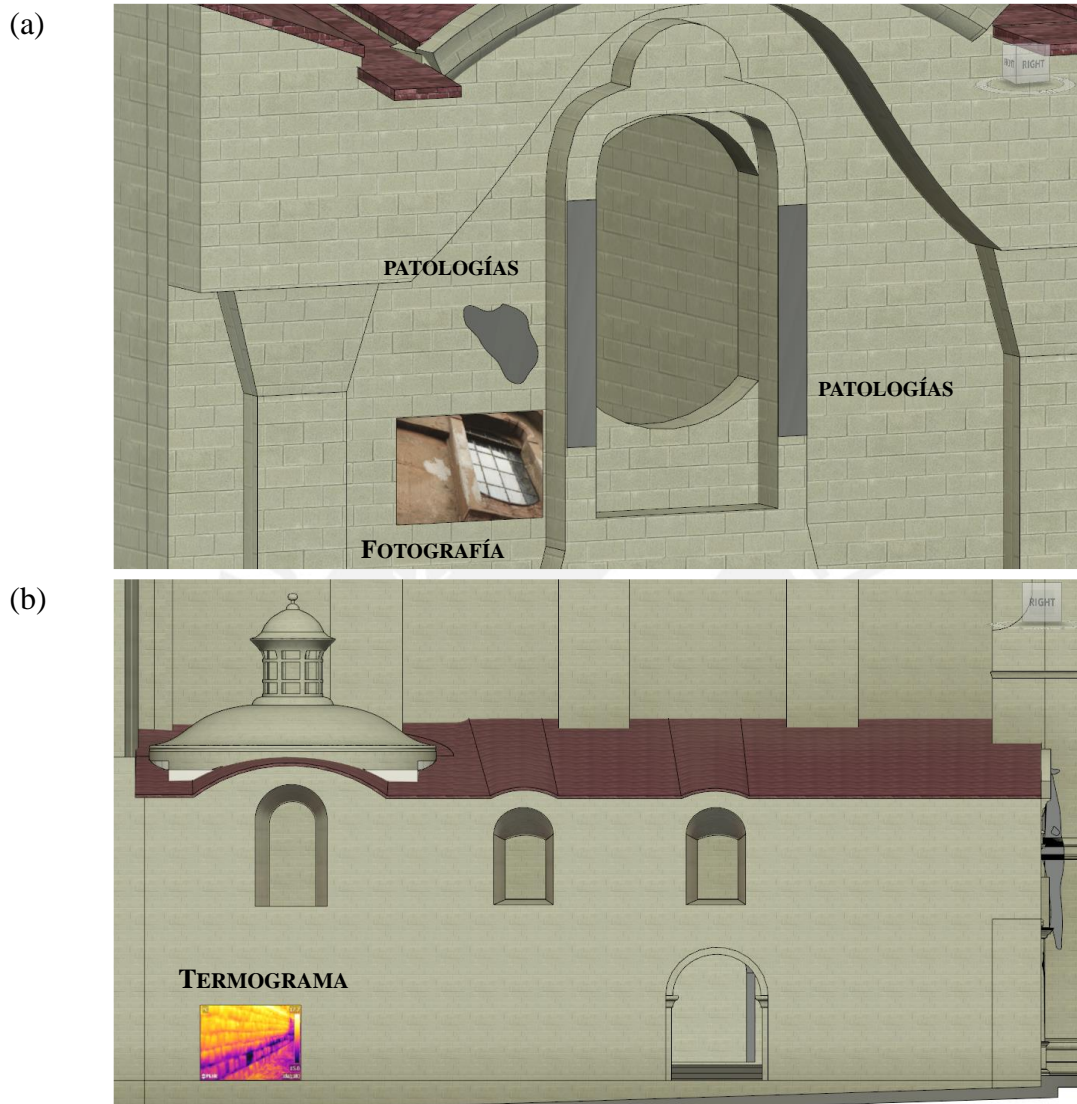


Fig. 4.24 Inserción de fotografías en el modelo 3D: (a) fotografía de patologías superficiales, y (b) termograma evidenciando la presencia de humedad en el muro exterior

