

FICHA RESUMEN
TRABAJO DE GRADO DE MAESTRÍA

**TITULO: “EVALUACIÓN DE TÉCNICAS DE LEVANTAMIENTO PARA LA
DIGITALIZACIÓN DE EDIFICACIONES, ORIENTADA A LA
DOCUMENTACIÓN DE BIENES DE INTERÉS CULTURAL MEDIANTE HBIM ”**

1. ÉNFASIS: Construcción
2. TIPO DE PROYECTO: Aplicado
3. ÁREA DE TRABAJO: Tecnologías de digitalización aplicadas al patrimonio construido
4. ESTUDIANTE (S): Yulieth Manuela Delgado Zambrano
5. CORREO ELECTRÓNICO: ydelgado@javerianacali.edu.co
6. DIRECCIÓN Y TELÉFONO: calle 58 #98-45 Conjunto Residencial Cian - 3137157873
7. DIRECTOR: Manuel Alejandro Rojas Manzano
8. VINCULACIÓN DEL DIRECTOR (en la universidad): Planta
9. CORREO ELECTRÓNICO DEL DIRECTOR: alejandro.rojas@javerianacali.edu.co
10. CO-DIRECTOR(ES) (Si aplica): Liliana Rocío Patiño León
11. GRUPO O EMPRESA QUE LO AVALA (Si aplica): No Aplica
12. OTROS GRUPOS O EMPRESAS:
13. PALABRAS CLAVE (al menos 5): Heritage Building Information Modelling (HBIM), técnicas de levantamiento, Bienes de Interés Cultural (BIC), patrimonio arquitectónico, SLAM LiDAR, Fotogrametría 360°, iPhone LiDAR, Dron LiDAR UAV
14. ODS QUE APLICA EL PROYECTO (Agenda 2030):
 - a. **ODS 4. Educación de Calidad:** Este proyecto puede servir como una herramienta educativa para profesionales y estudiantes en arquitectura, ingeniería y conservación, promoviendo prácticas sostenibles y avanzadas en la preservación del patrimonio cultural.
 - b. **ODS 8. Trabajo Decente y Crecimiento Económico:** La conservación de bienes culturales en Cali puede atraer turismo cultural y, a su vez, generar empleo y crecimiento económico en la región.
 - c. **ODS 9. Industria, Innovación e Infraestructura:** La aplicación de BIM y HBIM representa una innovación tecnológica en la gestión y conservación de edificios patrimoniales, contribuyendo a la creación de infraestructuras más resistentes y seguras.
 - d. **ODS 11. Ciudades y Comunidades Sostenibles:** Este proyecto contribuye directamente a la preservación y gestión sostenible de los bienes de interés cultural en Cali, asegurando su conservación para futuras generaciones.
 - e. **ODS 13. Acción por el Clima:** Al gestionar de manera integral los bienes de interés cultural utilizando BIM, se pueden diseñar estrategias para reforzar las estructuras frente a eventos climáticos extremos, contribuyendo a la resiliencia del patrimonio cultural frente al cambio climático.

15. FECHA DE INICIO (Desarrollo del proyecto): 4/08/2025
16. RESUMEN (máximo 400 palabras).

La conservación de los Bienes de Interés Cultural (BIC) en ciudades con alto riesgo sísmico como Cali exige documentación técnica precisa y actualizada. Sin embargo, la mayoría de las edificaciones religiosas coloniales de la ciudad carecen de registros sistematizados, lo que compromete su mantenimiento, intervención y posible reconstrucción ante eventos catastróficos. Esta investigación propone un flujo de trabajo para la digitalización de BIC mediante la metodología Heritage Building Information Modeling (HBIM), a partir de la evaluación comparativa de cuatro técnicas de levantamiento modernas.

El estudio se desarrolló en dos dimensiones complementarias. La primera consistió en la documentación histórica de la Iglesia y Convento de La Merced declarada Monumento Nacional mediante el Decreto 285 de 1975, identificando sus particularidades constructivas en tapia pisada y adobe, los vacíos documentales existentes y los criterios técnicos que deben orientar su futura digitalización. La segunda dimensión aplicó experimentalmente las cuatro técnicas SLAM LiDAR, Dron LiDAR UAV (DJI Matrice 350 RTK + Zenmuse L2), Escáner LiDAR integrado en iPhone 16 Pro y Cámara 360° en el Laboratorio de Mezclas de la PUJ Cali como edificación de caso de estudio, evaluando cobertura, precisión geométrica y eficiencia operativa.

Los resultados demostraron que ninguna técnica es suficiente de forma individual. El SLAM LiDAR obtuvo la mayor cobertura (490,81 m²) y la mejor precisión de georreferenciación (RMS = 0,33 m), consolidándose como técnica principal para interiores. El Dron LiDAR UAV fue el complemento óptimo para cubiertas y exteriores, con desviaciones de altura de 0 a 4 cm y el mayor rendimiento global del flujo (84,45–102,93 m²/h). El iPhone LiDAR resultó viable para interiores con presupuestos limitados (RMS = 0,35 m). La Cámara 360° presentó limitaciones geométricas que la descalifican como técnica principal: desviaciones de altura superiores a 90 cm y solo el 38% del área de muro documentada respecto a las técnicas LiDAR.

Con base en estos hallazgos, se propuso un flujo de trabajo Scan-to-HBIM estructurado en siete etapas, desde el diagnóstico documental hasta la validación geométrica del modelo, con estrategia de LOD zonificado y enriquecimiento semántico por elemento. El flujo fue diseñado específicamente



para las restricciones de recursos, acceso y disponibilidad tecnológica propias del contexto latinoamericano, y es directamente transferible a la gestión de otros BIC coloniales en Colombia



Pontificia Universidad
JAVERIANA
Cali

**EVALUACIÓN DE TÉCNICAS DE LEVANTAMIENTO PARA LA
DIGITALIZACIÓN DE EDIFICACIONES, ORIENTADA A LA DOCUMENTACIÓN DE
BIENES DE INTERÉS CULTURAL MEDIANTE HBIM**

Programa de Maestría en Ingeniería Civil

Presentado por:

YULIETH MANUELA DELGADO ZAMBRANO

Dirigido por:

Ph.D. MANUEL ALEJANDRO ROJAS MANZANO

Co Directora:

Mg. LILIANA ROCÍO PATIÑO LEÓN

Aserora:

Mg. LORENA ORTIZ MENDEZ

Pontificia Universidad Javeriana Cali

Facultad de Ingeniería y Ciencias

Junio 2026

Agradecimientos

A mi familia, por ser el soporte constante e incondicional a lo largo de toda mi formación profesional, por su comprensión en los momentos de mayor exigencia y por motivarme siempre a alcanzar mis metas. A mis amigos y a mi pareja, por su paciencia, su compañía y sus palabras de aliento en cada etapa de este proceso. A mis compañeros de trabajo, por su comprensión y flexibilidad, que me permitieron compaginar mis responsabilidades laborales con el desarrollo de este trabajo de grado.

Expreso mi más sincero agradecimiento a mi director, el Ph.D. Manuel Alejandro Rojas Manzano, a mi codirectora, la Mg. Liliana Rocío Patiño León, y a mi asesora, la Mg. Lorena Ortiz Méndez, por su acompañamiento constante, su rigurosidad académica y sus valiosas orientaciones, que fueron fundamentales para la correcta definición, desarrollo y culminación de esta investigación. Su disposición para resolver dudas y su compromiso con la calidad del trabajo enriquecieron significativamente el resultado final de este proyecto.

Un agradecimiento especial a la comunidad religiosa encargada del Convento La Merced, las Hermanas Agustinas Recoletas, por abrirnos las puertas de este importante bien patrimonial y por su generosa disposición para facilitar el desarrollo del trabajo de campo. Asimismo, agradezco de manera particular al bibliotecario Alejandro Archila, por su valiosa colaboración en el acceso a la información documental e histórica de la iglesia, la cual constituyó un insumo fundamental para el desarrollo de esta investigación.

Al Laboratorio de Mezclas y al semillero de investigación MATCON, por su disposición, apoyo logístico y colaboración durante la ejecución del trabajo de campo, aportes que resultaron esenciales para la validación de las técnicas de levantamiento empleadas en este estudio.

Al Ph.D. Jorge Hernán Navarro y a la empresa Geosoluciones DAJ S.A.S., por su valiosa colaboración en la planeación y ejecución del sobrevuelo, así como por el préstamo del dron LiDAR, equipo que resultó determinante para la obtención de los datos necesarios en el desarrollo de este trabajo.

Finalmente, a la Pontificia Universidad Javeriana Cali, por la confianza depositada en este proyecto de investigación y por facilitar los equipos, espacios y recursos institucionales que hicieron posible la culminación satisfactoria de este trabajo de grado.

Resumen

La conservación del patrimonio arquitectónico en ciudades como Cali enfrenta el reto de documentar edificaciones coloniales construidas sin criterios sismorresistentes y que carecen de registros actualizados. Esta investigación desarrolla un flujo de trabajo siguiendo la metodología HBIM para la digitalización de Bienes de Interés Cultural (BIC), a partir de la evaluación comparativa de cuatro técnicas de levantamiento aplicadas en el Laboratorio de Mezclas de la Pontificia Universidad Cali: SLAM LiDAR, Dron LiDAR UAV, iPhone LiDAR y Cámara 360°.

Los resultados demostraron que ninguna técnica individual es suficiente para documentar integralmente una edificación patrimonial compleja. El SLAM LiDAR ofreció la mayor cobertura y mejor precisión de georreferenciación; el Dron LiDAR UAV fue el complemento óptimo para cubiertas y exteriores; el iPhone LiDAR resultó viable para interiores con recursos limitados; y la Cámara 360° presentó limitaciones geométricas que la descalifican como técnica principal de modelado. Con base en estos hallazgos, se propuso un flujo de siete etapas desde el diagnóstico documental hasta la validación del modelo con estrategia de LOD zonificado y enriquecimiento semántico, aplicable a BIC coloniales con recursos institucionales moderados.

Palabras clave: Heritage Building Information Modelling (HBIM), técnicas de levantamiento, Bienes de Interés Cultural (BIC), patrimonio arquitectónico, SLAM LiDAR, Fotogrametría 360°, iPhone LiDAR, Dron LiDAR UAV.

Glosario de Términos Especiales

- **BIC (Bien de Interés Cultural):** categoría jurídica colombiana (Ley 1185 de 2008) que otorga protección especial a bienes inmuebles de valor histórico, artístico o cultural.
- **BIM (Building Information Modeling):** metodología de gestión de información basada en modelos 3D paramétricos, que integran datos geométricos y no geométricos durante toda la vida de una edificación.
- **HBIM (Heritage Building Information Modeling):** adaptación del BIM al patrimonio arquitectónico. Incorpora datos históricos, materiales y técnicas para funcionar como repositorio de conocimiento y gestión patrimonial.
- **SLAM (Simultaneous Localization and Mapping):** tecnología de captura 3D que combina sensores LiDAR con algoritmos de mapeo y localización.
- **Dron LiDAR UAV:** vehículo aéreo no tripulado con sensor LiDAR, usado para documentar cubiertas y fachadas de difícil acceso físico.
- **iPhone LiDAR:** sensor integrado en dispositivos Apple para generar nubes de puntos de interiores a bajo costo, aunque con limitaciones de precisión y rango.
- **Nube de puntos:** Conjunto masivo de coordenadas 3D (X, Y, Z) que representan la geometría de una superficie y pueden incluir atributos como color o intensidad.
- **LOD (Level of Detail):** escala que indica el grado de precisión geométrica y semántica de un elemento modelado.
- **Scan-to-HBIM:** flujo de trabajo que transforma nubes de puntos en modelos HBIM paramétricos mediante procesamiento, modelado y enriquecimiento de datos.
- **RMS (Root Mean Square):** indicador de la desviación o error promedio entre los puntos de control y sus posiciones en la nube georreferenciada.

Tabla de Contenido

1. INTRODUCCIÓN	6
1.1. Definición del problema de investigación	8
1.2. Objetivos del proyecto.....	10
1.3. Justificación del trabajo de grado	12
2. MARCO DE REFERENCIA	13
2.1. El Patrimonio Cultural como Recurso de Identidad y Social.....	14
2.2. Arquitectura religiosa colonial en Cali: tipologías y características	18
2.3. Manejo de Bienes de Interés Cultural Nacional e Internacionalmente	26
2.4. Técnicas de levantamiento para edificaciones patrimoniales.....	31
2.5. Metodología HBIM: fundamentos y tecnologías involucradas	38
2.6. Aplicaciones de HBIM en patrimonio.....	44
3. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	54
3.1. Documentación del Bien de Interés Cultural: Iglesia La Merced	56
3.2. Análisis de técnicas de levantamiento disponibles.....	59
3.3. Aplicación de técnicas de levantamiento en el caso de estudio y procesamiento de datos	61
3.4. Análisis comparativo de técnicas	107
3.5. Flujo de trabajo y protocolos para HBIM en BIC	107

4. DOCUMENTACIÓN DEL BIEN DE INTERÉS CULTURAL: IGLESIA LA MERCED	108
4.1. Introducción al Bien	108
4.2. Cronología histórica del conjunto conventual	109
4.3. Las restauraciones del siglo XX	114
4.4. Caracterización del bien según fuentes institucionales y secundarias.....	126
5. EVALUACIÓN DE TÉCNICAS DE LEVANTAMIENTO	131
5.1. Descripción de la edificación caso de estudio	131
5.2. Resultados del levantamiento con SLAM LiDAR	132
5.3. Resultados del levantamiento con Cámara 360°	134
5.4. Resultados del levantamiento con Escáner LiDAR integrado en iPhone 16 Pro	137
5.5. Resultados del levantamiento con Dron LiDAR UAV	140
5.6. Análisis Comparativo de Técnicas	142
6. FLUJO DE TRABAJO Y PROTOCOLOS PARA HBIM EN BIC	156
6.1. Criterios de selección de técnicas de levantamiento para BIC	157
6.2. Flujo de trabajo recomendado para la digitalización de BIC mediante HBIM	160
6.3. Limitaciones y consideraciones para la implementación en BIC.....	169
7. CONCLUSIONES	173
8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	176

1. INTRODUCCIÓN

La creciente urbanización y el desarrollo acelerado de las ciudades contemporáneas plantean un reto significativo para la preservación del patrimonio cultural. En este contexto, Cali, con su rica historia y arquitectura, demanda soluciones innovadoras para conservar sus Bienes de Interés Cultural (BIC). Los edificios históricos, en particular, enfrentan riesgos de deterioro físico y una alta exposición ante movimientos sísmicos, pues sus métodos constructivos, propios de la época en que se erigieron, no incorporaban criterios sismorresistentes, lo que exige intervenciones más precisas y apoyadas en nuevas tecnologías. Como señala Feilden & Jukka (2003) para preservar adecuadamente el patrimonio arquitectónico, es indispensable contar con un conocimiento exhaustivo de sus antecedentes, sus componentes constructivos y su entorno. Para asegurar la preservación a largo plazo de los BIC es fundamental contar con información actualizada y accesible. Sin embargo, muchas edificaciones patrimoniales religiosas de Cali carecen de documentación adecuada y vigente, lo que dificulta su mantenimiento o una eventual reconstrucción. Esto resalta la necesidad urgente de documentar estos bienes para protegerlos frente a posibles daños, sea por falta de mantenimiento o por la ausencia de refuerzos estructurales que les permitan resistir eventos sísmicos.

Históricamente, el estudio del patrimonio arquitectónico se ha basado en el análisis de fuentes, la observación directa, las descripciones textuales y la medición manual. Este enfoque ha permitido documentar y preservar edificaciones históricas, pero presenta limitaciones de precisión, tiempo y actualización de los datos. La modelización manual es una tarea compleja y tediosa que requiere mucho tiempo y experiencia, pues implica recopilar datos minuciosamente mediante mediciones y observaciones físicas (Zhang & Zou, 2022). Las técnicas convencionales pueden resultar insuficientes frente a los desafíos actuales, que exigen una gestión más detallada y dinámica del

patrimonio. Además, la falta de integración digital dificulta el acceso y la manipulación de la información, afectando la toma de decisiones para su conservación y restauración.

En la actualidad, esta recopilación puede realizarse de forma más efectiva mediante tecnologías emergentes, que ofrecen herramientas precisas y detalladas para garantizar una conservación adecuada del patrimonio. Superar las limitaciones en la recopilación de datos históricos exige soluciones innovadoras para la visualización del patrimonio arquitectónico (Günay, 2022). Las tecnologías digitales como el escaneo láser 3D, la fotogrametría y el levantamiento con drones capturan datos con exactitud y rapidez, y permiten obtener modelos tridimensionales detallados de las edificaciones patrimoniales. Así no solo documentan su estado actual, sino que facilitan análisis de conservación a largo plazo y orientan posibles intervenciones.

Este proyecto propone desarrollar un flujo de trabajo para la digitalización de edificaciones mediante la integración de técnicas de levantamiento, orientado a la documentación de Bienes de Interés Cultural con la metodología Heritage Building Information Modelling (HBIM). Mediante un análisis comparativo de tecnologías y su aplicación en un caso de estudio concreto el Laboratorio de Mezclas de la Pontificia Universidad Javeriana Cali se busca evaluar su desempeño en precisión, usabilidad y eficiencia, y establecer protocolos para la captura, procesamiento e integración de la información en modelos HBIM. El objetivo es que esta metodología sirva de referencia para la gestión de los BIC en Cali y en otras ciudades con patrimonio arquitectónico similar, asegurando así su sostenibilidad para las futuras generaciones.

1. 1. Definición del problema de investigación

A continuación, se presenta la definición del problema de investigación, seguido por la pregunta y finalmente el alcance.

1. 1. 1. Planteamiento del problema

Los Bienes de Interés Cultural (BIC) se definen como una representación común del pasado compartido por la comunidad, que influyen en la forma en que perciben la historia. Las iglesias sirven como símbolos comunales y representan una historia e identidad compartidas, lo cual es vital para la cohesión comunitaria (Smith, 2006). Las iglesias, dentro del patrimonio religioso, no son solo símbolos de la fe, sino también hitos arquitectónicos determinantes para el desarrollo urbano que hoy enriquecen el patrimonio cultural de Santiago de Cali. Por la época en que se construyeron, poseen valor estilístico, por su forma simple, y constructivo, por las técnicas y materiales de cada sistema que las conforma. Como respondían a los conocimientos de una época que no contemplaba el factor sísmico en el diseño, son construcciones vulnerables que, como ya ha ocurrido, pueden colapsar o verse gravemente afectadas. Varios ejemplos históricos lo confirman: la icónica Iglesia La Ermita colapsó por completo en 1925 y en su reconstrucción solo se conservó la imagen del Señor de la Caña; en Popayán, en 1983, el colapso de la iglesia de San Francisco causó la muerte de más de 90 feligreses; y en Cúcuta, en 1875, la iglesia principal se derrumbó completamente. Estos hechos evidencian la necesidad de documentar los BIC, algunos catalogados como bienes de excepcional valor y reconocidos como BIC de ámbito nacional, que por ello requieren un plan de conservación especial para garantizar su existencia a lo largo del tiempo. El patrimonio tiene, además, un carácter testimonial: transmite significados y valores como la identidad, la pertenencia, el arraigo y la memoria, lo que lo convierte en un recurso escaso, no renovable, único, irrepetible e histórico (Tello, 2013).

Ahora bien, la documentación y captura de la información geométrica mediante técnicas tradicionales presenta varios desafíos: cantidad limitada de datos, altos costos y una mano de obra dispendiosa que ralentiza y complica la recopilación, con riesgo de datos inconsistentes y problemas de coordinación entre los participantes. Además, los elementos ornamentales de las iglesias componentes cruciales del patrimonio exigen un nivel de detalle y precisión difícil de alcanzar con estos métodos. La necesidad de técnicas más eficientes y precisas para documentar y evaluar el patrimonio arquitectónico de Cali es, por tanto, evidente y urgente.

En este contexto, evaluar y comparar diversas técnicas de levantamiento Cámara 360°, SLAM, dron LiDAR e iPhone LiDAR constituye una línea de investigación clave para determinar cuáles ofrecen mejores resultados en precisión, usabilidad y eficiencia para generar modelos HBIM. No obstante, su validación práctica requiere un entorno controlado y accesible. Ante la imposibilidad de levantar una iglesia patrimonial por restricciones de acceso y permisos, la investigación se apoya en el Laboratorio de Mezclas de la Pontificia Universidad Javeriana Cali como caso de estudio, manteniendo como marco de aplicación final la gestión de los BIC de la ciudad.

El problema central de esta investigación es explorar cómo la integración de técnicas de levantamiento modernas en un flujo de trabajo HBIM puede contribuir a la gestión integral y eficaz de un BIC, superando las limitaciones de los enfoques tradicionales y proporcionando herramientas más robustas para la preservación del patrimonio arquitectónico.

1. 1. 2. *Pregunta de investigación*

De acuerdo con lo anterior, en este proyecto se le pretende dar respuesta a la siguiente pregunta de investigación:

¿Cómo puede el desarrollo de un flujo de trabajo que integre diversas técnicas de levantamiento contribuir a la digitalización y documentación de Bienes de Interés Cultural mediante la metodología HBIM, evaluando su precisión, usabilidad y eficiencia?

1. 1. 3. Alcance del trabajo de grado

Se propone un estudio que abarca dos dimensiones complementarias: una revisión documental e histórica de una iglesia colonial BIC de Cali (para comprender las particularidades del patrimonio local), y la aplicación práctica de técnicas de levantamiento en el Laboratorio de Mezclas de la Pontificia Universidad Javeriana Cali como edificación de caso de estudio.

En la dimensión documental, se llevará a cabo una revisión de la información preexistente de la iglesia colonial, incluyendo restauraciones, cambios en su estructura y planos de proyectos presentados. En la dimensión práctica, se aplicarán cuatro técnicas de levantamiento Cámara 360°, SLAM, iPhone LiDAR y Dron LiDAR, en el caso de estudio, para evaluar su desempeño y, a partir de los resultados, establecer protocolos y un flujo de trabajo que oriente la digitalización y documentación de BIC mediante HBIM. El alcance no incluye la ejecución del modelo HBIM completo de una iglesia patrimonial, dado que los levantamientos in situ en dichos inmuebles no fueron posibles por restricciones de acceso.

1. 2. Objetivos del proyecto

A continuación, se describen los objetivos que se pretenden desarrollar con la presente propuesta.

1. 2. 1. Objetivo general

Desarrollar un flujo de trabajo para la digitalización de edificaciones mediante la integración de técnicas de levantamiento, para la documentación de Bienes de Interés Cultural mediante HBIM.

1. 2. 2. Objetivos específicos

- Analizar las particularidades de un Bien de Interés Cultural y las técnicas de levantamiento disponibles, para definir criterios técnicos que orienten su digitalización.
- Aplicar diversas técnicas de levantamiento en una edificación caso de estudio, para evaluar su desempeño en términos de precisión, usabilidad y eficiencia.
- Establecer un flujo de trabajo y protocolos para la captura, procesamiento e integración de información, para la generación de modelos HBIM aplicables a Bienes de Interés Cultural.

1. 3. Justificación del trabajo de grado

Partiendo de la importancia que tienen las edificaciones patrimoniales, es fundamental encontrar alternativas que promuevan su conservación, a partir de procesos de documentación detallada. El patrimonio arquitectónico tiene un valor testimonial, capaz de transmitir significados y valores fundamentales como la identidad, la pertenencia, el arraigo y la memoria. Que lo ponen en condición de recurso escaso, no renovable, en su condición única irrepetible e histórica (Tello, 2013). En el caso de Cali, las iglesias coloniales, entre otras edificaciones patrimoniales, son testigos valiosos de su pasado y contribuyen significativamente a la identidad de la ciudad y sus habitantes.

En este contexto, es necesario adoptar medidas que fortalezcan esa memoria histórica, empezando por el reconocimiento y estudio de las edificaciones patrimoniales según las épocas que han moldeado estas iglesias y su huella en la historia de la ciudad, comenzando por el periodo colonial, que cuenta con edificaciones valiosas, entre ellas las iglesias. Este periodo es relevante no solo por los fenómenos socioculturales de la época, sino por sus aspectos estilísticos y técnicas

constructivas que, aunque surgidas bajo lineamientos de la conquista y tradiciones foráneas, siguiendo un estilo de patrones básico (Arango, 1989) responden a la capacidad de la mano de obra y la tradición indígena, así como a los recursos y materiales disponibles en el lugar. Estas iglesias surgieron en un momento histórico y se consolidaron como hitos de referencia en la ciudad, tanto para el desarrollo urbano como para las vivencias, la identidad y la cultura de sus habitantes.

Como respuesta a la necesidad de consolidar una base de datos con la información relevante para su mantenimiento e intervención, se plantea implementar herramientas tecnológicas que apoyen la documentación de los BIC como estrategia de conservación, permitiendo capturar datos y recopilar información de manera ágil. Así se constituye un posible soporte documental que reúna la información suficiente para su reconstrucción en caso de colapso o de cualquier afectación que lo altere (ICCROM, 2022). Ya sean fenómenos naturales (inundaciones, deslizamientos, sismos) o fenómenos antropogénicos (explosiones, incendios). Considerando, su ubicación en la ciudad de Cali, catalogada como zona de amenaza sísmica alta, dónde un movimiento telúrico de gran magnitud podría afectar las edificaciones.

No obstante, realizar levantamientos directamente en las iglesias patrimoniales implica varios condicionantes; permisos de acceso, restricciones de uso del espacio y disponibilidad de las instituciones administradoras, que pueden dificultar o impedir la toma de datos. Ante ello, validar las técnicas en una edificación accesible como el Laboratorio de Mezclas de la Pontificia Universidad Javeriana Cali permite establecer criterios técnicos sólidos y replicables, transferibles luego a la documentación de los BIC. Este enfoque garantiza la validez científica de los protocolos desarrollados y su aplicabilidad en contextos patrimoniales reales.

2. MARCO DE REFERENCIA

El siguiente marco de referencia proporciona los fundamentos conceptuales, teóricos y metodológicos para sustentar la evaluación de técnicas de levantamiento orientadas a la documentación de bienes patrimoniales mediante HBIM en la ciudad de Cali.

2. 1. El Patrimonio Cultural como Recurso de Identidad y Social

El patrimonio arquitectónico agrupa edificios, monumentos y estructuras urbanas de valor histórico, cultural y social para una comunidad. Su importancia no radica solo en la antigüedad o la estética, sino en que testimonia las distintas etapas del desarrollo de una sociedad y forma parte de la identidad y memoria colectiva, por lo que su conservación es clave para la continuidad de las tradiciones culturales.

El concepto de patrimonio arquitectónico se popularizó en Europa durante el siglo XIX como respuesta a la industrialización, que amenazaba la permanencia de edificaciones históricas. Los Estados empezaron a concebir el patrimonio como un bien colectivo y promovieron leyes para protegerlo; Francia e Italia fueron pioneros en crear instituciones y marcos normativos dedicados a ello (Choay, 2007).

En Colombia, el desarrollo del concepto de patrimonio arquitectónico se consolidó más adelante y estuvo influenciado por procesos urbanísticos asociados al crecimiento de las ciudades: en las décadas de 1970 y 1980 la especulación inmobiliaria priorizó la rentabilidad sobre la memoria histórica y derivó en demoliciones indiscriminadas (Arango, 1989) , lo que puso en riesgo la memoria arquitectónica de las principales ciudades del país. En Cali, la transformación del siglo XX erradicó gran parte del tejido tradicional: numerosas casonas republicanas y coloniales fueron

demolidas y reemplazadas por edificios en altura antes de que se consolidara una conciencia patrimonial (Vásquez Benítez, 2001).

Como respuesta a esta situación, se impulsó una serie de reformas legislativas para proteger los bienes patrimoniales. La Ley General de Cultura 397 de 1997 (Congreso de la República de Colombia, 1997) fue un hito al establecer que el patrimonio cultural de la Nación incluye bienes inmateriales y materiales, reflejo de la identidad nacional, y comprometió al Estado a crear políticas de conservación articuladas entre gobierno y comunidad (Jimenez, 2009).

Hoy el patrimonio arquitectónico se concibe como un recurso frágil y no renovable. Las estrategias de conservación ya no se limitan a la protección física, sino que integran herramientas como la digitalización y la modelación tridimensional para una gestión más eficiente y preventiva, que asegure tanto la preservación material como la transmisión de valores a las futuras generaciones (Smith, 2006; Tello, 2013).

A lo largo de su historia, la arquitectura colombiana ha pasado por varias etapas que reflejan las transformaciones sociales, culturales y tecnológicas del país. Estas corrientes se dividen en tres grandes periodos: la arquitectura colonial, la historicista y la moderna, cada una con características particulares que han dejado un legado significativo en el paisaje urbano y rural.

2. 1. 1. *Arquitectura Colonial (siglo XVI-XVIII)*

La arquitectura colonial en Colombia se desarrolló principalmente bajo la influencia española, con adaptaciones locales y aportes de la mano de obra indígena y afrodescendiente. En el Valle del Cauca, las construcciones religiosas manifiestan una particular hibridación, donde los cánones barrocos se integran con influencias populares, reflejando una síntesis cultural que define la identidad regional (Sebastian, 1965).

Los templos coloniales eran predominantemente de una o tres naves, con estructuras de madera, adobe o ladrillo, muros ortogonales y techos a dos aguas. En casos excepcionales, como la Iglesia de San Francisco de Cali (Figura 1), se empleó ladrillo en la bóveda y el transepto, lo que facilitó las reformas tras los sismos. Las torres campanarias se levantaban como puntos de referencia espiritual y social en el horizonte urbano.

Las fachadas coloniales variaban en complejidad: algunas prolongaban el alero del tejado, mientras que otras presentaban elaboradas portadas con remates en cúpula. Esta arquitectura no solo cumplía funciones religiosas, sino que ayudó a consolidar la identidad urbana. Materiales como el adobe y el ladrillo reflejaban tanto los recursos disponibles como las limitaciones tecnológicas de la época.

a)



b)



Figura 1. Iglesia San Francisco: a) fachada principal (Viajando.x s.f.) y b) Estado actual fachada Iglesia San Francisco (Infobae, 2022).

2. 1. 2. *Arquitectura Historicista (siglo XIX-XX)*

Con la independencia, el siglo XIX trajo un estilo historicista orientado a reinterpretar estilos del pasado, con templos más monumentales y una clara diferenciación entre presbiterios, transeptos y naves laterales. El historicismo recrea estilos del pasado, no solo de la antigüedad clásica sino

también otras épocas y tradiciones históricas; en el contexto colombiano, esta corriente se desagrega en vertientes como la neoclásica, la purista y la ecléctica, las cuales coexistieron con las vanguardias decorativas del período republicano (Francel & Ojeda, 2016).

Los templos historicistas se distinguían por la altura de la nave central, con iluminación directa mediante ventanales y claraboyas, como en la Iglesia La Ermita de Cali (Figura 2). Sus diseños exhibían detalles decorativos en portadas y torres, combinando el neoclásico y el gótico, con bóvedas ojivales y elementos más sofisticados que en la época colonial, consolidando la arquitectura religiosa como símbolo de poder urbano (Bonilla & Hincapié, 1999).

a)



b)



Figura 2. Iglesia La Ermita: a) vista externa (Turismo Colombia, 2019) y b) interior de la iglesia (Hernandez.A, 2010)

2. 1. 3. *Arquitectura Moderna (siglo XX-Actualidad)*

Con el siglo XX, la arquitectura colombiana abandonó los estilos tradicionales para explorar nuevas posibilidades estructurales acordes con los avances tecnológicos. Los templos modernos integran interior y exterior en espacios continuos que favorecen la conexión entre los fieles y su entorno (Saldarriaga Roa, 1988).

Emplea tecnologías como pórticos metálicos y cubiertas planas, que permiten mayores luces y diseños flexibles, respondiendo tanto a la necesidad de innovar como a las limitaciones del contexto colombiano; un ejemplo en Cali es la Iglesia Juan Pablo II (Figura 3) (Jimenez, 2009). Este periodo también estuvo marcado por un cambio en la función simbólica de los templos, que dejaron de ser los principales referentes urbanos para dar paso a una arquitectura más funcional, en la que el diseño interior busca facilitar la participación comunitaria (Arango, 1989).



Figura 3. Planos Iglesia Juan Pablo II (Qhubo Cali, 2023)

2. 2. Arquitectura religiosa colonial en Cali: tipologías y características

2. 2. 1. *El Contexto Constructivo y Tipológico de la Arquitectura Religiosa*

Colonial en la Nueva Granada

La arquitectura religiosa de la Nueva Granada entre los siglos XVI y XVIII resultó de la unión entre las tradiciones constructivas españolas y las condiciones materiales y humanas de América. Las primeras iglesias presentaban cubiertas de madera en estructura triangular de "par y nudillo", con un entramado de cañas y una capa de barro rematada en paja o teja (López & Ruiz, 2010). Esta solución estructural respondía tanto a la disponibilidad de materiales locales como a los saberes técnicos de la mano de obra disponible.

Con el tiempo, las bóvedas aparecieron como sistemas estructurales internos. Las primeras, en piedra o ladrillo, colapsaron durante los terremotos y fueron reemplazadas por bóvedas en madera o bahareque, que por su flexibilidad y bajo peso resistieron mejor los sismos y se popularizaron en Suramérica (López & Ruiz, 2010). Este dato es especialmente relevante para Cali, ciudad catalogada en zona de amenaza sísmica alta, donde los colapsos documentados de iglesias coloniales evidencian con precisión esta fragilidad estructural.

Las iglesias coloniales respondían a un repertorio de formas reconocible: las capillas de menor jerarquía tenían una sola nave rectangular hacia el altar, mientras que las más importantes se organizaban en tres naves paralelas (una central más alta, flanqueada por dos laterales), disposición habitual en las iglesias neogranadinas de la segunda mitad del siglo XVIII (Gamez, 2020).

Cada parte de estas iglesias tenía su propio volumen y altura: el altar solía estar más elevado que la nave, lo que se notaba en la forma escalonada de la cubierta (Barney, 2024). Las sacristías, depósitos y capillas laterales se unían al cuerpo principal como piezas independientes, generando una silueta exterior que reflejaba la organización interior del templo.

2. 2. 2. *Materiales y sistemas constructivos*

Los materiales de los templos coloniales del Valle del Cauca respondían a los recursos del entorno: adobe, tapia pisada y ladrillo cocido para los muros, y madera para las cubiertas. Bonilla e Hincapie (1999) identificaron que esta arquitectura y su relación con el espacio urbano se articuló a través de estas soluciones materiales locales.

El adobe y la tapia pisada fueron las técnicas más accesibles, usadas sobre todo en las capillas de menor jerarquía. El ladrillo cocido, de mayor exigencia técnica, se reservaba para

pilastras, arcos, bóvedas y torres; en la arquitectura mudéjar su manejo confirma al albañil como protagonista de esta tradición (Galindo, 2011).

Esta combinación de materiales condicionó el comportamiento estructural frente a sismos: los muros de tierra cruda y la mampostería sin refuerzo hacen de estas edificaciones estructuras de alta vulnerabilidad sísmica. Investigaciones sobre mampostería no reforzada en zonas sísmicas muestran mecanismos de daño complejos que comprometen su integridad ante cargas laterales (Chieffo et. al, 2019). Esta condición hace aún más urgente su documentación detallada como base para intervenciones de conservación informada.

2. 2. 3. *Las influencias estilísticas: barroco y mudéjar*

Desde el punto de vista estilístico, la arquitectura religiosa colonial del Valle del Cauca bebe de dos grandes tradiciones: el barroco hispanoamericano y el arte mudéjar. El barroco es quizás el más reconocible: se expresa en la decoración de fachadas, los retablos dorados, las curvas de los arcos y la ornamentación de portadas y capiteles (la parte superior de la columna o pilar). En Cali, sin embargo, se manifestó de forma más contenida que en otras ciudades latinoamericanas; mientras las fachadas suelen ser austeras, la riqueza decorativa se concentra en el interior, sobre todo en altares y capillas. (Sebastian, 1965) en su documento estudia profundamente la arquitectura colonial del Valle del Cauca, describe con detalle esta convivencia de corrientes estilísticas en su obra de referencia sobre la región, distinguiendo cómo la arquitectura de los siglos XVI, XVII y XVIII fue definiendo el carácter particular de la región.

El arte mudéjar llegó a América con la conquista. A diferencia del barroco o el gótico, es un fenómeno propiamente español síntesis de las tradiciones arquitectónicas musulmana y cristiana surgida durante la Reconquista que, al trasladarse a América, se combinó con los elementos y la mano de obra del mundo indígena (Galindo, 2011). En el Valle del Cauca, este legado tiene su

expresión más destacada en la Torre Mudéjar del Convento de San Francisco, construida alrededor de 1772, que destaca por el uso del ladrillo visto trabajado con gran precisión geométrica. (Figuerola, 2011) documentó en detalle cómo esta torre y el convento al que pertenece son dos de los ejemplos más importantes de arquitectura mudéjar tardía en todo el continente americano.