Los parámetros textuales ingresados sirven para generar vistas automáticas sobre ensayos realizados o el estado de conservación de los elementos. Esto se aprecia en la Fig. 4.25, en donde se creó un filtro de visualización que resalta los elementos que tienen el parámetro *Eco-impact Tests* activado. De esta manera, se crean vistas predeterminadas según el tipo de visualización que se quiera mostrar. Asimismo, se añadieron los valores de módulo de elasticidad (E_d) obtenidos al procesar los datos como parámetros textuales. El mismo procedimiento se realiza para el parámetro *State of conservation*, el cual

representa el estado de conservación del elemento, pudiendo clasificarse en Bueno, Regular o Malo (ver Fig. 4.26). Cada uno de los filtros puede prenderse o apagarse en la vista correspondiente, por lo que puede realizarse una clasificación selectiva en base a algún parámetro en específico. También se aplica el mismo procedimiento para los ensayos OMA y las zonas donde se realizaron pruebas de termografía infrarroja.

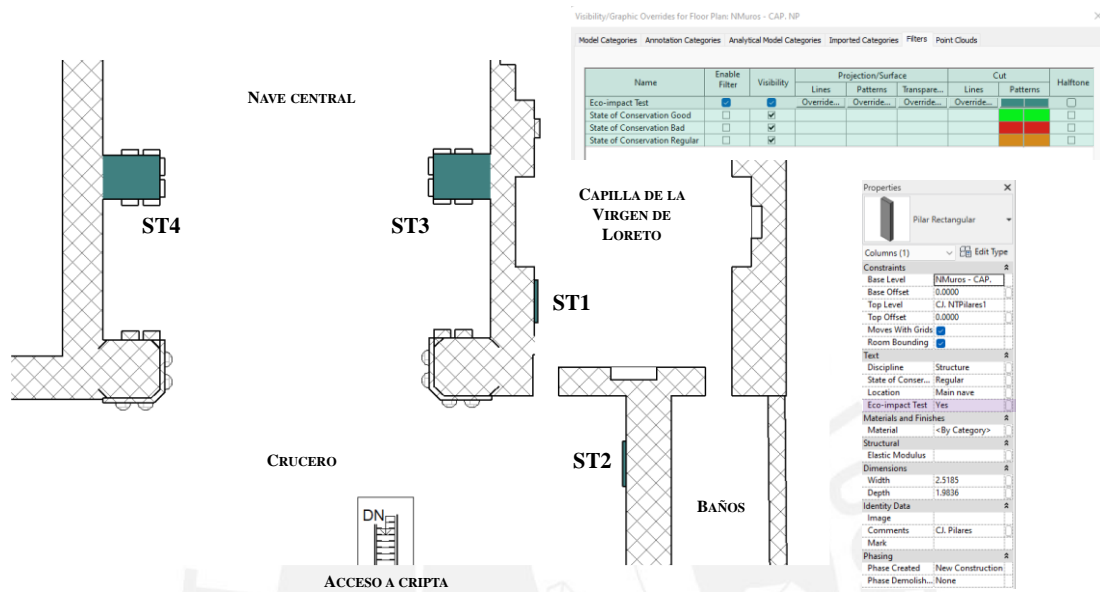


Fig. 4.25 Vistas automáticas usando filtros de visualización en base a parámetros