La investigación de Bonilla e Hincapie (1999) sobre la arquitectura religiosa en el Valle del Cauca añade una dimensión más allá de lo estilístico: muestra cómo estas iglesias no eran solo edificios de culto, sino puntos de referencia y organizadores del espacio urbano colonial, que estructuraban el desarrollo de barrios y plazas a su alrededor. Esa doble condición patrimonio arquitectónico y ordenador urbano es lo que da a su documentación y conservación implicaciones relevantes para la ciudad.

2. 2. 4. *Iglesias Coloniales en Cali*

En la arquitectura religiosa del período colonial se distinguen tres grandes conjuntos arquitectónicos: las catedrales o iglesias mayores, los complejos conventuales que comprenden un templo o iglesia y el convento y las capillas o templos doctrineros. Cada uno respondía tanto a la jerarquía de la institución religiosa que lo habitaba como a las posibilidades técnicas y económicas de la región donde se construía. A través de sus estructuras, materiales y técnicas constructivas, las iglesias coloniales de Cali narran la confluencia de los estilos barroco y mudéjar con los recursos y la mano de obra local, haciendo de ellas referentes únicos del suroccidente colombiano (Sebastian, 1965; Bonilla & Hincapie, 1999).

Para este estudio se identificaron y analizaron las iglesias coloniales de la ciudad, las cuales están categorizadas como Bienes de Interés Cultural (BIC) del ámbito Nacional, declaradas por el (Ministerio de Cultura) mediante la Ley 1185 de 2008. Así mismo, estas edificaciones están integradas en el Plan de Ordenamiento Territorial de Cali bajo la categoría de Nivel 1 de

Conservación Integral (IDESC, 2014). Este análisis constituyó la base para seleccionar el BIC sobre el cual se realizaría la documentación histórica y la propuesta de aplicación de la metodología HBIM. A continuación, se describe cada una de ellas.

Iglesia La Merced: Considerada el punto fundacional de Cali, es un símbolo de la llegada de la religión católica a la región. Destaca por su austero diseño barroco, con estructura de adobe y tapia pisada (Figura 4), y se levanta en el sitio donde, según la tradición, se celebró la primera misa de la ciudad. La primera capilla se construyó aquí entre 1541 y 1544, como parte del Convento de Las Mercedes y Redención de los Cautivos, fundado por el fraile mercedario Hernando de Granada.

La iglesia y el convento han sido adaptados y restaurados varias veces. Actualmente, parte del antiguo convento ha sido habilitada para albergar el Museo de Arte Religioso y el Museo Arqueológico del Banco Popular. La Iglesia de La Merced, junto con el área circundante, está protegida como Centro Histórico y ha sido declarada Monumento Nacional (Patiño, 2007).



Figura 4. Iglesia La Merced Fachada principal (Alcaldía de Cali, 2020).

Iglesia de San Pedro La Catedral de San Pedro es uno de los templos más importantes de la ciudad y sede de la Arquidiócesis de Cali, con una historia constructiva de más de cuatro siglos. En 1772, el teniente de milicias Antonio García trazó la Iglesia Mayor de Santiago de Cali, proyecto que debía responder al barroco que practicaba su autor (Sebastian, 1965). García nunca vio

terminado su proyecto, pues este solo se pudo concluir en 1841, época para la cual ya había sido modificado según el nuevo gusto de la época. Es un templo de influencias neoclásicas y barrocas, que alberga importantes expresiones artísticas en su interior, como retablos y obras escultóricas de gran valor (Figura 5). Sigue una planta ortogonal de tres naves, sostenidas por robustas columnas que soportan las arcadas. Pese a las actualizaciones, algunos elementos, como la bóveda de cañón, conservan técnicas coloniales tradicionales en madera, caña y barro (Galindo, 2011).

En 1925, los arquitectos Borrero y Ospina realizaron una reforma que consolidó la estética neoclásica del templo. La estructura se adapta al irregular trazado vial del centro de Cali, con una entrada lateral sobre la Calle 11 que facilita su integración con el entorno. Con su fachada blanca, el templo se erige frente a la Plaza de Caycedo y al antiguo Palacio Episcopal, formando un conjunto arquitectónico armónico que destaca como uno de los principales referentes históricos de la ciudad (Sebastian, 1965).



Figura 5. Catedral San Pedro Fachada principal (Arquidiócesis de Cali, 2015)

Iglesia de San Francisco: La Iglesia de San Francisco en Cali es el proyecto más importante del sacerdote-arquitecto payanés Andrés Marcelino Pérez de Arroyo, quien representa en arquitectura el proyecto de "modernización" de las élites culturales criollas de finales del siglo

XVIII y comienzos del XIX. Pérez de Arroyo, influenciado por las teorías de Vignola y el neoclasicismo europeo, diferenciándose de los estilos barrocos y mudéjares previos (Figura 1).

Constructivamente, esta iglesia es la más compleja y refinada de las cinco analizadas. La nave principal está conformada por una bóveda de cañón levantada en ladrillo con arcos de refuerzo del mismo material; el empuje de esta bóveda es contrarrestado por sólidos contrafuertes, entre los cuales se localizan en un nivel inferior las bóvedas vaídas también en ladrillo que conforman las naves menores. Sobresaliente obra de mampostería es la de la sacristía con sus bóvedas y cúpulas, así como la capilla lateral al altar.

A través de los años, la iglesia ha sufrido daños significativos, incluyendo los provocados por un terremoto en 1885 y una posterior restauración en 1925 que reforzó la cúpula con hierro y concreto. La última restauración decoró las bóvedas con pinturas de Mauricio Ramelli (Patiño, 2007). La Iglesia de San Francisco forma parte de un complejo mayor que incluye la Torre Mudéjar y la Capilla de la Inmaculada, considerado en conjunto el núcleo de mayor densidad patrimonial de Cali (Figueroa, 2011).

Capilla de la Inmaculada: Un pequeño templo que resalta por su intimidad y belleza arquitectónica, de influencias barrocas, muestra de la importancia de los espacios de culto menores en la tradición religiosa de la época. Construida hacia 1764, comenzó como una estructura sencilla de una sola nave, con muros de adobe y cubierta de paja (Figura 6). Durante el siglo XIX se le agregó una Torre Mudéjar y se sustituyó la cubierta original por tejas. En 1924, el arquitecto italiano Mauricio Ramelli la renovó, aumentando la altura interior y modificando la fachada. Más tarde, en 1936, durante el cuarto centenario de la ciudad, se intervino la fachada lateral para armonizarla con la Torre Mudéjar, incorporando un arco de herradura apuntado.

La capilla está estrechamente vinculada a la Torre Mudéjar y la Iglesia de San Francisco, formando el complejo religioso estudiado por (Figueroa, 2011) como el conjunto de mayor valor mudéjar del Valle del Cauca. Ambas edificaciones han sido reconocidas como Bienes de Interés Cultural de ámbito nacional por su destacado valor artístico, siendo la Torre Mudéjar considerada por Santiago Sebastián como la obra de este estilo más importante de la Nueva Granada y la más hermosa de América (Sebastian, 1965).



Figura 6. Capilla de la Inmaculada fachada principal I (Flickr, 2008)

Iglesia de San Antonio: Ubicada en una colina del mismo nombre en Cali, esta iglesia es uno de los puntos más icónicos de la ciudad, atrayendo tanto a devotos como a turistas. Su estilo sencillo, con muros de adobe y techos de teja, la convierte en un reflejo auténtico del espíritu colonial (Figura 7). La capilla, que recibió permiso para su edificación en 1786, es un ejemplo notable de arquitectura barroca con influencias locales. La estructura presenta una planta rectangular con un presbiterio y balausta de curvas barrocas (Sebastian, 1965).

La capilla ha sufrido varias intervenciones. En 1941-1947 se retiró el pañete y se modificó la cubierta; entre 1951 y 1964 se realizaron cambios menores y en 1972, una restauración importante dirigida por el arquitecto José Luis Giraldo devolvió la capilla a su estado original y

restauró el retablo para el 250 aniversario de la capilla (Sebastian, 1965). Su carácter icónico, asociado tanto a la devoción religiosa como al paisaje urbano de Cali, la convierte en uno de los BIC más reconocidos por la ciudadanía.



Figura 7. Iglesia San Antonio fachada principal (Fine Art America, 2016)

2. 3. Manejo de Bienes de Interés Cultural Nacional e Internacionalmente

En 1972, la UNESCO estableció la Convención sobre la Protección del Patrimonio Mundial, Cultural y Natural, un tratado que marcó un hito al reconocer que el patrimonio es un bien común de la humanidad que trasciende fronteras (UNESCO, 1972). A partir de esta convención, la UNESCO ha registrado una lista de 1,248 propiedades en la categoría de Patrimonio Mundial, de las cuales gran parte corresponden a bienes de valor cultural, tales como monumentos, sitios arqueológicos y conjuntos arquitectónicos de relevancia histórica y artística como se observa en las Figuras 8 y 9.

En 1975, el Consejo de Europa avanzó con la Declaración de Ámsterdam, que sostuvo que la conservación del patrimonio no es una carga sino un objetivo primordial de las políticas urbanas, subrayando la importancia de salvaguardar no solo edificios individuales sino también entornos urbanos y paisajes históricos (Consejo de Europa, 1975).

Lista del Patrimonio Mundial

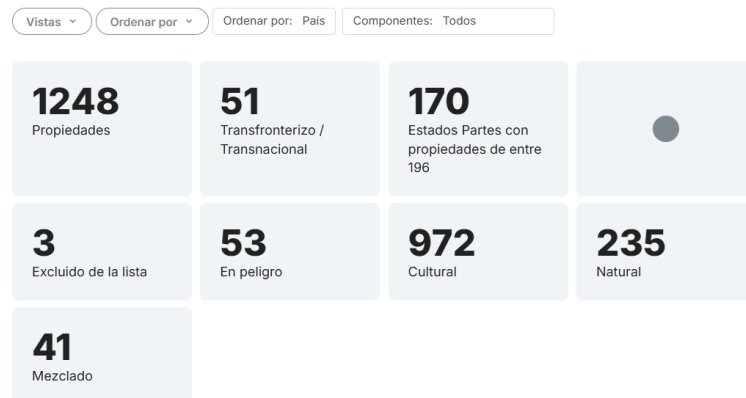


Figura 8. Lista del patrimonio mundial categorización de patrimonio según la UNESCO (UNESCO, 2026).

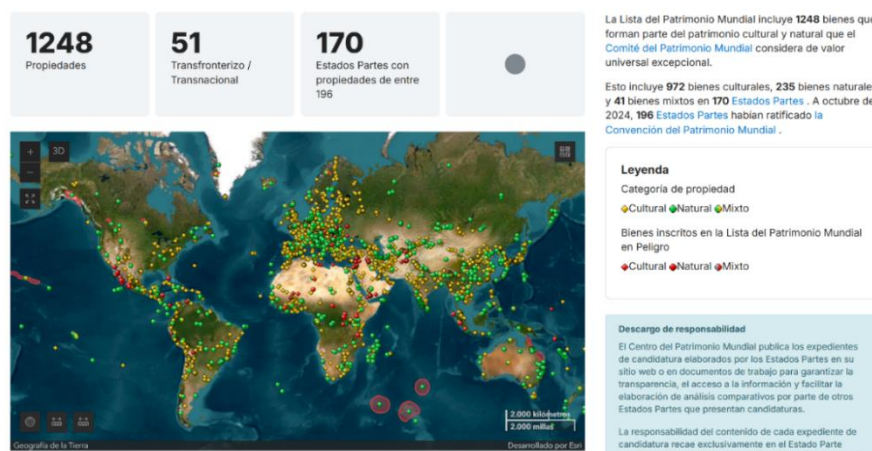


Figura 9. Lista del patrimonio en el mundo mapa en línea del patrimonio mundial (UNESCO, 2026).

En Colombia, el Decreto 264 de 1963, reglamentado por la Ley 163 de 1959 (Congreso de la República de Colombia, 1959), protege el patrimonio histórico, artístico y los monumentos públicos, declarando patrimonio nacional los bienes fundamentales para el estudio de culturas pasadas, la historia del arte y la conservación de la belleza natural (Decreto 264 de 1963). Este marco normativo reconoce elementos arquitectónicos de origen colonial y prehispánico, como inmuebles, planos y diseños, siendo relevante para edificios históricos como las iglesias en estudio para este proyecto.

El Decreto asigna al Departamento Administrativo de Planeación Municipal, en colaboración con la Alcaldía de Cali y conforme al POT (Acuerdo N° 0373 DE 2014), la tarea de clasificar edificaciones de valor histórico. Las iglesias de este estudio; Capilla de la Inmaculada, Catedral de San Pedro, San Antonio, San Francisco y el Convento de la Merced, están registradas en el Nivel 1 de Conservación Integral dentro de los BIC del Grupo Arquitectónico.

Según el (Decreto 763 de 2009), los inmuebles con valor excepcional deben preservarse en su totalidad, aunque se permiten ampliaciones que no comprometan sus valores patrimoniales. Sin embargo, las fichas de registro de estos edificios como las denominadas BIC N-2, BIC N-5, BIC N-20, BIC N-21 y BIC N-23 presentan limitaciones que dificultan ilustrar adecuadamente su valor histórico. En algunos casos la documentación fotográfica está desactualizada o solo incluye vistas parciales, como en la Iglesia de la Inmaculada, cuya ficha contiene únicamente una imagen de la fachada. Además, la planimetría de algunos edificios, como el Convento de la Merced, es incompleta, y los datos estéticos y estructurales son demasiado generales, lo que dificulta comprender su contexto inmediato.

La gestión de los BIC en Cali requiere un enfoque integral que abarca identificación, documentación y control para asegurar su conservación y aprovechamiento. El Departamento Administrativo de Planeación Municipal y la Secretaría de Cultura de Cali, conforme al POT de 2014, definen y protegen los bienes de interés cultural en áreas urbanas y rurales, y establecen zonas especiales de manejo y protección para evitar alteraciones que comprometan su valor histórico y cultural.

Las actividades de preservación se apoyan en los siguientes elementos:

1. **Inventario y Actualización:** El inventario de Bienes de Interés Cultural (BIC) de Cali requiere una actualización constante para reflejar el estado real de preservación y las

necesidades de intervención técnica. Aunque la Alcaldía ha avanzado en procesos de revisión de fichas técnicas para un grupo significativo de bienes, persiste una brecha crítica: gran parte del patrimonio religioso carece de expedientes técnicos actualizados y de documentación gráfica (planos arquitectónicos de detalle) indispensable para el mantenimiento preventivo o la recuperación ante eventos sísmicos. Esta carencia se evidencia en casos como la Iglesia de San Francisco, cuya complejidad estructural tras el colapso parcial de uno de sus muros en 2022 resalta la urgencia de contar con herramientas de gestión técnica de alta precisión, como los modelos digitales (HBIM).

2. **Fichas Técnicas y Documentación:** Cali cuenta con un sistema de fichas técnicas que recoge información detallada de cada bien, incluyendo su estado de conservación, valor histórico y tipos de intervención permitidos. Este inventario se encuentra disponible en plataformas digitales como Datos Abiertos Cali, donde se puede acceder a mapas y datos geográficos, en estos mapas muchas de estas fichas se encuentran, pero otras no, así como algunos BIC no presentan ni fichas ni registro fotográfico, además los mapas gran parte del tiempo presentan muchas inconsistencias como se puede observar en la (Figura 10).

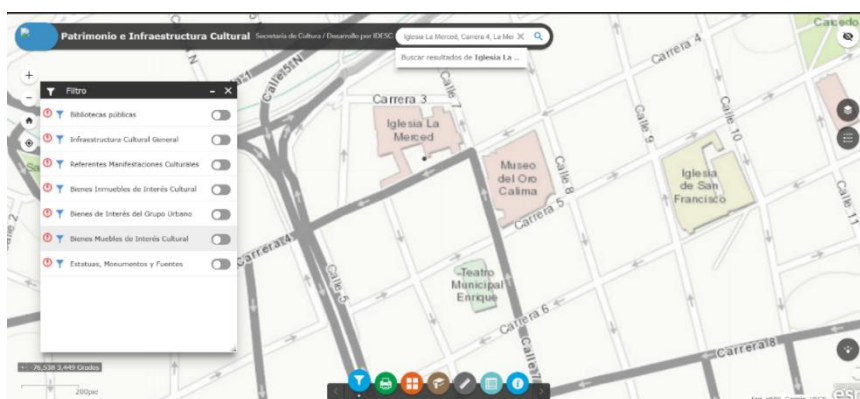


Figura 10. Mapa Interactivo Patrimonio e Infraestructura Cultural (Alcaldía de Santiago de Cali. 2026).

3. **Normativa y Protección:** Bajo el marco del POT, se establecen diferentes niveles de conservación para los bienes culturales en función de su importancia histórica y cultural. La normativa establece usos y restricciones de intervención, y regula las áreas de alto valor cultural para asegurar la preservación tanto de las estructuras arquitectónicas como de su entorno.
4. **Acceso a Información Pública:** La Alcaldía de Cali proporciona acceso a información detallada mediante fichas técnicas y recursos cartográficos en su página oficial y en el portal Datos Abiertos Cali (Figura 11), que incluye herramientas para explorar mapas y realizar consultas geográficas. Esto permite a ciudadanos, académicos y profesionales acceder a información actualizada sobre los bienes patrimoniales y las normativas vigentes para su conservación.

a)



b)



Figura 11. Fichas de bienes inmuebles de interés cultural de Santiago de Cali: a) BIC N-23 con imágenes desactualizadas sin información planimétrica y b) BIC N-2 con única imagen sin más información (Ministerio de Cultura, 2014).

2. 4. Técnicas de levantamiento para edificaciones patrimoniales

La documentación precisa de las edificaciones patrimoniales es la base de cualquier proceso de conservación, restauración o gestión integral. El avance de las tecnologías digitales ha diversificado el repertorio de técnicas para capturar la geometría, los materiales y el estado de las edificaciones históricas, con soluciones que varían en costo, precisión, velocidad y tipo de resultado. A continuación, se describen las principales, con sus características, ventajas, limitaciones y aplicaciones en el patrimonio arquitectónico.

2. 4. 1. *Escaneo Láser Terrestre (TLS - Terrestrial Laser Scanning)*

El escaneo láser terrestre (TLS) (Figura 12) usa dispositivos láser fijos para medir la geometría de una estructura mediante pulsos de luz reflejados en sus superficies, registrando con precisión milimétrica la distancia a cada punto. El resultado es una nube de puntos densa que, en el flujo "Scan-to-BIM", se convierte en modelos tridimensionales paramétricos para documentar y gestionar estructuras históricas a lo largo de su ciclo de vida (Moyano et. al, 2022).