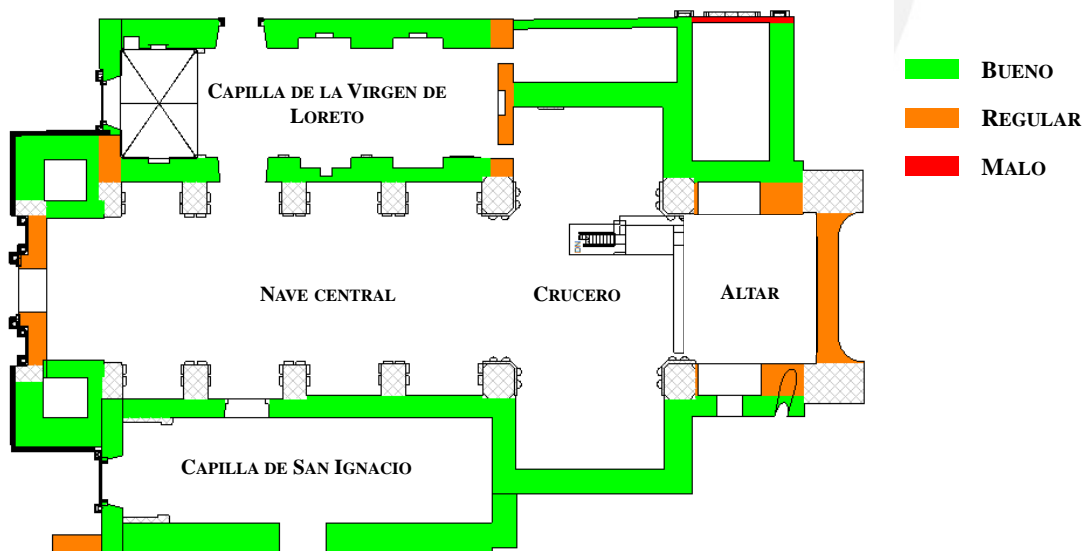


Fig. 4.26 Mapa del estado de conservación de los muros de la iglesia

CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES

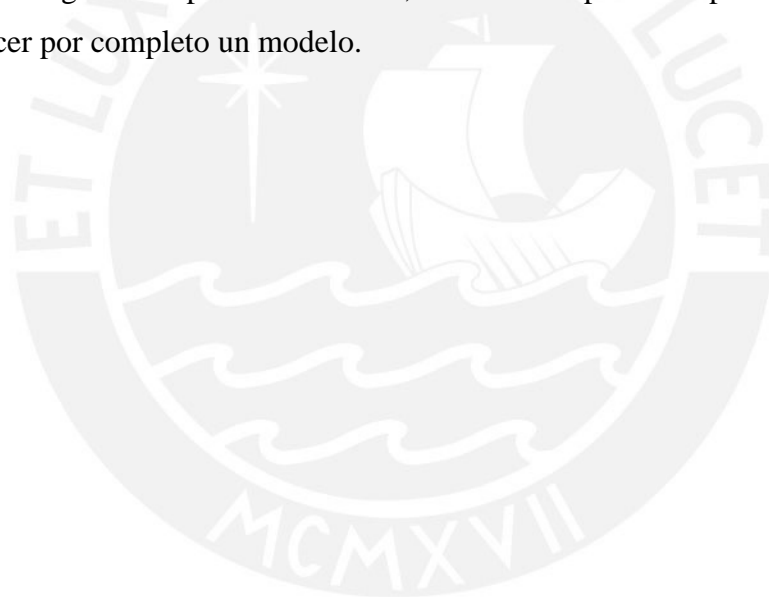


En la presente investigación se ha propuesto la metodología S-HBIM como herramienta para documentar los procesos de diagnóstico estructural de construcciones patrimoniales en un entorno virtual 3D a partir de información recolectada en campo mediante diversas técnicas no destructivas. Se propuso un procedimiento para generar modelos geométricos a partir de información de nube de puntos mediante modelado paramétrico y semi-automático utilizando únicamente el software BIM Autodesk Revit. Además, se propuso un procedimiento para representar información de diagnóstico de manera gráfica y textual dentro del modelo 3D generado. La metodología S-HBIM se validó en la iglesia de la Compañía de Jesús en Cusco, Perú. Esta iglesia es representativa de la arquitectura barroca local, siendo una de las iglesias más bellas y complejas de la ciudad de Cusco. A partir de la aplicación en el caso de estudio, se han obtenido las siguientes conclusiones:

- Las técnicas de escaneo láser terrestre y fotogrametría aérea, en conjunto, permiten una reconstrucción 3D precisa y completa de estructuras ostentosas como lo es el patrimonio arquitectónico. El escáner láser permite capturar información de los interiores de la estructura de manera rápida y precisa, mientras que la fotogrametría aérea complementa dicha información con datos del exterior de la estructura, sobre todo en la zona de los techos en donde el TLS es difícil de aplicar por las restricciones de acceso.
- Los ensayos no destructivos para la caracterización mecánica de materiales, así como la caracterización dinámica mediante ensayos AVT se presentan como alternativas óptimas para la evaluación y diagnóstico de estructuras patrimoniales. Los medios no intrusivos que emplean garantizan que la estructura se mantenga en estado operativo y no sufra daños, y los resultados otorgan información que sirve de base en la toma de decisiones para estudios más avanzados respecto al diagnóstico de la estructura.
- Los ensayos de termografía infrarroja complementan la información obtenida mediante la inspección visual de la estructura. Estos ensayos permiten observar patologías estructurales ocultas, así como diferencias materiales de acuerdo a su temperatura superficial. Sin embargo, se recomienda que la interpretación de imágenes sea realizada por un profesional con experiencia dado que es posible malinterpretar la información y llegar a conclusiones erradas.