El TLS es útil en edificaciones de geometrías complejas, pues registra detalles finos y detecta deformaciones estructurales. Sus principales ventajas son la alta precisión, la rapidez y la capacidad de capturar gran cantidad de datos en un solo levantamiento, facilitando modelos digitales integrables en HBIM. En conservación de patrimonio, el TLS es idóneo para documentar el estado actual del edificio y planificar restauraciones. Su principal desventaja es el alto costo.

a)



b)



Figura 12. Escáner Láser 3D a) medición con Escáner Láser 3D y b) ejemplo nube de puntos levantada con TLS (Fovea. s.f.).

2. 4. 2. *Fotogrametría UAV (Unmanned Aerial Vehicle)*

La fotogrametría mediante UAV (dron) (Figura 13) captura imágenes desde el aire en distintas alturas y ángulos para generar modelos 3D detallados, incluyendo áreas de difícil acceso como estructuras altas o fachadas ornamentadas. Integrada con HBIM, crea una representación virtual fiel al contexto original de la edificación (Lin, et. al, 2024).

Los UAV capturan abundante información visual que, procesada en software, permite construir modelos tridimensionales precisos. Entre sus ventajas están la accesibilidad, el menor costo frente a otros métodos y la capacidad de cubrir grandes áreas en poco tiempo. En conservación de patrimonio resulta especialmente útil para edificios en riesgo o de difícil acceso, ya que facilita una documentación exhaustiva sin andamiajes ni intervenciones invasivas. Integrada en HBIM, permite visualizar la estructura completa en un entorno digital, base para planificar restauraciones y mantenimiento.

a)



b)



Figura 13. Vehículo aéreo no tripulado o Dron: a) Levantamientos con Drones (Grupo Acre. s.f.) y b) Fotogrametría para levantamientos (UMILES Group. s.f.).

2. 4. 3. *Fotogrametría Terrestre*

La fotogrametría terrestre utiliza fotografías desde el suelo para generar modelos tridimensionales detallados. A diferencia de la aérea, se basa en cámaras de alta resolución, DSLR, sin espejo o incluso smartphones de calidad posicionadas en distintos ángulos alrededor del objeto (Figura 14). Es valiosa para edificios patrimoniales porque registra características estructurales y ornamentales sin equipos invasivos, aplicable en exteriores e interiores de dimensiones moderadas. Las imágenes se procesan en software especializado que las alinea y fusiona mediante puntos de referencia comunes, generando un modelo 3D preciso, idóneo para construcciones históricas que exigen una conservación cuidadosa. Esta técnica también es útil para evaluar rápidamente los daños causados por los terremotos, ya que demuestra una precisión comparable a la del escaneo láser para cartografiar las deformaciones estructurales (Vasilakos, et. al, 2018).

Entre sus principales ventajas están la accesibilidad y el menor costo frente a métodos como el escaneo láser. Además, es no invasiva y aplicable en espacios de difícil acceso o reducidos, y

aporta una documentación detallada de texturas y colores útil para la restauración patrimonial, capturando con precisión las características visuales y estructurales del edificio histórico.



Figura 14. Procedimiento de levantamiento fotogramétrico de un prospecto (BibLus. s.f.).

2. 4. 4. SLAM LiDAR (Simultaneous Localization and Mapping)

El SLAM es una tecnología de mapeo móvil que permite a un dispositivo construir simultáneamente un mapa tridimensional de su entorno y localizar su posición dentro de él, en tiempo real y sin necesidad de estaciones fijas ni interrumpir el movimiento (Figura 15). Esto lo hace especialmente eficiente para levantar interiores complejos o edificaciones de gran superficie que requerirían múltiples estaciones TLS.

Un estudio reciente evaluó el desempeño de tres sistemas SLAM portátiles aplicados a la documentación tridimensional de iglesias históricas en la región de Lunigiana (Italia), concluyendo que todos los instrumentos evaluados capturan eficientemente las geometrías primarias de edificios históricos complejos, con diferencias en términos de precisión, consistencia de datos y legibilidad de los detalles arquitectónicos (Borona & Colapietro, 2026). Ofrecen ventajas en velocidad, accesibilidad y flexibilidad, aunque no alcanzan la resolución del TLS convencional, siendo óptimos cuando la eficiencia operativa prima sobre la máxima exactitud métrica (Borona & Colapietro, 2026). Su limitación más relevante es la acumulación de errores de deriva conocida como drift en recorridos de larga duración, que puede comprometer la coherencia geométrica del

modelo final si no se aplican técnicas de corrección como el cierre de bucles o la integración con puntos de control GNSS.



Figura 15. Levantamiento con equipo SLAM LiDAR (Skyviv. s.f.).

2. 4. 5. Integración de Escaneo Láser Terrestre y Fotogrametría UAV

La integración del TLS con la fotogrametría UAV combina la precisión del TLS en el detalle con la capacidad del UAV para cubrir áreas amplias, obteniendo un modelo 3D completo ideal para edificios patrimoniales de gran complejidad (Tysiac, et. al, 2023). En el estudio de la iglesia de San Adalberto en Gdansk, Polonia, esta metodología fue utilizada para crear un modelo HBIM que incorporara detalles geométricos y espectrales, permitiendo evaluar la degradación de la estructura debido a factores ambientales, como la exposición a la luz solar.

Esta integración permite analizar el interior y el exterior de la estructura, capturar áreas inaccesibles y apoyar estudios ambientales (Figura 16). En HBIM, un modelo tan exhaustivo es idóneo para edificios patrimoniales complejos, pues aporta información precisa para priorizar las intervenciones de conservación y gestionar el mantenimiento a largo plazo.



Figura 16. Combinación de tecnología LiDAR (láser) con UAVs (YellowScan. s.f.)

2. 4. 6. Cámara 360° y fotogrametría esférica

Las cámaras 360° capturan imágenes omnidireccionales en una sola toma, combinando lentes de ojo de pez en una proyección equirrectangular de la esfera completa (Figura 17). Integradas en flujos fotogramétricos, generan nubes de puntos y mallas texturizadas; su principal ventaja es que el solapamiento queda garantizado por el campo de visión total, reduciendo drásticamente el tiempo y número de imágenes requeridos (Barazzetti, Previtali, & Roncoroni, 2018).

Teppati, Chiabrando, & Giulio (2021) demostraron su aplicabilidad en la documentación de entornos patrimoniales complejos incluyendo el campanario de Santa Marta en Montanaro, Italia, un edificio del siglo XVIII con espacios de difícil acceso concluyendo que la técnica es eficaz en interiores donde las cámaras convencionales requieren un elevado número de tomas desde múltiples ángulos. No obstante, las imágenes equirrectangulares presentan distorsiones geométricas que pueden afectar la detección de puntos homólogos; como estrategia correctiva, algunos flujos de trabajo contemplan la conversión al formato Cubemap, que genera seis vistas planas equivalentes a las de una cámara convencional, mejorando la estabilidad del modelo.



Figura 17. Cámara 360° usada en levantamientos (Waypoint. s.f.).

2. 4. 7. Escáner LiDAR integrado en dispositivo iPhone

Desde 2020, Apple integró un sensor LiDAR de estado sólido en sus modelos iPhone Pro (desde el 12 Pro) e iPad Pro. Basado en tecnología de tiempo de vuelo (ToF), emite pulsos de luz infrarroja y mide su tiempo de retorno para capturar la profundidad con gran velocidad y sin procesamiento fotogramétrico posterior (Figura 18). A diferencia del LiDAR de barrido mecánico del TLS profesional, el sensor integrado carece de partes móviles lo que le da mayor robustez y compacidad, aunque su rango operativo se limita a unos 5 metros (Teppati et.al, 2022).

Mientras el TLS ofrece alta precisión a alto costo, el LiDAR integrado en Apple reduce costos y amplía el acceso, aunque su precisión disminuye en estructuras de mayor escala. Su principal ventaja es la accesibilidad: costo de implementación casi nulo y curva de aprendizaje corta, relevante para instituciones latinoamericanas con restricciones presupuestarias (Kędziorski, et.al, 2024).



Figura 18. Levantamiento de una casa iPhone con sensor LiDAR (Naranjo, M, 2023).

2. 5. Metodología HBIM: fundamentos y tecnologías involucradas

2. 5. 1. De BIM al HBIM: origen y necesidad

Building Information Modeling (BIM) es una metodología de trabajo colaborativa que permite crear y gestionar modelos digitales tridimensionales de edificaciones, integrando en un solo entorno información geométrica, constructiva y de ciclo de vida. Sin embargo, BIM fue diseñado para edificaciones nuevas, con geometrías regulares, materiales estandarizados y flujos de trabajo predecibles, condiciones que no existen en los edificios históricos. Como señalan (Murphy, McGovern, & Pavia, 2013), los componentes paramétricos estándar del BIM son incapaces de representar adecuadamente las formas irregulares de muros, bóvedas y elementos ornamentales propios de las estructuras más antiguas; además, la historia constructiva de un bien patrimonial puede incluir reparaciones o modificaciones no registradas, de modo que no existe una única versión "correcta" del edificio que modelar.

La metodología Heritage Building Information Modeling (HBIM) surge precisamente como respuesta a estas limitaciones, diseñada para satisfacer las necesidades específicas de

conservación y gestión del patrimonio cultural. Fue introducido por Murphy, McGovern, & Pavia (2013) como un sistema de bibliotecas de objetos paramétricos derivados de levantamientos con escaneo láser y fotogrametría, aplicado inicialmente a edificios históricos irlandeses. Su premisa central es que el modelo no es solo una representación geométrica, sino un repositorio de conocimiento que integra materiales, técnicas constructivas, patrones de deterioro y contexto histórico en una única plataforma digital (Babakhani, 2025). A diferencia del BIM convencional, el HBIM acepta la incertidumbre y se centra en el registro cuidadoso de evidencias en lugar de buscar un modelo perfecto; en este sentido, el HBIM es tanto un proceso técnico como una práctica cultural que requiere sensibilidad hacia el significado e identidad del bien, en la Figura 19 se pueden observar las grandes diferencias entre estas metodologías.

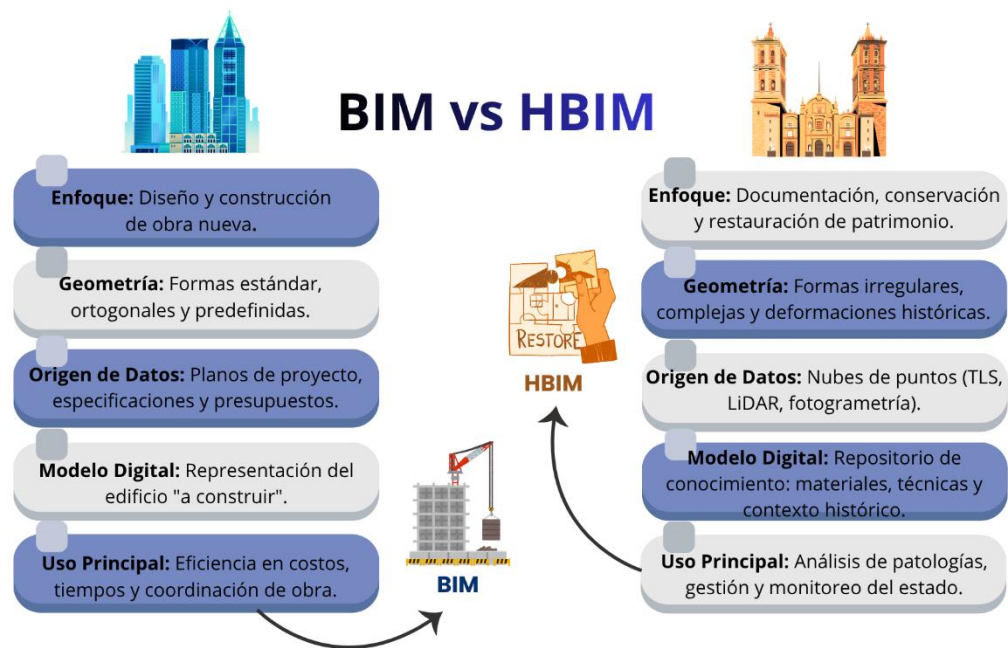


Figura 19. Principales diferencias entre BIM y HBIM. Fuente: Elaboración propia.

2. 5. 2. *Qué contiene un modelo HBIM: más allá de la geometría*

El objetivo principal del HBIM es crear modelos digitales detallados que no solo reflejen la geometría de los edificios patrimoniales, sino que incorporen información contextual sobre su historia, sus materiales originales, su estado de conservación y las intervenciones realizadas en el tiempo. Para ello, el HBIM requiere bibliotecas de objetos paramétricos especializados que representan elementos arquitectónicos de distintas épocas y estilos; arcos, bóvedas, pilastras, portadas ajustables a las particularidades de cada estructura (López et al., 2018). Esta personalización es fundamental: permite que el modelo refleje con fidelidad los detalles únicos de cada edificación, algo indispensable para la restauración y conservación patrimonial. A diferencia de BIM, el HBIM debe integrar fuentes de información muy variadas documentos históricos, fotografías antiguas, informes de restauraciones previas y levantamientos contemporáneos, cuya gestión es un desafío importante, pues los datos pueden ser contradictorios, incompletos o deteriorados por el tiempo. Ello exige una verificación cruzada cuidadosa de las fuentes y, a veces, aceptar la ambigüedad como parte del proceso.

Los Niveles de Desarrollo (LOD, por sus siglas en inglés) son un concepto clave del HBIM: definen con qué grado de detalle geométrico e informativo se representa cada elemento en el modelo digital. A diferencia del BIM convencional, donde el LOD describe el avance de un proyecto de construcción como se observa en la Figura 20, en el ámbito patrimonial debe adaptarse a las geometrías irregulares, los registros incompletos y la necesidad de respetar los valores culturales del bien. Esto exige una estrategia clasificada y flexible que combine distintas escalas de detalle según los objetivos del proyecto y el estado real de la edificación (Murphy, McGovern, & Pavia, 2013; Babakhani, 2025).

El sistema funciona de manera progresiva: el LOD 100 representa volúmenes básicos sin texturas ni distinciones de componentes, útil para planificación preliminar; el LOD 200 incorpora los principales elementos estructurales con mayor precisión, permitiendo zonificación espacial y análisis básico; el LOD 300 incluye todos los componentes relevantes ventanas, puertas y elementos decorativos con detalle suficiente para elaborar planes de restauración y coordinar intervenciones; el LOD 400 añade información constructiva sobre materiales y condiciones actuales, siendo clave para proyectos que requieren simulación o detección de conflictos estructurales; y el LOD 500 representa el estado verificado del edificio con metadatos completos sobre materiales, deterioro e intervenciones históricas, aproximándose al concepto de "gemelo digital" capaz de soportar el mantenimiento continuo del bien (Babakhani, 2025).

En la práctica, aplicar estos niveles en un proyecto real exige decisiones estratégicas. En el Palazzo Reale de Turín sitio UNESCO usado como banco de pruebas para metodologías HBIM avanzadas se adoptó un enfoque de LOD por zonas: las fachadas con mayor detalle y mejor calidad de escaneo se modelaron a LOD 300–400, mientras que los interiores con cobertura de datos limitada se resolvieron con modelos volumétricos simples de LOD 100–200. Esta estrategia zonificada mantiene la coherencia metodológica y respeta la disponibilidad real de los datos, y es replicable en otros proyectos (Babakhani, 2025).



Figura 20. Niveles de Detalle LOD (Biblus. 2025).

2. 5. 3. *BIM como herramienta de gestión integral y mantenimiento programado*

Una de las contribuciones más relevantes del HBIM frente a la documentación convencional es su capacidad para centralizar en un único entorno toda la información de un bien patrimonial, haciéndola accesible, actualizable y compartible entre los actores de su conservación. La integración de BIM o HBIM con los Sistemas de Información Geográfica (GIS) ha cobrado un papel crucial no solo en la gestión de ciudades inteligentes, sino también en la conservación y salvaguarda del patrimonio, al permitir que los tomadores de decisiones evalúen el impacto de las intervenciones y adopten decisiones informadas (Preciado et al., 2020).

El mantenimiento programado es el medio más adecuado para garantizar la persistencia del bien, mediante una planificación cuidadosa de las intervenciones sobre el entorno ambiental, el edificio o el patrimonio mueble que contiene con una cadencia temporal que prevenga patologías o riesgos a largo plazo. Este enfoque es directamente aplicable a los BIC de Cali: un modelo HBIM de una iglesia colonial no sería un producto estático, sino un instrumento vivo que se actualiza con cada inspección, intervención o nuevo deterioro detectado.

2. 5. 4. *El flujo Scan-to-HBIM: de la nube de puntos al modelo informado*

La implementación práctica del HBIM sigue un flujo de trabajo que comienza con la captura de datos del edificio mediante técnicas de levantamiento y culmina en un modelo paramétrico enriquecido con información histórica y de gestión. Este flujo, conocido como Scan-to-HBIM, comprende cuatro etapas fundamentales: adquisición de datos mediante técnicas como TLS, fotogrametría, SLAM o iPhone LiDAR; procesamiento y limpieza de las nubes de puntos; modelado paramétrico con asignación de LOD; e integración de información no geométrica histórica, material, estructural y de conservación.

Murphy et. al (2013) señalan que el modelado paramétrico incluye crear objetos digitales reutilizables que representan elementos arquitectónicos ventanas, arcos, bóvedas con reglas de forma que permiten adaptarlos a distintos casos dentro de un mismo edificio o en otros sitios. También subrayan la importancia de validar el trabajo comparando periódicamente la nube de puntos con el modelo paramétrico. En el Palazzo Reale, esta validación se realizó en CloudCompare mediante comparaciones nube-a-nube (C2C) y nube-a-malla (C2M), obteniendo métricas cuantitativas de desviación que evaluaron la fidelidad del modelo respecto a los datos de levantamiento (Babakhani, 2025).

Un componente crítico del flujo es el procesamiento de los datos: una vez generadas las nubes de puntos, se filtran y limpian para eliminar ruido y garantizar la fiabilidad del modelo. Así los modelos HBIM reflejan con exactitud no solo la estructura y las dimensiones del edificio, sino también sus elementos decorativos y de interés histórico, lo cual es vital para la preservación de bienes patrimoniales (Moyano, et.al, 2021). Los modelos resultantes no solo documentan el estado actual de las edificaciones, sino que también sirven como herramienta para monitorear cambios a lo largo del tiempo, facilitando la planificación de intervenciones futuras.

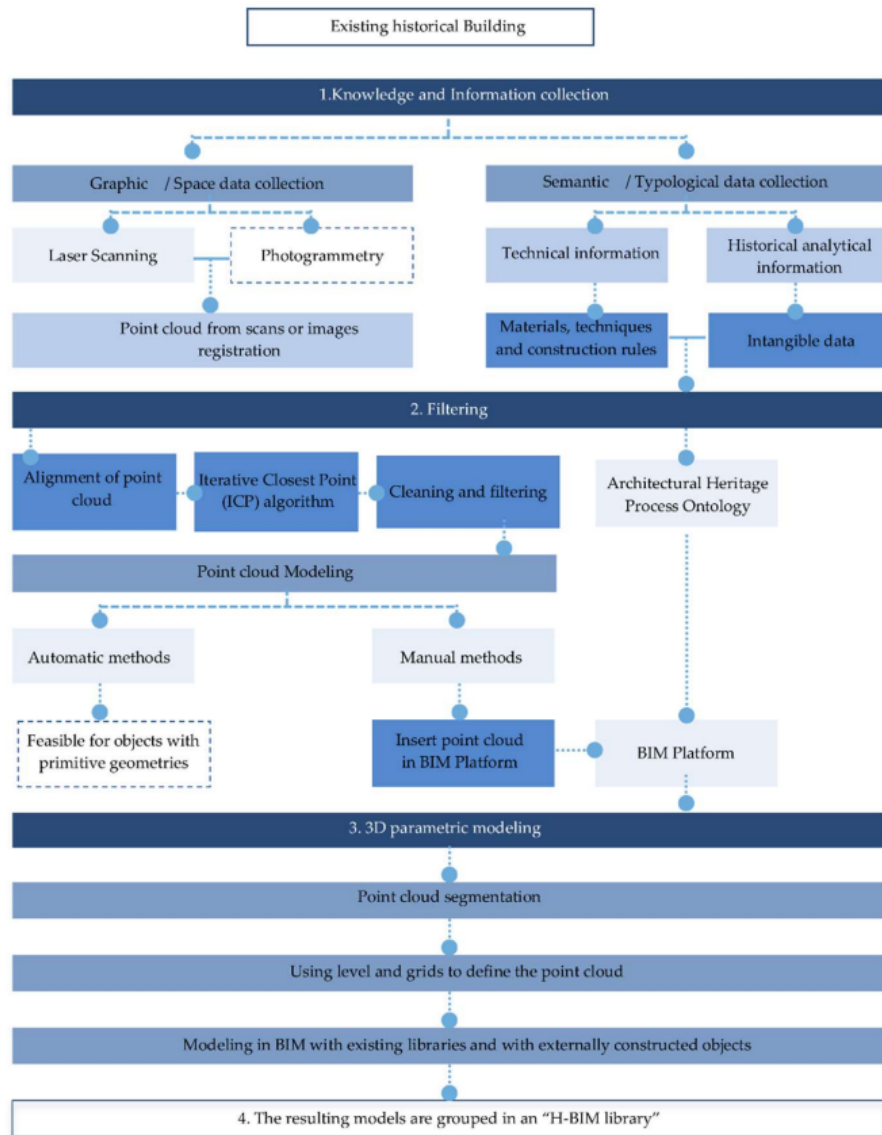


Figura 21. Diagrama de flujo de método de construcción manual de la biblioteca HBIM (López et al., 2018)

2. 6. Aplicaciones de HBIM en patrimonio

El interés académico por la aplicación del HBIM en la gestión del patrimonio construido ha crecido en la última década, impulsado tanto por el avance de las tecnologías de levantamiento como por la creciente conciencia institucional sobre la fragilidad de los bienes culturales. A

continuación, se presentan cuatro casos de estudio representativos que ilustran el alcance, las metodologías y los resultados de esta línea de investigación.

2. 6. 1. *Caso 1 Colombia: BIM aplicado al estudio patológico de edificaciones patrimoniales*

El trabajo de Chica, León, & Patiño (2023), desarrolla una metodología estructurada en tres fases; reconocimiento, diagnóstico e intervención, que inicia con la definición de un protocolo de recopilación de información in situ para caracterizar físicamente el inmueble e identificar patologías preliminares, continúa con la aplicación del concepto de mecanismo de daño (causa, proceso y efecto) y la construcción de una matriz de diagnóstico en lenguaje parametrizable para BIM, y culmina con la formulación de recomendaciones de intervención incorporadas como atributos del modelo, obteniendo así un protocolo metodológico que define qué información recopilar, cómo organizarla y cómo integrarla en un entorno BIM común y actualizable para todas las disciplinas involucradas en la conservación del bien; entre las principales dificultades, los autores identifican la tensión entre el lenguaje cualitativo del diagnóstico patológico, basado en la interpretación experta, y los requerimientos formales y parametrizados que exige el modelado BIM, señalando además que la conversión de los datos de campo en objetos paramétricos solo resulta efectiva cuando se realiza bajo el acompañamiento de un profesional con formación en conservación patrimonial, sin poder delegarse a modeladores ajenos a esta disciplina; finalmente, como recomendación, plantean que el protocolo tiene vocación de herramienta replicable adaptable a distintos tipos de edificaciones patrimoniales y proponen que los protocolos BIM para patrimonio se incorporen desde las primeras fases de cualquier intervención, en lugar de aplicarse únicamente como un producto de documentación posterior(Chica, León, & Patiño, 2023).

2. 6. 2. *Caso 2 Brasil (Latinoamérica): Mapa de daños mediante HBIM en la Iglesia de San Francisco de Asís, Ouro Preto*

La Iglesia de San Francisco de Asís, ubicada en Ouro Preto, Minas Gerais (Brasil), es una edificación colonial barroca construida entre 1765 y 1890 según el diseño de Antonio Francisco Lisboa (Aleijadinho), reconocida como la primera edificación protegida por la legislación patrimonial brasileña desde 1938 y, a partir de 1980, integrante del conjunto de Ouro Preto declarado Patrimonio Mundial por la UNESCO, destacándose por sus bajorrelieves de piedra tallada considerados obras cumbres del barroco latinoamericano.

En este contexto, un equipo multidisciplinario desarrolló en 2023 un trabajo de campo que combinó fotogrametría aérea, fluorescencia ultravioleta, escaneo láser móvil y termografía infrarroja para capturar los detalles del frontispicio, generando un modelado 3D y un mapeo de daños que, junto con el examen histórico de los ciclos de restauración previos, ofrecen una comprensión integral de las condiciones estructurales para la toma de decisiones de conservación, integrando la totalidad de los datos en un modelo de diagnóstico HBIM correspondiente al primer mapa de daños tridimensional de este bien; entre las principales dificultades, los autores señalan la complejidad excepcional de los relieves de piedra tallada de Aleijadinho, cuyas geometrías curvas de alta resolución no pueden ser capturadas por un único método, lo que justificó el uso combinado de las cuatro tecnologías mencionadas cada una orientada a un aspecto específico: geometría y textura, restauraciones antiguas no visibles, geometría volumétrica, y humedades o grietas subsuperficiales, así como los retos de interoperabilidad y estandarización que implica integrar fuentes de información tan heterogéneas; finalmente, como recomendación, los autores plantean que esta metodología de captura multifuente articulada en un modelo HBIM es transferible a otros bienes patrimoniales con elementos decorativos de alta complejidad, subrayando que el uso

sistemático de datos verificables y metodologías analíticas precisas eleva los estándares de tratamiento, gestión de riesgos y mantenimiento, reduciendo la frecuencia de los costosos ciclos de restauración reactiva que han caracterizado la conservación de estos bienes (Froner, et.al, 2024).



Figura 22. Igreja de San Francisco de Asis Ouro Petro, Brasil; a) parte exterior y b) pintura interna iglesia (Zimmerman,R s.f).

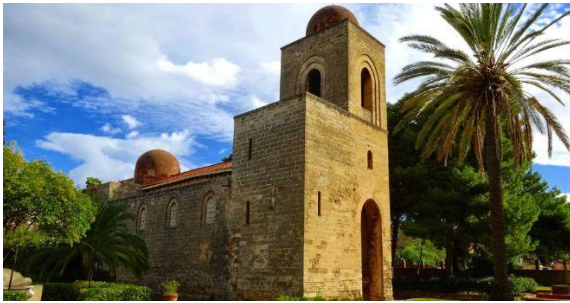
2. 6. 3. Caso 3 Italia: flujo Scan-to-HBIM en dos iglesias medievales de Palermo

Las edificaciones estudiadas corresponden a la Iglesia de San Juan Bautista de los Leprosos, en Palermo, Italia, fundada en 1071 durante el asedio normando sobre las ruinas de un castillo sarraceno y reconocida como la primera iglesia construida en Sicilia según el estilo árabe-normando, con planta de cruz comisaria de tres naves y cuatro tramos, un presbiterio con dos bóvedas de crucería y una cúpula hemisférica en ladrillo de arenisca vista, muros en mampostería de sillería de arenisca sin revoque, techos de madera y pavimento de terracota en espiga; y a la Iglesia de San Juan Evangelista de los Ermitaños, también en Palermo, que data de 1132, con planta de cruz comisaria de nave única, reconocible por sus cinco cúpulas hemisféricas con revoque rojo, símbolo icónico del itinerario árabe-normando en Sicilia e incluida en la Lista de Patrimonio Mundial UNESCO en 2015, con muros de sillería de arenisca sin revestimiento, suelos de terracota en espiga y ventanas de arco apuntado originalmente con celosías de yeso.

En cuanto a la metodología (Figura 24) la adquisición de datos se planificó de manera distinta para cada iglesia, combinando en San Juan de los Leprosos TLS, fotogrametría UAV y estación total, mientras que en San Juan de los Ermitaños solo se empleó TLS debido a restricciones legales al vuelo de drones, identificándose en ambos casos, mediante inspecciones previas, zonas inaccesibles, excavaciones en curso y elementos de mobiliario o vegetación que podían generar lagunas en las superficies capturadas; las nubes TLS y UAV se alinearon en CloudCompare mediante un procedimiento nube a nube, conservando del modelo fotogramétrico únicamente las partes de cubierta no capturadas por el TLS, lo que resultó en una nube final de 100 millones de puntos para San Juan de los Leprosos, mientras que en San Juan de los Ermitaños se realizaron 40 escáneres que generaron una nube inicial de más de 603 millones de puntos, reducida a 82 millones tras el submuestreo espacial; como resultado, el trabajo produjo dos réplicas digitales de alta precisión en las que, junto a los atributos por defecto de Revit, se implementaron atributos específicos sobre el estado de conservación, la configuración original, las alteraciones y la fecha del último relevamiento, obteniéndose desviaciones medias de 0,002 m ($\pm 0,011$ m) en columnas y arcos, $-0,001$ m ($\pm 0,005$ m) en ventanas apuntadas, 0,005 m ($\pm 0,018$ m) en las cúpulas de San Juan de los Leprosos y $-0,026$ m ($\pm 0,036$ m) en las de San Juan de los Ermitaños donde la ausencia de UAV limitó la cobertura superior, evidenciando que es posible obtener modelos HBIM de alta fidelidad; entre las principales dificultades, los autores señalan que la fase de modelado sigue siendo el cuello de botella, sobre todo por la ausencia de bibliotecas de objetos paramétricos históricos y la escasa capacidad de los softwares BIM para gestionar formas complejas e irregulares, a lo que se suma la dificultad de conectar los espacios interiores y exteriores, lo que llevó, en el caso de los Ermitaños, a ubicar nueve estaciones de escaneo en edificios colindantes más altos para capturar las cúpulas ante la imposibilidad de usar drones; finalmente, como

recomendación, los autores concluyen que el modelo HBIM no debe entenderse como un producto estático, sino como un archivo integrado con espacio para mejoras, actualizaciones e inspecciones futuras, explotable en una plataforma colaborativa flexible acorde con la conservación del patrimonio (Aricò, Lo Brutto, & Maltese, 2023).

a)



b)



Figura 23. Iglesias estudiadas: a) Chiesa di San Giovanni dei lebbrosi a Palermo vista externa (Balarm s.f.) y b) San Giovanni degli Eremiti vista externa (Panormus. s.f.).

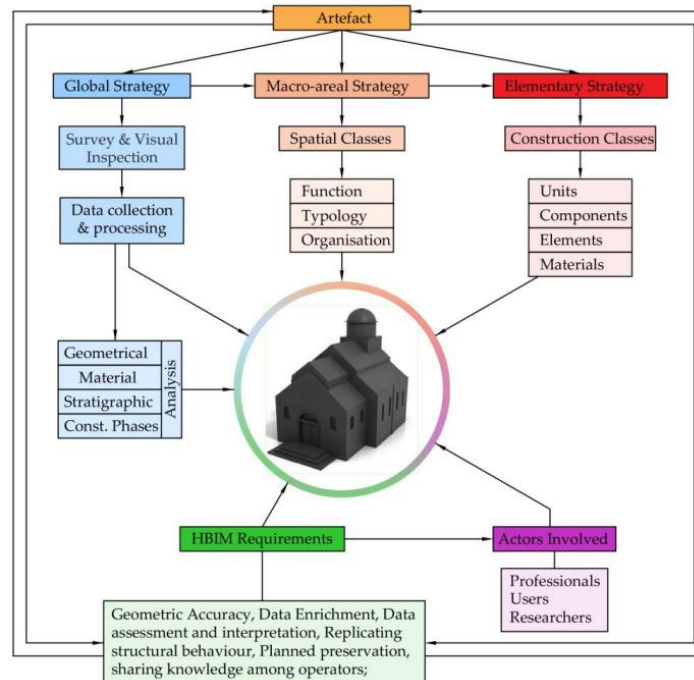


Figura 24. El esquema organizativo “basado en el conocimiento” para la explotación de HBIM. (Aricò, Lo Brutto, & Maltese, 2023)

2. 6. 4. *Caso 4 Italia: Modelado HBIM multiescala para la conservación del*

Palazzo Reale de Turín

El Palazzo Reale de Turín (Italia), antigua residencia de la Casa de Saboya e inscrito en la Lista de Patrimonio Mundial UNESCO como parte de las Residencias Reales de Saboya, constituye un bien de notable complejidad arquitectónica, con fachadas ornamentales en piedra, estuco y elementos barrocos, y espacios interiores extensos cuya documentación previa era heterogénea en calidad y cobertura (Figura 25); en este contexto, Babakhani (2025), en su tesis de maestría en el Politecnico di Torino, abordó el reto de generar un modelo HBIM multiescala del Palazzo Reale como herramienta de visualización, documentación y soporte para la conservación, partiendo de la premisa de que no es necesario modelar todas las partes de un bien con el mismo nivel de detalle, para lo cual adoptó una zonificación por LOD: fachadas con escaneos de alta calidad en LOD 300–400 e información constructiva detallada sobre materiales y elementos ornamentales, e interiores con cobertura más limitada en LOD 100–200, suficiente para la planificación general sin comprometer la coherencia del conjunto, concentrando así el esfuerzo de modelado donde la calidad de los datos lo justificaba; para validar la fidelidad geométrica del modelo respecto a los datos de levantamiento, el trabajo empleó un proceso de comparación cuantitativa en CloudCompare mediante métodos nube-a-nube (C2C) y nube-a-malla (C2M), obteniendo métricas de desviación entre el modelo paramétrico construido en Revit y la nube de puntos original.

Entre las principales dificultades, el autor identifica la heterogeneidad de los datos de partida, pues la disponibilidad desigual de levantamientos entre fachadas e interiores obligó a un sistema de zonificación flexible en lugar de un LOD uniforme, exigiendo justificar técnicamente cada decisión de nivel de detalle, a lo que se sumaron los retos de coherencia temporal derivados de integrar información de fuentes y épocas distintas en un edificio con una larga historia de

intervenciones; finalmente, como recomendación, el trabajo concluye que la estrategia de LOD por zonas constituye un principio metodológico replicable en proyectos de gran escala con calidad de datos no homogénea, evitando el dilema entre modelar todo con máximo detalle ya que se hace inviable en tiempo y recursos o renunciar al detalle en las zonas de mayor valor, y recomienda adoptar las clasificaciones LOG y GOG como complemento del LOD convencional, de modo que cualquier usuario pueda identificar con claridad el origen y la confiabilidad de cada elemento geométrico (Babakhani, 2025).



Figura 25. Palacio Real de Turín (Italia.it, s.f.)

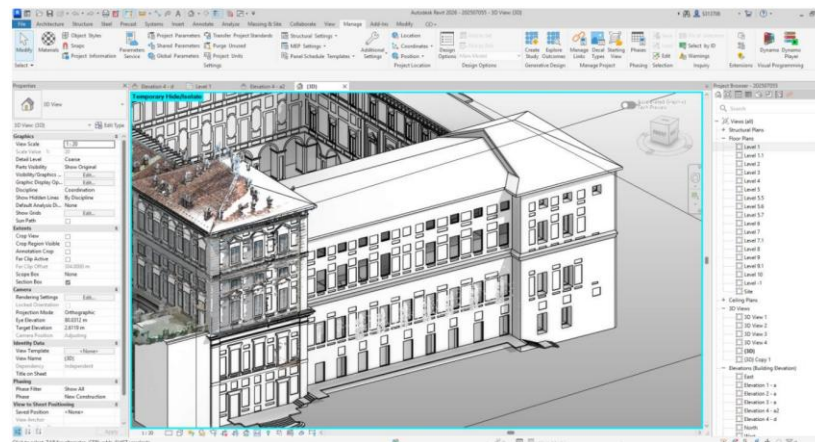


Figura 26. Vista en perspectiva del archivo HBIM principal de la fachada este. Fachada este con niveles de detalle combinados (Babakhani, 2025).

El recorrido conceptual desarrollado en este capítulo permite comprender la doble urgencia que da origen a esta investigación. Por un lado, las iglesias coloniales de Cali son edificaciones de alto valor patrimonial construidas con materiales y sistemas constructivos, que las hacen estructuralmente vulnerables ante eventos sísmicos, y cuya preservación depende directamente de la calidad de la información técnica disponible. Por otro lado, el panorama tecnológico actual ofrece un espectro amplio de técnicas de levantamiento desde el TLS hasta el iPhone LiDAR y la metodología HBIM ha demostrado en casos de estudio en Colombia, Brasil e Italia su capacidad para transformar esos datos en modelos digitales informados que soporten la gestión integral de los BIC a lo largo del tiempo.