- El software BIM Autodesk Revit, en conjunto con el plugin Dynamo, han demostrado ser plataformas fiables para la representación de geometrías complejas como bóvedas. Si bien este software no ha sido diseñado inicialmente para dar soporte al modelado de este tipo de estructuras, su trabajo en conjunto con Dynamo ha demostrado que es posible implementar modelos 3D en base a nubes de puntos usando únicamente el software BIM.
- El modelado paramétrico ha demostrado tener mucho potencial en la representación de estructuras patrimoniales. La creación de familias que pueden reusarse en diferentes proyectos, así como adaptarse a nuevas dimensiones, facilita la interoperabilidad y el uso compartido de información entre diferentes proyectos. Por su parte, el modelado semi-automático empleando Dynamo facilitó la creación de varios ejemplares de bóvedas dentro de la estructura. Esto reduce considerablemente el tiempo de modelado una vez que el código ya esté desarrollado. Si bien en la presente investigación se desarrollaron códigos diferentes para cada tipo de bóveda, queda abierta la posibilidad de desarrollar un código genérico que pueda adaptarse a diferentes tipos de bóvedas de acuerdo a la información que se brinde.
- Se ha demostrado que es posible integrar información de diagnóstico gráfica dentro de un modelo virtual 3D. El uso de programación facilitó la proyección de patologías estructurales en superficies curvas como bóvedas y cornisas. Además, su integración con parámetros textuales dentro del entorno BIM permite generar mapas de daño automáticos en base a filtros de visualización. Una vez que las patologías se encuentran del modelo 3D, la gestión y actualización de esta información se realiza de manera más dinámica y se evitan posibles errores que se presentan al representar esta información en mapas 2D.
- La metodología S-HBIM propuesta permite sentar las bases de un modelo HBIM que integra la mayor cantidad de información tanto geométrica como semántica. La gestión de la misma se puede realizar usando software BIM colaborativo, crear bases de datos a partir de los parámetros del modelo o generar esquemas dinámicos que se actualizan con cada cambio realizado en el modelo. Una vez que se tiene un modelo bien desarrollado, se puede pensar en el uso de *plugins* para la gestión de esta información, así como para la actualización de la misma, como ya lo han demostrado algunas investigaciones.

- El modelo sólido creado tiene la opción de ser empleado para otras finalidades, tales como análisis estructurales en elementos finitos o paseos de realidad virtual. La interoperabilidad y el uso que pueda tener el modelo desarrollado en el software BIM queda como tema de investigación, dado que existen formatos como el *Industry Foundation Classes* (IFC) que permiten interoperabilidad entre diverso software. Por ello, fue necesario modelar los elementos como entidades independientes, teniendo un balance entre grado de discretización y tiempo empleado, de acuerdo a las finalidades que se requieran.
- Se recomienda que el usuario que quiera replicar la metodología S-HBIM tenga sólidos conocimientos de modelado BIM y programación, dado que pueden adoptarse muchas aproximaciones de modelado y llegar a un mismo resultado. Sin embargo, la interacción que tienen los elementos entre sí dentro del software varía según las categorías empleadas. Además, la falta de experiencia puede llevar a tener que rehacer por completo un modelo.



REFERENCIAS

- Agisoft LLC. (2021). *Agisoft Metashape User Manual*.
https://www.agisoft.com/pdf/metashape-pro_1_7_en.pdf
- Angeles Vargas, V. (1983). *Historia del Cusco (Cusco Colonial): Vol. Tomo II*. IndustrialGrafica.
- Angjeliu, G., Cardani, G., & Coronelli, D. (2019). A parametric model for ribbed masonry vaults. *Automation in Construction*, *105*, 102785.
- Angulo-Fornos, R., & Castellano-Román, M. (2020). HBIM as support of preventive conservation actions in heritage architecture. Experience of the renaissance quadrant facade of the cathedral of seville. *Applied Sciences*, *10*(7), 2428.
- Antón, D., Medjdoub, B., Shrahily, R., & Moyano, J. (2018). Accuracy evaluation of the semi-automatic 3D modeling for historical building information models. *International Journal of Architectural Heritage*, *12*(5), 790–805.
- Artec 3D. (2013). *Geomagic Design X User Guide*.
https://www.engineeringx.pitt.edu/uploadedFiles/_Content/Sub_Sites/Business/MRW/SCPI/_Library/specs/geomagicdesignx2014userguide.pdf
- Autodesk INC. (2014). *Dynamo Language Guide*. Dynamo Language Guide.
<https://dynamobim.org/learn/documentation/>
- Azhar, S. (2011). Building information modeling (BIM): Trends, benefits, risks, and challenges for the AEC industry. *Leadership and management in engineering*, *11*(3), 241–252.
- B/555 Roadmap. (2013). *Design, Construction & Operational Data & Process Management for the Built Environment*. BSI. <http://docplayer.net/186518353->