La articulación de estos elementos pone de manifiesto una brecha concreta que esta investigación busca atender: existe suficiente evidencia sobre la urgencia de documentar el patrimonio colonial de Cali y sobre el potencial de las tecnologías disponibles para hacerlo, pero no se cuenta con criterios técnicos verificados en condiciones reales de disponibilidad institucional que orienten la selección de técnicas y la organización de un flujo de trabajo replicable en el contexto latinoamericano. Es precisamente esa brecha la que justifica la metodología descrita en el capítulo siguiente.

3. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

Para abordar los objetivos de esta investigación, la metodología se estructuró en cinco etapas, el diseño metodológico integra dos dimensiones complementarias: una dimensión documental, enfocada en la recopilación y análisis de la información existente sobre el patrimonio arquitectónico colonial de Cali, y una dimensión experimental, centrada en la aplicación y evaluación comparativa de técnicas de levantamiento digital en una edificación caso de estudio. La articulación entre ambas dimensiones permite que los resultados del proceso experimental informen directamente el desarrollo de protocolos aplicables a la documentación de Bienes de Interés Cultural mediante la metodología HBIM. En la Figura 28 se presenta el diagrama de flujo de la metodología, organizado por etapas y sus relaciones con cada objetivo específico.

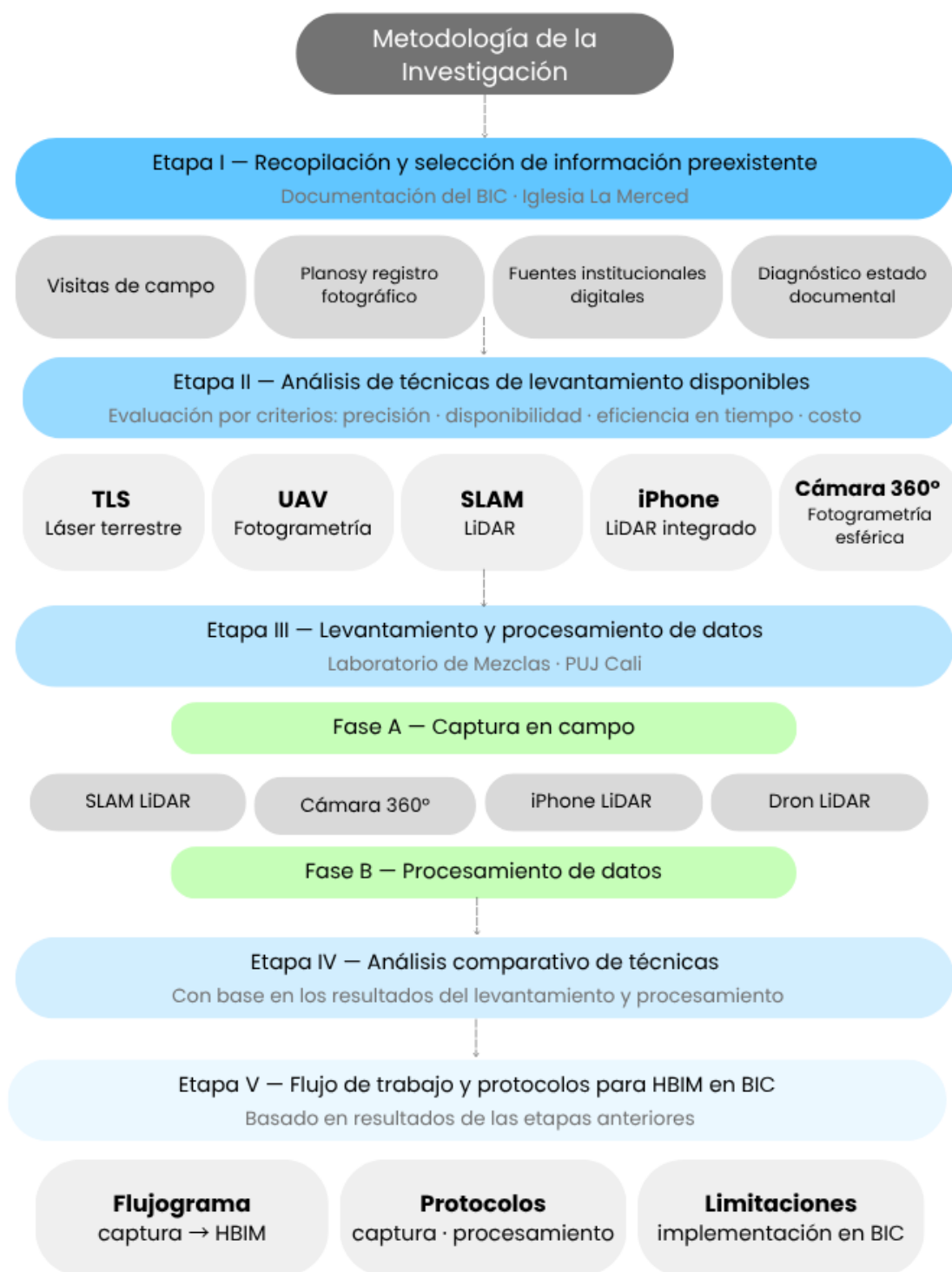


Figura 27. Metodología de Investigación. Fuente: elaboración propia

3. 1. Documentación del Bien de Interés Cultural: Iglesia La Merced

La documentación histórica y técnica de la Iglesia La Merced de Santiago de Cali constituyó la primera fase de esta investigación, orientada a recopilar, organizar y analizar la información existente sobre el bien, identificar sus vacíos documentales y sentar las bases para la propuesta de un modelo HBIM. El proceso combinó un protocolo de visitas de campo con una búsqueda documental en fuentes institucionales, que se describe a continuación.

3. 1. 1. *Acercamiento institucional y reconocimiento del bien*

La primera aproximación se realizó mediante una visita institucional con la Hermana Superiora de la comunidad religiosa y el bibliotecario del convento, con el fin de presentar los objetivos de la investigación, obtener el aval para acceder a la documentación y establecer los canales de comunicación para el trabajo de campo.

Se hizo también un recorrido guiado por las dependencias del conjunto conventual (nave principal, capillas laterales, sacristía), con excepción del Museo Arqueológico La Merced (MUSA), administrado por el Banco Popular. El recorrido permitió una primera aproximación a la configuración espacial, materiales constructivos, estado de conservación y elementos patrimoniales significativos. La hermana y el bibliotecario aportaron información contextual sobre la historia del conjunto y sus períodos constructivos, fuente de primer orden para comprender la estratificación histórica del bien y orientar las búsquedas documentales posteriores.



Figura 28. Recorrido inicial Complejo Religioso La Merced. Fuente: elaboración propia.

3. 1. 2. Revisión documental y registro fotográfico de planos

En las visitas técnicas y documentales se revisó de forma sistemática la información gráfica y escrita del archivo físico de la institución. El bibliotecario facilitó los planos existentes del conjunto, en su mayoría correspondientes a intervenciones de restauración de distintos períodos.

Su estado de conservación era heterogéneo: algunos planos resultaban legibles y otros presentaban deterioro significativo; decoloración, rasgaduras, pérdida parcial de tinta y degradación del papel. Ante la ausencia de versiones digitalizadas, confirmada en la última visita de febrero de 2026, se realizó un registro fotográfico sistemático de los planos como única vía para preservar y analizar su información, con iluminación controlada para minimizar reflejos y maximizar la legibilidad.

La revisión permitió identificar los sistemas constructivos, las geometrías generales de planta y secciones del conjunto y las modificaciones introducidas en distintas fases del bien. No obstante, la información presentó limitaciones importantes: la planimetría era incompleta no cubría la totalidad de los espacios y, en algunos casos, excluía el área del museo por no pertenecer ya a la

comunidad; los planos de restauración no estaban sistematizados ni referenciados cronológicamente y la información sobre materiales, detalles estructurales y estado de conservación era escasa o inexistente en muchos documentos. El bibliotecario complementó esto con información verbal sobre las intervenciones más relevantes del conjunto, registrada en notas de campo, que resultó clave para contextualizar históricamente la documentación gráfica.

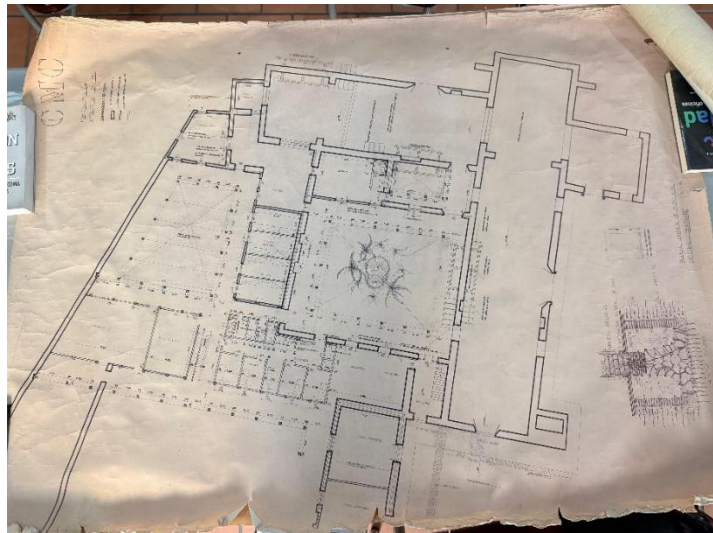


Figura 29. Estado actual de los planos con rasgaduras en los bordes. Fuente: Elaboración propia.

3. 1. 3. *Búsqueda documental en fuentes institucionales digitales*

En paralelo a las visitas se realizó una búsqueda en plataformas institucionales en línea, consultando el portal de Datos Abiertos de la Alcaldía de Cali y las fichas técnicas de BIC del Departamento Administrativo de Planeación Municipal, en particular la ficha BIC N-23 del Convento de La Merced.

La ficha confirmó las limitaciones ya detectadas en campo: información fotográfica desactualizada, planimetría incompleta y datos estructurales demasiado generales, insuficientes para orientar una intervención técnica o servir de base a un modelo HBIM de calidad.

3. 1. 4. *Síntesis del estado documental y justificación de la necesidad de HBIM*

La recopilación documental permitió un diagnóstico resumido en cuatro hallazgos: primero, la información existente es exclusivamente analógica (a febrero de 2026 el archivo no contaba con documentación digitalizada, aunque ya habían recibido un escáner para iniciar ese proceso); segundo, la planimetría es incompleta y de estado variable; tercero, existe una brecha entre la información formal de las fichas BIC y la que el bien requeriría para su gestión integral, no por datos erróneos sino por falta de actualización; y cuarto, el conocimiento histórico más detallado reside en fuentes orales (el bibliotecario) y no está sistematizado, salvo una restauración registrada en un libro físico de la biblioteca.

Este diagnóstico evidencia la pertinencia de la metodología propuesta: un flujo de trabajo HBIM que, a partir de levantamientos digitales de alta precisión, construya un modelo informado capaz de superar las limitaciones de la documentación convencional y servir de soporte accesible para la gestión integral del bien a largo plazo.

3. 2. *Análisis de técnicas de levantamiento disponibles*

La segunda etapa partió de una revisión del panorama de tecnologías de levantamiento aplicables a edificaciones patrimoniales (detallado en la sección 5.4 del marco de referencia), desde técnicas de alta precisión y costo elevado (TLS, fotogrametría UAV) hasta opciones más accesibles (Cámara 360°, iPhone LiDAR). Sin embargo, la selección de técnicas para esta investigación no respondió solo a criterios técnicos comparativos, sino que estuvo determinada en primera instancia por la disponibilidad real de los equipos en el contexto institucional del proyecto.

Las cuatro técnicas seleccionadas fueron las siguientes. El SLAM LiDAR fue empleado gracias a la disponibilidad del equipo a través de los recursos de la Pontificia Universidad Javeriana

Cali, institución que cuenta con este dispositivo para actividades de investigación y docencia. La Cámara 360° específicamente una Insta360 X3. El iPhone 16 Pro con sensor LiDAR fue aportado por los integrantes del equipo de investigación, quienes contaban con un dispositivo iPhone Pro con sensor LiDAR integrado y el Dron LiDAR UAV específicamente el DJI Matrice 350 RTK + Zenmuse L2 surgió como una oportunidad en el transcurso del proyecto gracias a la empresa Geosoluciones DAJ, firma especializada en servicios geoespaciales con experiencia en cartografía, topografía, sistemas de información geográfica y sensores remotos, que facilitó el equipo y su operación para el levantamiento del Laboratorio de Mezclas.

Esta condición de disponibilidad, lejos de ser una limitación arbitraria, refleja una realidad frecuente en proyectos de documentación patrimonial en contextos latinoamericanos, donde el acceso a equipos profesionales de alto costo suele estar restringido por razones presupuestarias. Algunas de las técnicas seleccionadas representan precisamente el tipo de herramientas que organizaciones con recursos moderados podrían emplear, lo que añade pertinencia práctica. Adicionalmente, la coexistencia de cuatro tecnologías con niveles de complejidad, costo y precisión diferenciados; desde el Dron LiDAR UAV, de alta precisión y alto costo, hasta la Cámara 360°, de bajo costo, ofrece un rango de comparación amplio para derivar recomendaciones útiles para distintos contextos. En la fase de procesamiento, cada conjunto de datos fue procesado en las plataformas correspondientes para generar las nubes de puntos definitivas e integrarlas en el entorno BIM.

La Tabla 1 presenta una comparación sistematizada de las técnicas de levantamiento evaluadas en esta investigación a partir de seis criterios: precisión, costo, disponibilidad proyecto, eficiencia en tiempo, capacidad de captura interior, capacidad de captura exterior. Cada criterio es calificado mediante escalas en el caso de la precisión y eficiencia en tiempo: Bajo indica que la

técnica presenta limitaciones significativas en ese criterio y su desempeño no es adecuado para contextos de alta exigencia; Medio indica que la técnica cumple los requerimientos básicos del criterio con algunas restricciones que deben considerarse en su aplicación; y Alta indica que la técnica ofrece el mejor desempeño posible dentro del universo de tecnologías evaluadas. Para el criterio de Costo es calificado con la escala Muy Alto/Alto tecnologías que requieren equipos profesionales costosos, Medio equipos de mayor accesibilidad, pero aun así su costo es considerable, Bajo soluciones altamente accesibles que pueden estar en herramientas cotidianas, requiriendo inversión baja. Para Disponibilidad del proyecto la escala es simple Disponible o No Disponible. Por último, en capacidad de captura Interior y Exterior, la escala de calificación es Óptimo indica que la técnica se desempeña perfectamente en ese ambiente sin restricciones significativas, Moderado funciona y es viable, pero el entorno puede presentar desafíos que reduzcan su calidad o aumenten la dificultad del trabajo, Limitado indica que existen restricciones físicas que impiden la capacidad de captura adecuada.

Tabla 1. Comparación de técnicas para levantamiento de BIC.

<i>Técnica</i>	<i>Precisión</i>	<i>Costo</i>	<i>Disponibilidad proyecto</i>	<i>Eficiencia en tiempo</i>	<i>Interior</i>	<i>Exterior</i>
<i>Escaneo Láser Terrestre (TLS)</i>	Alta	Muy Alto	No Disponible	Baja	Óptimo	Óptimo
<i>Fotogrametría UAV</i>	Media	Medio	No Disponible	Alta	Limitado	Óptimo
<i>Fotogrametría Terrestre</i>	Media	Medio	No Disponible	Media	Moderado	Óptimo
<i>SLAM LiDAR</i>	Media	Medio	Disponible	Alta	Óptimo	Moderado
<i>Cámara 360°</i>	Baja	Bajo	Disponible	Media	Óptimo	Óptimo
<i>Escáner LiDAR integrado en dispositivo iPhone</i>	Baja	Bajo	Disponible	Alta	Óptimo	Moderado

<i>Técnica</i>	<i>Precisión</i>	<i>Costo</i>	<i>Disponibilidad proyecto</i>	<i>Eficiencia en tiempo</i>	<i>Interior</i>	<i>Exterior</i>
<i>Dron LiDAR</i>	Alta	Alto	Disponible	Alta	Limitado	Óptimo

Fuente: elaboración propia

3. 3. Aplicación de técnicas de levantamiento en el caso de estudio y procesamiento de datos

La tercera etapa constituyó el núcleo experimental de la investigación: la aplicación de las tres técnicas seleccionadas en la edificación caso de estudio el Laboratorio de Mezclas de la Pontificia Universidad Javeriana Cali, una edificación de características representativas que permitió evaluar el desempeño de cada tecnología en condiciones accesibles y controladas. Esta edificación fue seleccionada ante la imposibilidad de realizar los levantamientos directamente en una iglesia patrimonial, debido a las restricciones de acceso y permisos encontradas durante las gestiones realizadas. Los levantamientos con cada técnica se ejecutaron de forma independiente, siguiendo protocolos específicos de captura que se describen en detalle a continuación.

3. 3. 1. Levantamiento Espacial Mediante Tecnología SLAM LiDAR

El levantamiento del Laboratorio de Mezclas de la Pontificia Universidad Javeriana Cali se realizó mediante tecnología SLAM LiDAR (Simultaneous Localization and Mapping) combinada con un levantamiento topográfico de puntos de control utilizando equipos GNSS RTK. Esta combinación permitió capturar un modelo tridimensional completo de los espacios interiores y exteriores de la edificación, y posteriormente ajustarlo y georreferenciarlo.

La metodología se estructuró en dos etapas principales: la adquisición de datos en campo y el procesamiento e integración de la información en software especializado.

Etapa I: Adquisición de datos en campo

- **Levantamiento SLAM LiDAR**

El equipo SLAM SL9 fue retirado de su caja de transporte como se puede ver en la Figura 30 y acoplado a un bastón para facilitar su uso de forma móvil durante el recorrido. Antes de iniciar la captura, se creó un nuevo proyecto en el colector de datos del equipo, configurando el sistema de referencia correspondiente y ajustando la altura del bastón que fue 1,38 m, esto con el fin de que el levantamiento se genere con una altimetría más precisa durante el recorrido.



Figura 30. Dispositivo SLAM SL9. Fuente: elaboración propia.

La conexión entre el equipo SLAM y la tablet colectora de datos se estableció a través de la red Wi-Fi generada por el dispositivo, utilizando el código de conexión ubicado en la parte inferior del equipo. Una vez confirmada la conexión, se procedió a retirar el protector del sensor LiDAR y a registrar en el sistema la altura del bastón previamente grabada sobre el mismo, garantizando una correcta referencia de altura durante el levantamiento de datos.

Iniciado el levantamiento, se efectuó un recorrido continuo por el interior y exterior del Laboratorio de Mezclas, cubriendo el patio, la zona central y las demás salas del laboratorio (Figura 31). Dado que gran parte del recorrido se desarrolló en espacios interiores, el equipo no pudo vincularse directamente a señal GNSS la cual se pierde en espacios cubiertos, por lo que el modelo

fue capturado inicialmente sin amarre geodésico directo. Este aspecto fue subsanado en la etapa de procesamiento mediante la integración de puntos de control GNSS.