Design-construction-operational-data-process-management-for-the-built-environment.html

- Badenko, V., Bolshakov, N., Tishchenko, E., Fedotov, A., Celani, A., & Yadykin, V. (2021). Integration of digital twin and BIM technologies within factories of the future. *Magazine of Civil Engineering, 1*, 10114–10114.
- Baik, A., Alitany, A., Boehm, J., & Robson, S. (2014). *Jeddah Historical Building Information Modelling" JHBIM"-Object Library*. International Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ISPRS).
- Banfi, F. (2017). BIM Orientation: Grades of Generation and Information for Different Type of Analysis and Management Process. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 42(2/W5)*.
- Banfi, F. (2020). HBIM, 3D drawing and virtual reality for archaeological sites and ancient ruins. *Virtual Archaeology Review, 11(23)*, 16–33.
- Banfi, F. (2019a). *HBIM generation: Extending geometric primitives and bim modelling tools for heritage structures and complex vaulted systems. 42(2)*, 139–148.
- Banfi, F. (2019b). *The integration of a scan-To-hbim process in bim application: The development of an add-in to guide users in autodesk revit. 42(2)*, 141–148.
- Banfi, F., Brumana, R., Aljishi, A., Al Sayeh, N., Santana Quintero, M. E., Cuca, B., Oreni, D., & Midali, C. (2019). *Generative modeling, virtual reality and hbim interaction: Immersive environment for built heritage: Case study of shaikh isa bin ali house, Bahrain. 42(2)*, 149–157.
- Barontini, A., Alarcon, C., Sousa, H. S., Oliveira, D. V., Masciotta, M. G., & Azenha, M. (2021). Development and Demonstration of an HBIM Framework for the Preventive Conservation of Cultural Heritage. *International Journal of Architectural Heritage, 1–23*.

- Bitelli, G., Dellapasqua, M., Girelli, V., Sbaraglia, S., & Tinia, M. (2017). Historical Photogrammetry And Terrestrial Laser Scanning For The 3d Virtual Reconstruction Of Destroyed Structures: A Case Study In Italy. *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 42, 113.
- Brumana, R., Banfi, F., Cantini, L., Previtali, M., & Della Torre, S. (2019). HBIM level of detail-geometry-Accuracy and survey analysis for architectural preservation. *2nd International Conference of Geomatics and Restoration, GEORES 2019*, 42(2), 293–299.
- Bruno, N. (2018). *From survey to analysis for Cultural Heritage management: A new proposal for database design in BIM* [Ph. D. Thesis]. University of Parma.
- Bruno, N., & Roncella, R. (2019). HBIM for conservation: A new proposal for information modeling. *Remote Sensing*, 11(15), 1751.
- BSI. (2021). *The British Standards Institution*. <https://www.bsigroup.com/es-PE/>
- Capone, M., & Lanzara, E. (2019). Scan-to-BIM vs 3D Ideal Model HBIM: Parametric Tools to Study Domes Geometry. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*, 42(2), 219-226.
- Castellano-Román, M., & Pinto-Puerto, F. (2019). Dimensions and levels of knowledge in heritage building information modelling, HBIM: The model of the Charterhouse of Jerez (Cádiz, Spain). *Digital applications in archaeology and cultural heritage*, 14.
- Chara Zereceda, O. (1998). *Iglesias del Cusco: Historia y arquitectura*. Editorial universitaria UNSAAC.

- Cheng, H., Yang, W., & Yen, Y. (2015). BIM applied in historical building documentation and refurbishing. *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 40(5), 85.
- Chevrier, C., Charbonneau, N., Grussenmeyer, P., & Perrin, J.-P. (2010). Parametric documenting of built heritage: 3D virtual reconstruction of architectural details. *International Journal of Architectural Computing*, 8(2), 135–150.
- Chiabrando, F., Lo Turco, M., & Rinaudo, F. (2017). Modeling the decay in an HBIM starting from 3D point clouds. A followed approach for cultural heritage knowledge. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*, 42.
- Chiabrando, F., Sammartano, G., & Spanò, A. (2016). Historical buildings models and their handling via 3D survey: From points clouds to user-oriented HBIM. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*, 41.
- Colucci, E., De Ruvo, V., Lingua, A., Matrone, F., & Rizzo, G. (2020). HBIM-GIS integration: From IFC to cityGML standard for damaged cultural heritage in a multiscale 3D GIS. *Applied Sciences*, 10(4), 1356.
- Conti, F. (1980). *Cómo reconocer el arte barroco*. Médica y Técnica S.A.
- Costantino, D., Pepe, M., & Restuccia, A. (2021). Scan-to-HBIM for conservation and preservation of Cultural Heritage building: The case study of San Nicola in Montedoro church (Italy). *Applied Geomatics*, 1–15.
- C.R.Kennedy & Company. (2017). *Leica Cyclone Basic User Manual*.
<https://www.sdm.co.th/pdf/Cyclone%20Basic%20Tutorial.pdf>
- Croce, V., Caroti, G., Piemonte, A., & Bevilacqua, M. G. (2019). *Geomatics for Cultural Heritage conservation: Integrated survey and 3D modeling*. 4–6.

- Cuenca, J. H. (1991). Investigación de la actividad sísmica en la Región Inka: Rol de la Universidad en la mitigación de desastres. *Tricentenario: n° 2*.
- Dassault Systèmes. (2015). *Introducing Solidworks*.
<https://files.solidworks.com/pdf/introsolidworks.pdf>
- De Fino, M., Sciotti, A., Rubino, R., Pierucci, A., & Fatiguso, F. (2018). Augmented Diagnostics for the Architectural Heritage. *Heritage Architecture Studies*, 245.
- DJI. (2021). *Phantom 4 Pro*. <https://www.dji.com/phantom-4-pro>
- Dore, C., Murphy, M., McCarthy, S., Brechin, F., Casidy, C., & Dirix, E. (2015). Structural simulations and conservation analysis-historic building information model (HBIM). *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 40(5), 351.
- Fai, S., Graham, K., Duckworth, T., Wood, N., & Attar, R. (2011). *Building information modelling and heritage documentation*. 12–16.
- Fai, S., & Rafeiro, J. (2014). Establishing an appropriate level of detail (LoD) for a building information model (BIM)-West Block, Parliament Hill, Ottawa, Canada. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2(5), 123.
- Funari, M. F., Hajjat, A. E., Masciotta, M. G., Oliveira, D. V., & Lourenço, P. B. (2021). A Parametric Scan-to-FEM Framework for the Digital Twin Generation of Historic Masonry Structures. *Sustainability*, 13(19), 11088.
- Garagnani, S., & Manferdini, A. M. (2013). Parametric accuracy: Building information modeling process applied to the cultural heritage preservation. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 5(1), 87–92.

- González Fernández, D. A. (2007). *Contribuciones a las técnicas no destructivas para evaluación y prueba de procesos y materiales basadas en radiaciones infrarrojas* [Tesis Doctoral]. Universidad de Cantabria.
- Guía de Viaje Machu Picchu. (2015). *Templo de la Compania de Jesus—Cusco*.
<https://www.flickr.com/photos/nsolop/23945255998>
- Infrared Training Center. (2016). *FLIR Tools*.
<http://support.flir.com/answers/A1568/FLIR%20Tools%20User%20Guide%20v2.1.1.pdf>
- Jouan, P., & Hallot, P. (2019). Digital Twin: A HBIM-based methodology to support preventive conservation of historic assets through heritage significance awareness. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 42(2019), 609–615.
- Jouan, P., & Hallot, P. (2020). Digital twin: Research framework to support preventive conservation policies. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 9(4), 228.
- Jung, J., Hong, S., Jeong, S., Kim, S., Cho, H., Hong, S., & Heo, J. (2014). Productive modeling for development of as-built BIM of existing indoor structures. *Automation in Construction*, 42, 68–77.
- Khalil, A., Stravoravdis, S., & Backes, D. (2021). Categorisation of building data in the digital documentation of heritage buildings. *Applied Geomatics*, 13, 29–54.
- Kubiak, E. (2012). La iglesia de los Jesuitas en Cusco como un modelo para la arquitectura de la región. *Sztuka Ameryki Łacińskiej, Arte de la América Latina* 2, 2, 35–66.
- Kubler, G. (1953). *Cuzco: Reconstrucción de la ciudad y restauración de sus monumentos. Informe de la misión enviada por la Unesco en 1951*. UNESCO.