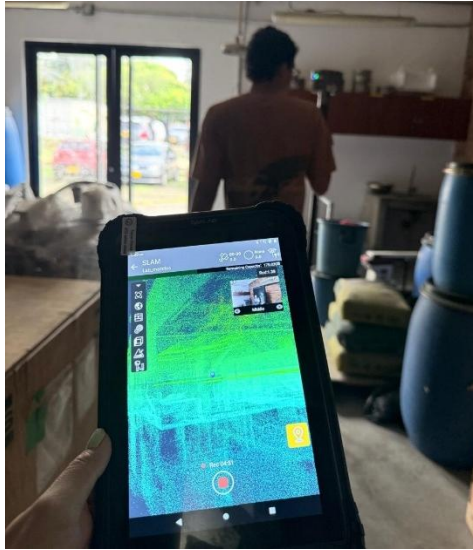


Figura 31. Visualización del levantamiento en tiempo real durante el recorrido por el Laboratorio de Mezclas. Fuente: elaboración propia.

- **Levantamiento de puntos de control con GPS GNSS RTK South G7**

Paralelamente al levantamiento SLAM, se realizó un levantamiento topográfico con equipos GNSS RTK South G7 para obtener tres puntos de control estratégicos distribuidos dentro del área de estudio. Estos puntos fueron utilizados posteriormente para ajustar y georreferenciar la nube de puntos obtenida mediante SLAM.

El equipo base fue instalado sobre un trípode con base nivelante, verificando la verticalidad mediante el nivel de ojo de pollo, como se observa en la Figura 35. El Rover fue acoplado a un bastón para la toma de datos en campo. El proyecto fue configurado en el colector de datos bajo el sistema de coordenadas MAGNA-SIRGAS Colombia Oeste, garantizando que toda la información levantada quedara referenciada al sistema de coordenadas oficial de Colombia.

La configuración del equipo base incluyó los siguientes parámetros técnicos: formato de transmisión RTCM 3.2, intervalo de transmisión de 1 segundo, modo de inicio de base en punto simple automático, máscara de elevación de 17° y PDOP de 5.0. La comunicación entre la base y el Rover se estableció mediante enlace UHF interno, utilizando el canal 1, lo importante es que los dos estén en el mismo canal, con potencia alta, suficiente para la distancia operativa del levantamiento.

Para cada punto de control se verificó el nivel del bastón mediante el ojo de pollo y se registró la medición una vez obtenida la solución RTK con calidad fija. Los tres puntos estratégicos levantados fueron posteriormente almacenados en la base de datos del colector y exportados para su uso en la etapa de procesamiento.

a)



b)



*Figura 32. a) Dispositivo Base Ajustado y Montado en Trípode, y b) Rover Acoplado al Bastón.
Fuente: elaboración propia*

Etapas II: Procesamiento de los datos

- **Procesamiento de la nube de puntos SLAM en Sat-LiDAR**

Una vez finalizado el trabajo de campo, los archivos generados por el equipo SLAM fueron transferidos al computador de procesamiento. En el software Sat-LiDAR se creó un nuevo proyecto asignando la ruta correspondiente a los datos capturados, y se ejecutó el procesamiento de la nube de puntos con los parámetros establecidos para el proyecto (Figura 34). El resultado fue exportado en formato .LAS para continuar con las etapas de ajuste y edición, es importante tener en cuenta que el tiempo de procesamiento de los datos va a depender de la capacidad del computador donde se está realizando pero también de la cantidad y calidad del levantamiento realizado, ya que entre más densa sea la nube de puntos más tiempo se va a requerir.

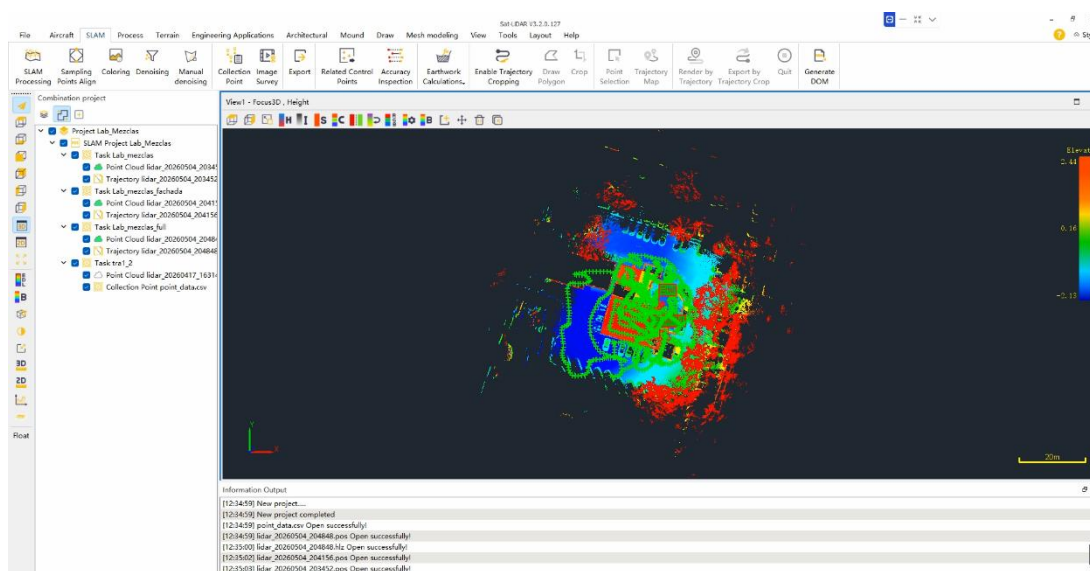


Figura 34. Procesamiento de datos SLAM en el software Sat-LiDAR. Fuente: Elaboración Propia.

- **Georreferenciación y ajuste del modelo en CloudCompare**

La nube de puntos en formato .LAS fue importada al software CloudCompare para su georreferenciación mediante los puntos de control GNSS (Figura 34). El ajuste se realizó utilizando la herramienta *Tools > Registration > Align (Point Pairs Picking)*, que permite alinear la nube de puntos a coordenadas reales de Este, Norte y Elevación (X, Y, Z). El procedimiento consistió en

identificar manualmente dentro de la nube los tres puntos estratégicos levantados con GNSS y digitar sus coordenadas de referencia correspondientes.

Los parámetros del proceso de alineación se configuraron manteniendo la rotación en el eje Z habilitada y la opción de autoescala desactivada. Como resultado del ajuste, el software generó el error cuadrático medio de georeferenciación (RMS), obteniendo un valor de $RMS = 0.33$ m, equivalente a una precisión aproximada de 33 centímetros. Este valor se considera aceptable para aplicaciones de modelado y representación general del entorno, teniendo en cuenta que el levantamiento SLAM fue realizado principalmente en interiores y sin amarre geodésico directo durante la captura. Para trabajos que requieran mayor precisión topográfica, se recomienda incrementar la cantidad y distribución de los puntos de control GNSS.

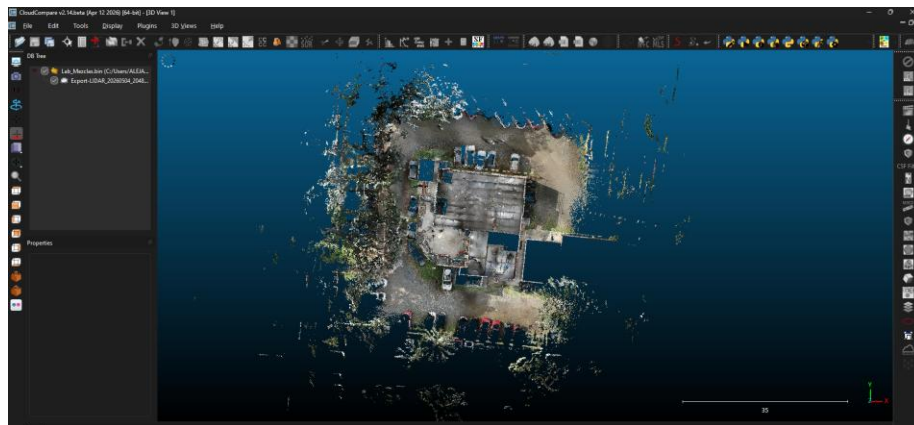


Figura 34. Nube de puntos georeferenciada en CloudCompare Fuente: Elaboración Propia.

- **Filtrado y limpieza de la nube de puntos en CloudCompare**

Una vez georeferenciada la nube de puntos, se realizó un proceso de filtrado para eliminar elementos no estructurales y preparar el modelo. El procedimiento de filtrado comprendió las siguientes etapas:

Segmentación del techo. Utilizando la herramienta *Edit > Segment*, se delimitó manualmente el contorno del techo mediante la selección de puntos alrededor del área utilizando un polígono, teniendo el modelo en vista frontal, ejecutando posteriormente la opción *Segment Out* para separarlo del resto del modelo y así poder ir al interior del modelo.

Eliminación de elementos internos no estructurales: Con la misma herramienta de segmentación se procedió a identificar y eliminar mesas, equipos de laboratorio, mobiliario y demás objetos temporales presentes en el interior de la edificación, esto se identificará en la vista en planta. Cada proceso de segmentación generó dos nubes independientes, conservando únicamente las correspondientes a los elementos de interés estructural.

Eliminación de puntos fuera del nivel del suelo: Desde una vista frontal se realizó una nueva segmentación para eliminar residuos de objetos, ruido flotante y elementos elevados no deseados, se seleccionan quedando el piso y los objetos a eliminar, quedando así el nivel o suelo filtrado solo con los puntos que se requieren como se observa en las Figuras 35 y 36.

a)



b)

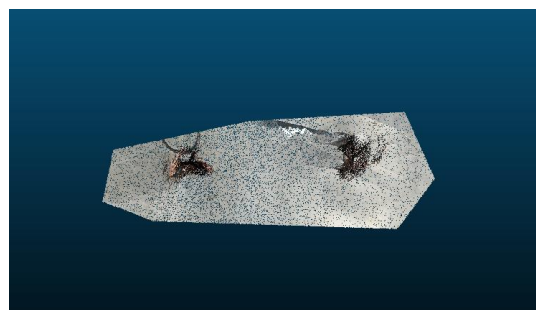


Figura 35. a) Nube de puntos a filtrar, y b) Selección de segmento a filtrar. Fuente: elaboración propia

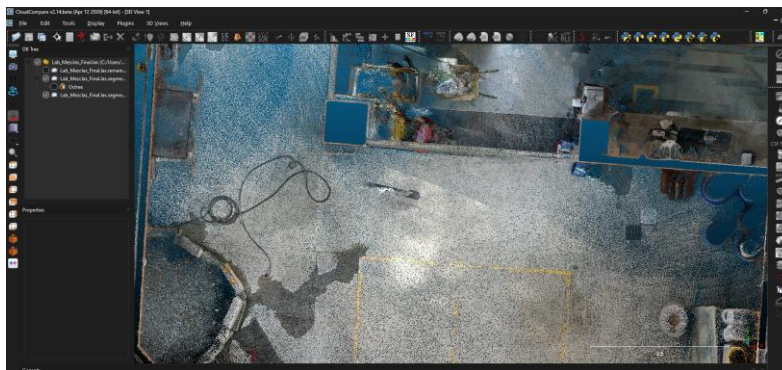


Figura 36. Segmento de Nube de Puntos Filtrada. Fuente: elaboración propia.

Fusión y exportación de la nube filtrada: Una vez concluido el proceso de filtrado, todas las nubes de puntos resultantes fueron seleccionadas y unificadas mediante la herramienta *Edit > Merge*, generando una nube consolidada. Para conservar la colorimetría original del modelo se rechazó la creación de un nuevo campo escalar durante la fusión. Finalmente, la nube filtrada fue exportada en formato .LAS para su posterior uso en Autodesk Revit o demás softwares del entorno BIM.

3. 3. 2. Modelado a partir de la Nube de Puntos SLAM en Autodesk Revit

Una vez obtenida la nube de puntos procesada y filtrada del levantamiento SLAM exportada en formato .LAS según el procedimiento descrito en la sección 6.3.1. se procedió a su integración en Autodesk Revit para la construcción del modelo BIM del Laboratorio de Mezclas. El proceso se desarrolló en dos fases: la preparación del archivo en Autodesk ReCap Pro y el modelado paramétrico en Revit.

El archivo .LAS fue importado en Autodesk ReCap Pro para la creación de un proyecto de nube de puntos en formato .RCP, que es el formato compatible con Autodesk Revit. En ReCap Pro se realizó una verificación visual de la nube para confirmar su integridad geométrica. Se creó un

nuevo proyecto en Autodesk Revit utilizando la plantilla métrica de arquitectura. La nube de puntos en formato .RCP fue insertada mediante la opción *Insertar > Nube de puntos*, vinculándola al proyecto y estableciendo el origen del modelo como punto de referencia. Una vez insertada, la nube quedó disponible como referencia visual permanente en todas las vistas del proyecto plantas, alzados y secciones sobre la que se construyó el modelo paramétrico.

El primer paso del modelado consistió en establecer los cuatro niveles que corresponden a las distintas alturas estructurales del laboratorio, identificadas a partir de la inspección visual de la nube de puntos en las vistas de alzado.

- **Nivel 0 (cota -0,45 m):** cota del descenso existente en la zona central del laboratorio, que corresponde a un área del piso a una cota inferior respecto al nivel principal
- **Nivel 1 (cota $\pm 0,00$ m):** nivel del piso principal del laboratorio, tomado como referencia base del proyecto.
- **Nivel 2 (cota 2,94 m):** cota superior de los muros de menor altura, presentes en la zona de transición entre los dos tramos de muro del edificio.
- **Nivel 3 (cota 3,70 m):** cota superior de los muros de mayor altura, correspondiente al borde superior de la envolvente del laboratorio en su parte más elevada.

La definición precisa de cada cota se realizó midiendo directamente sobre la nube de puntos en las vistas de alzado de Revit, utilizando la herramienta de medición del software para extraer las alturas reales de los elementos capturados durante el levantamiento, como se observa en la Figura 37.

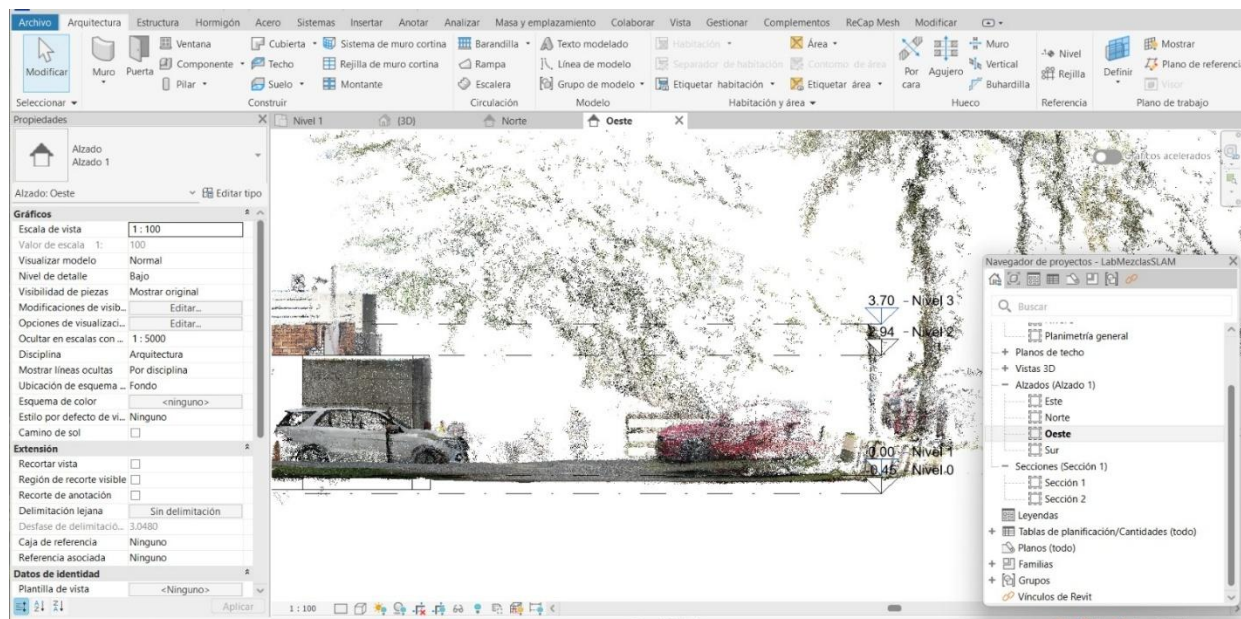


Figura 37. Niveles definidos en la nube de puntos SLAM. Fuente: elaboración propia.

Con los niveles establecidos, se procedió al modelado de los muros desde la vista en planta del Nivel 1, trazando su posición horizontal sobre el contorno de la nube de puntos. Las longitudes y los espesores de cada muro fueron determinados mediante medición directa sobre la nube de puntos utilizando la herramienta de acotación de Revit, que permite tomar distancias reales entre puntos seleccionados de la nube. Las alturas de cada segmento de muro fueron asignadas con referencia a los niveles previamente definidos Nivel 1 a Nivel 3 para los muros más altos, y Nivel 1 a Nivel 2 para los muros de menor altura, verificando visualmente la correspondencia en las vistas de alzado, además de esto es importante recalcar que los materiales elegidos también se colocaron según la colorimetría que nos daba la nube de puntos, para los muros de Nivel 1 a 2 se tomó concreto y para los muros de Nivel 1 a 3 se tomó ladrillo a la vista. Cada muro fue modelado con su espesor real medido de la nube (Figura 38), respetando las irregularidades geométricas propias de la edificación existente, los muros modelados se pueden observar en la Figura 39.