- López, F. J., Lerones, P. M., Llamas, J., Gómez-García-Bermejo, J., & Zalama, E. (2017). A framework for using point cloud data of heritage buildings toward geometry modeling in a BIM context: A case study on Santa Maria La Real De Mave Church. *International Journal of Architectural Heritage*, *11*(7), 965–986.
- 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.
- Luks, I. (1973). Tipología de la escultura decorativa hispanica en la arquitectura andina des siglo 18. *Boletín del Centro de Investigaciones Históricas y Estéticas*, *17*.
- Malinverni, E., Mariano, F., Di Stefano, F., Petetta, L., & Onori, F. (2019). Modelling in HBIM to document materials decay by a thematic mapping to manage the cultural heritage: The case of “Chiesa della Pietà” in Fermo. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*.
- Messaoudi, T., Véron, P., Halin, G., & De Luca, L. (2018). An ontological model for the reality-based 3D annotation of heritage building conservation state. *Journal of Cultural Heritage*, *29*, 100–112.
- Mike Weston Andean Travel. (2011). Cusco: Atractivos turísticos cercanos. *Viajero en Perú*. <https://viajeroenperu.blogspot.com/2011/03/>
- Ministerio de Economía y Finanzas. (2019). *Plan BIM Perú*. <https://www.mef.gob.pe/planbimperu/planbim.html>
- Miranda, L., Cantini, L., Guedes, J., Binda, L., & Costa, A. (2013). Applications of sonic tests to masonry elements: Influence of joints on the propagation velocity of elastic waves. *Journal of materials in civil engineering*, *25*(6), 667–682.
- Miranda, L., Cantini, L., Guedes, J., & Costa, A. (2016). Assessment of mechanical properties of full-scale masonry panels through sonic methods. Comparison with

- mechanical destructive tests. *Structural Control and Health Monitoring*, 23(3), 503–516.
- Miranda, L. F., Rio, J., Guedes, J. M., & Costa, A. (2012). Sonic Impact Method—A new technique for characterization of stone masonry walls. *Construction and Building Materials*, 36, 27–35.
- Mol, A., Cabaleiro, M., Sousa, H. S., & Branco, J. M. (2020). HBIM for storing life-cycle data regarding decay and damage in existing timber structures. *Automation in Construction*, 117, 103262.
- Mora, R., Sánchez-Aparicio, L. J., Maté-González, M. Á., García-Álvarez, J., Sanchez-Aparicio, M., & Gonzalez-Aguilera, D. (2021). An historical building information modelling approach for the preventive conservation of historical constructions: Application to the Historical Library of Salamanca. *Automation in Construction*, 121.
- Moyano, J., Gil-Arizón, I., Nieto-Julián, J. E., & Marín-García, D. (2022). Analysis and management of structural deformations through parametric models and HBIM workflow in architectural heritage. *Journal of Building Engineering*, 45, 103274.
- Murphy, M., McGovern, E., & Pavia, S. (2009). Historic building information modelling (HBIM). *Structural Survey*.
- Murphy, M., McGovern, E., & 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*, 76, 89–102.
- Nieto-Julián, J. E., Antón, D., & Moyano, J. J. (2020). Implementation and management of structural deformations into historic building information models. *International Journal of Architectural Heritage*, 14(9), 1384–1397.

- Oreni, D., Brumana, R., Della Torre, S., Banfi, F., & Previtali, M. (2014). Survey turned into HBIM: the restoration and the work involved concerning the Basilica di Collemaggio after the earthquake (L'Aquila). *ISPRS annals of the photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences*, 2(5), 267.
- Osello, A., Lucibello, G., & Morgagni, F. (2018). HBIM and virtual tools: A new chance to preserve architectural heritage. *Buildings*, 8(1), 12.
- Pauwels, P., Verstraeten, R., De Meyer, R., & Van Campenhout, J. (2008). *Architectural information modelling for virtual heritage application*. 18–23.
- Pepe, M., Costantino, D., & Restuccia Garofalo, A. (2020). An efficient pipeline to obtain 3D model for HBIM and structural analysis purposes from 3D point clouds. *Applied Sciences*, 10(4), 1235.
- Pocobelli, D. P., Boehm, J., Bryan, P., Still, J., & Grau-Bové, J. (2018). *Building information models for monitoring and simulation data in heritage buildings*. 42(2), 909–916.
- Previtali, M., Brumana, R., Stanga, C., & Banfi, F. (2020). An ontology-based representation of vaulted system for HBIM. *Applied Sciences*, 10(4), 1377.
- Quattrini, R., & Baleani, E. (2015). Theoretical background and historical analysis for 3D reconstruction model. Villa Thiene at Cicogna. *Journal of Cultural Heritage*, 16(1), 119–125.
- Rainieri, C., & Fabbrocino, G. (2014). *Operational modal analysis of civil engineering structures* (Vol. 142). Springer.
- Robert McNeel & Associates. (2021). *Rhino 6 User Guide*.
<https://docs.mcneel.com/rhino/6/usersguide/en-us/index.htm>

- Rocha, G., Mateus, L., Fernández, J., & Ferreira, V. (2020). A Scan-to-BIM Methodology Applied to Heritage Buildings. *Heritage*, 3(1).
<https://doi.org/10.3390/heritage3010004>
- Rolin, R., Antaluca, E., Batoz, J.-L., Lamarque, F., & Lejeune, M. (2019). From point cloud data to structural analysis through a geometrical hBIM-oriented model. *Journal on Computing and Cultural Heritage (JOCCH)*, 12(2), 1–26.
- Román, J., Martín, P., Llamas, J. M., Zalama, E., & Gómez, J. (2019). *Towards the automatic 3D parametrization of non-planar surfaces from point clouds in HBIM applications.*
- Sampaio, A. Z., Gomes, A. M., Sánchez-Lite, A., Zulueta, P., & González-Gaya, C. (2021). Analysis of BIM Methodology Applied to Practical Cases in the Preservation of Heritage Buildings. *Sustainability*, 13(6), 3129.
- Sandra Negro. (2019, mayo). *Propuestas para la lista indicativa de bienes culturales, naturales y mixtos del Perú en la Unesco.* Instituto de Investigación del Patrimonio Cultural. <https://patrimonioculturalperu.com/2019/05/01/propuestas-para-la-lista-indicativa-de-bienes-culturales-naturales-y-mixtos-del-peru-en-la-unesco/>
- Santagati, C., Papacharalambous, D., Sanfilippo, G., Bakirtzis, N., Laurini, C., & Hermon, S. (2021). HBIM approach for the knowledge and documentation of the St. John the Theologian cathedral in Nicosia (Cyprus). *Journal of Archaeological Science: Reports*, 36, 102804.
- Santoni, A., Martín-Talaverano, R., Quattrini, R., & Murillo-Fragero, J. I. (2021). HBIM approach to implement the historical and constructive knowledge. The case of the Real Colegiata of San Isidoro (León, Spain). *Virtual Archaeology Review*, 12(24), 49–65.

- Saygi, G., Aguiaro, G., Hamamcıoğlu-Turan, M., & Remondino, F. (2013). Evaluation of GIS and BIM roles for the information management of historical buildings. *ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.*, 2(5/W1), 283–288.
- Suárez, J., Boothby, T. E., & González, J. A. (2020). Constructive and structural analysis of a Baroque dome in Spain. The encamonada dome. *Journal of Cultural Heritage*, 44, 229–238.
- Tang, P., Huber, D., Akinci, B., Lipman, R., & Lytle, A. (2010). Automatic reconstruction of as-built building information models from laser-scanned point clouds: A review of related techniques. *Automation in construction*, 19(7), 829–843.
- Wu, T., Lin, Y., Hsu, M., Zheng, N., & Chen, W. (2013). Improving Traditional Building Repair Construction Quality using Historic Building Information Modeling Concept'. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 5, W2.
- Zhang, R., & Zakhor, A. (2014). Automatic identification of window regions on indoor point clouds using LiDAR and cameras. 107–114.