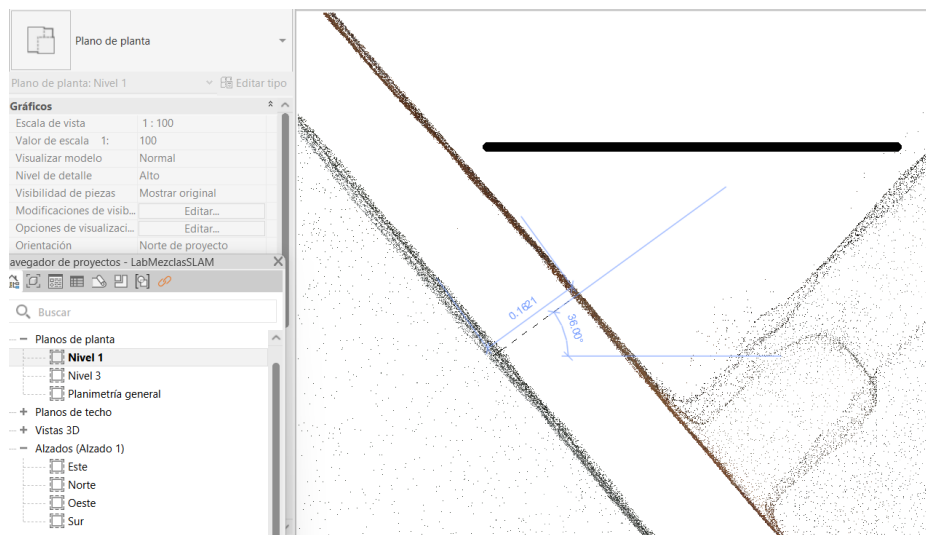


Figura 38. Espesor de muros nivel 2 externos medidos en nube de puntos SLAM. Fuente: elaboración propia.



Figura 39. Dibujo de muros a diferente nivel con base en la nube de puntos SLAM. Fuente: elaboración propia.

Una vez completados los muros, se procedió al modelado de los elementos de piso. Se definió un piso en el Nivel 1 cubriendo la planta principal del laboratorio, y un segundo piso en el Nivel 0 correspondiente al área deprimida central. Los contornos de cada piso fueron trazados sobre la planta de Revit siguiendo el perímetro interior de los muros, verificando el ajuste con la nube de puntos, así como el dibujado de una rampa pequeña que hay para descender del Nivel 1 al 0, los

parámetros de la rampa longitud, ancho y pendiente fueron extraídos por medición directa sobre la nube de puntos en la vista de sección correspondiente.

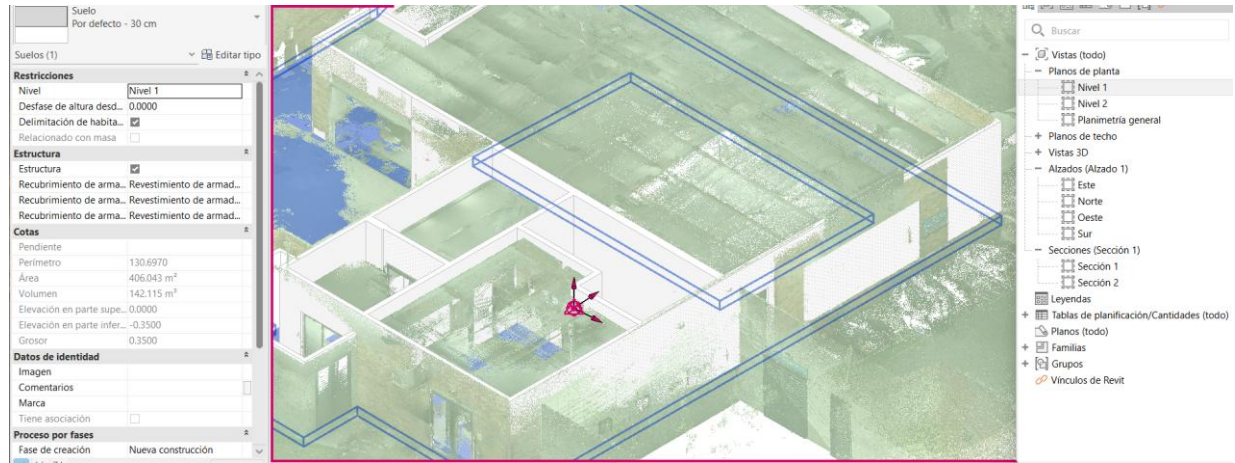


Figura 40. Suelo Nivel 1 dibujado. Fuente: elaboración propia.

En la fase final del modelado se abordaron los distintos tipos de espacios presentes en el laboratorio, adoptando una estrategia diferenciada según las características de cada elemento. Los vanos correspondientes a puertas con ventana incorporada fueron modelados mediante la herramienta de muro cortina de Revit, que permite representar con fidelidad la combinación de perfiles y paneles de vidrio característica de este tipo de elemento. Las dimensiones ancho, alto y posición en el muro fueron extraídas por medición directa sobre la nube de puntos en las vistas de planta y alzado correspondientes. Los pasadizos entre espacios aberturas en los muros fueron resueltos mediante la edición del perfil del muro (*Editar perfil*), herramienta que permite modificar el contorno de un muro existente para generar la apertura en la posición y con las dimensiones exactas registradas en la nube de puntos, sin necesidad de interrumpir o reemplazar el elemento de muro. Este procedimiento respetó la continuidad estructural del muro en el modelo y reflejó con mayor fidelidad la condición real de la edificación.



Figura 41. Espacios y puertas en los muros desde la nube de puntos SLAM. Fuente: elaboración propia.

3. 3. 3. **Reconstrucción Tridimensional Mediante Fotogrametría con Cámara 360°**

El levantamiento fotogramétrico del Laboratorio de Mezclas mediante cámara 360° se realizó utilizando una cámara Insta360 X3, con el objetivo de generar un modelo tridimensional de los espacios interiores a partir de imágenes esféricas. La metodología implementada se estructuró en tres fases: captura de datos en campo, preprocesamiento y exportación, y procesamiento fotogramétrico para la generación de la nube de puntos y la malla tridimensional.

Etapa I: Captura de datos en campo

La precisión geométrica y la estabilidad del modelo tridimensional dependen directamente de la calidad, redundancia y distribución espacial de las capturas realizadas en campo; por esta razón, la etapa de adquisición constituye el componente más crítico del flujo de trabajo fotogramétrico, por lo que hay que prestarle gran atención.

- **Montaje y configuración del equipo de captura**

Para la adquisición de las imágenes se utilizó una cámara Insta360 X3 montada sobre un bastón de soporte vertical, el cual fue estabilizado mediante un cono de señalización vial ubicado en el piso del laboratorio, como se observa en la Figura 42. Este sistema de montaje permitió posicionar la cámara a una altura fija aproximada de 1.23 m sobre el nivel del suelo, garantizando su verticalidad y estabilidad durante cada toma sin necesidad de un operador sosteniendo el equipo. La disposición del bastón dentro del cono aseguró que la cámara quedara alejada de superficies cercanas y libre de obstrucciones en todas las direcciones, condición fundamental para obtener imágenes esféricas completas con el mínimo de oclusiones. Una vez posicionado el equipo en cada punto de captura, se activó el disparador remoto desde el dispositivo conectado para evitar vibraciones durante la toma, y se desplazó el conjunto al siguiente punto de captura manteniendo el criterio de solapamiento establecido, los puntos elegidos fueron de manera visual para que se realizaran tomas donde alcanzara gran rango de puntos.



Figura 42. Montaje de la cámara Insta360 X3 sobre bastón y cono de señalización. Fuente: elaboración propia.

- **Solapamiento y redundancia geométrica**

El proceso de reconstrucción tridimensional mediante fotogrametría se fundamenta en la identificación automática de puntos homólogos entre imágenes consecutivas. Para garantizar la correcta triangulación espacial, se requiere un solapamiento mínimo del 70 al 80% entre capturas adyacentes. En entornos interiores, donde existen cambios bruscos de perspectiva y oclusiones frecuentes, se incrementó la densidad de captura, dado que la redundancia fotográfica permite mejorar la detección de características visuales (features), reducir errores de alineación, aumentar la estabilidad de la nube de puntos, minimizar deformaciones en superficies complejas y optimizar la reconstrucción de profundidad mediante mapas DepthMap.

Se estableció como criterio mínimo entre 30 y 50 capturas esféricas para recintos pequeños, incrementando la densidad en zonas con geometría compleja, maquinaria, mobiliario técnico o cambios de iluminación. Durante las pruebas realizadas, una baja cantidad de imágenes produjo pérdida de continuidad espacial, generando errores en el mallado que impidieron completar las superficies.

- **Condiciones de iluminación**

La iluminación se mantuvo lo más uniforme posible durante toda la adquisición. Las superficies reflectantes, transparentes o altamente brillantes generan inconsistencias en la detección de rasgos visuales y producen artefactos en la nube de puntos, por lo que se evitaron reflejos especulares, sombras intensas y objetos en movimiento durante la captura, se realizaron las tomas en un lugar iluminado ya que la poca luz también puede generar inconsistencias.

Etapla II: Preprocesamiento y exportación de datos

Las capturas obtenidas mediante la cámara Insta360 X3 se sometieron a un proceso de conversión y normalización para garantizar compatibilidad con los algoritmos de reconstrucción tridimensional.

- **Exportación en Insta360 Studio**

Las imágenes se exportaron mediante el software Insta360 Studio bajo los siguientes criterios:

- Proyección: Equirrectangular
- Resolución: Máxima posible (11968 × 5984 px)
- Formato de salida: JPG
- Compresión: Mínima

La proyección equirrectangular permite consolidar la información esférica de 360° en una única imagen panorámica interpretable por el software fotogramétrico, los parámetros se pueden observar en la Figura 43.

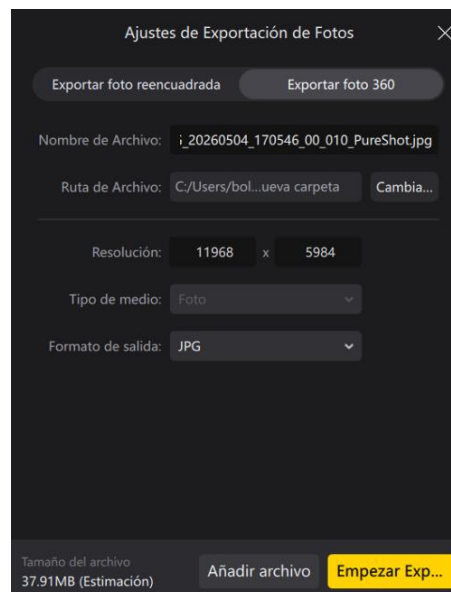


Figura 43. Configuración de exportación de imágenes en formato equirrectangular desde Insta360 Studio. Fuente: elaboración propia.

- **Consideraciones sobre imágenes 360°**

Las imágenes equirectangulares presentan distorsiones geométricas inherentes a la proyección esférica, particularmente en las regiones polares. Estas deformaciones pueden afectar negativamente la detección de características visuales en los algoritmos fotogramétricos tradicionales. Por esta razón, se consideró la posibilidad de convertir las imágenes al formato Cubemap, generando seis vistas planas equivalentes a las de una cámara convencional, lo cual mejora significativamente el matching de puntos y la alineación fotográfica, y podría mejorar la reconstrucción de profundidad y la estabilidad del mallado.

Etapa III: Procesamiento fotogramétrico

Para visualizar y exportar estas imágenes en un formato compatible con el software fotogramétrico fue necesario descargar e instalar la aplicación de escritorio Insta360 Studio en el computador, en Insta360 Studio se cargaron todas las imágenes de la sesión de captura, lo que permitió verificar la cobertura del levantamiento, igual que estuvieran a color y revisar la calidad individual de cada toma antes de proceder a la exportación como se observa en la Figura 44.

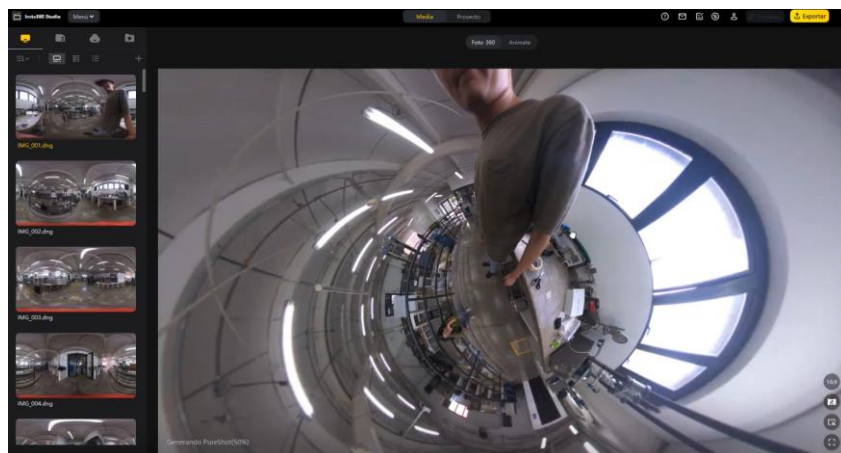


Figura 44. Verificación imágenes en Insta360 Studio. Fuente: elaboración propia.

Después de esto sigue la exportación de las imágenes en formato JPG que era compatible con el software de procesamiento más adelante utilizado. La proyección equirectangular permite

consolidar la información esférica de 360° en una única imagen panorámica plana interpretable por el software fotogramétrico. Las imágenes resultantes quedaron almacenadas en la carpeta local del computador, constituyendo el insumo de entrada para la siguiente fase de procesamiento.

Las imágenes exportadas en formato JPG fueron procesadas en Agisoft Metashape Professional, software fotogramétrico con soporte para cámaras esféricas y proyecciones equirectangulares, empleado bajo licencia de prueba gratuita de 30 días. El flujo de trabajo ejecutado comprendió las siguientes operaciones, ejecutadas en el orden indicado: las imágenes fueron importadas, configurando el tipo de cámara como Single Camera para que el software reconociera correctamente la proyección equirectangular de las capturas. A continuación, se ejecutó la alineación de imágenes, proceso en el que el algoritmo detecta automáticamente puntos homólogos entre capturas y calcula la posición y orientación de cada cámara en el espacio como se observa en la Figura 45.

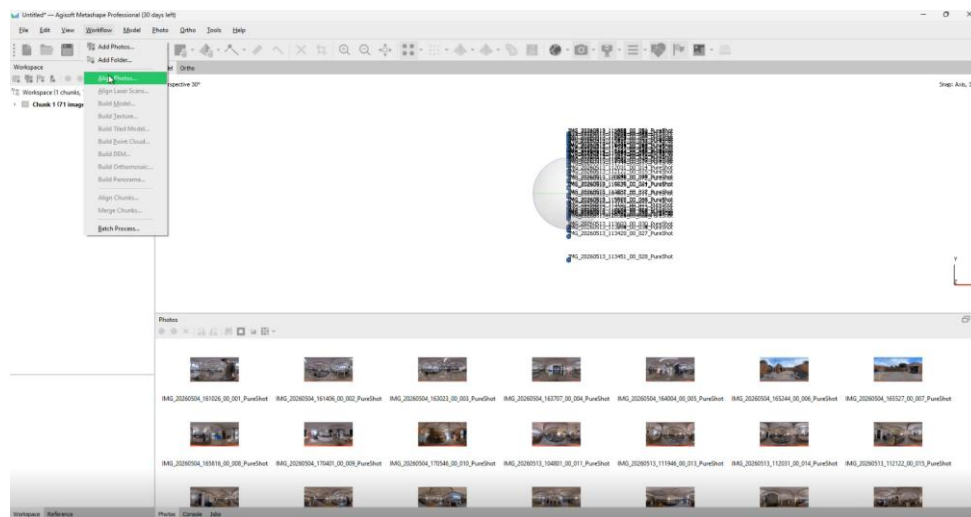


Figura 45. Creación de modelo mediante cámara 360. Fuente: elaboración propia.

Una vez completada la alineación, se generó el modelo tridimensional mediante *Workflow* → *Build Model*, seguido de la construcción de la textura mediante *Workflow* → *Build Texture* con un tamaño de 16.384 píxeles, seleccionado para maximizar la calidad visual del modelo sin comprometer la estabilidad del procesamiento, como se observa en la Figura 46.

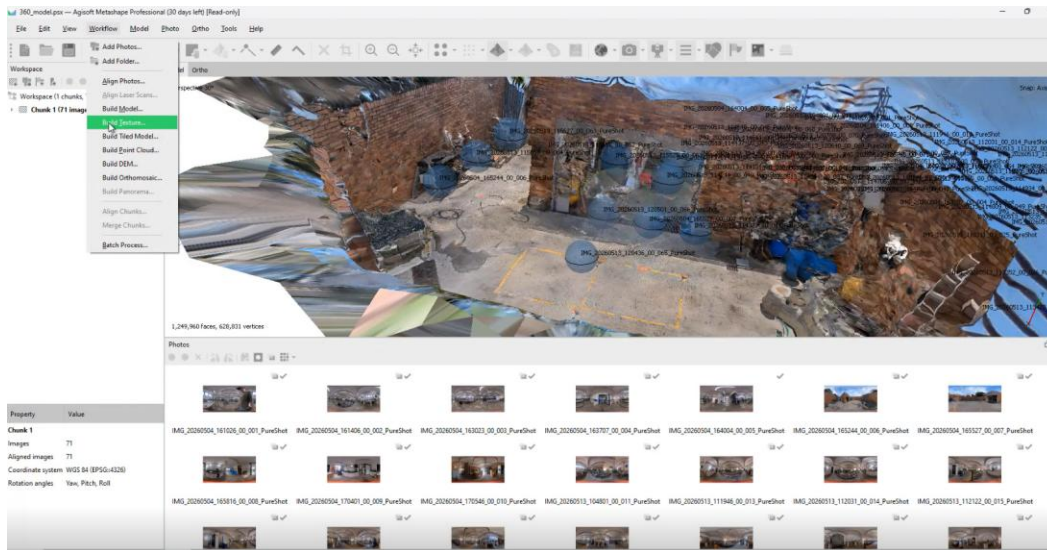


Figura 46. Modelo generado en Metashape cámara 360. Fuente: elaboración propia.

El resultado fue un modelo tridimensional texturizado exportado en formato .OBJ, que conserva tanto la geometría del espacio como la información de color de las superficies capturadas. Se tomó la decisión de exportar el modelo como malla texturizada en lugar de nube de puntos directamente desde Metashape, dado que la nube de puntos generada por el algoritmo fotogramétrico presentaba una densidad muy baja que no permitía distinguir los elementos del espacio con la claridad necesaria para el modelado.

Durante el procesamiento se identificaron dos limitaciones relevantes. La primera fue la aparición en el modelo de los conos de señalización empleados como soporte de la cámara, que el algoritmo reconoció como superficies sólidas y los integró en la geometría del modelo. La segunda

fue una orientación rotada del modelo respecto al sistema de coordenadas de referencia, que debió ser corregida durante la fase de georreferenciación. Adicionalmente, algunas zonas del modelo presentaron distorsión geométrica en las superficies.

El modelo .OBJ exportado desde Metashape fue importado en CloudCompare para su limpieza, georreferenciación y conversión a nube de puntos (Figura 47). En la fase de limpieza se eliminaron manualmente las superficies no pertenecientes a la edificación, como el cielo y elementos externos.

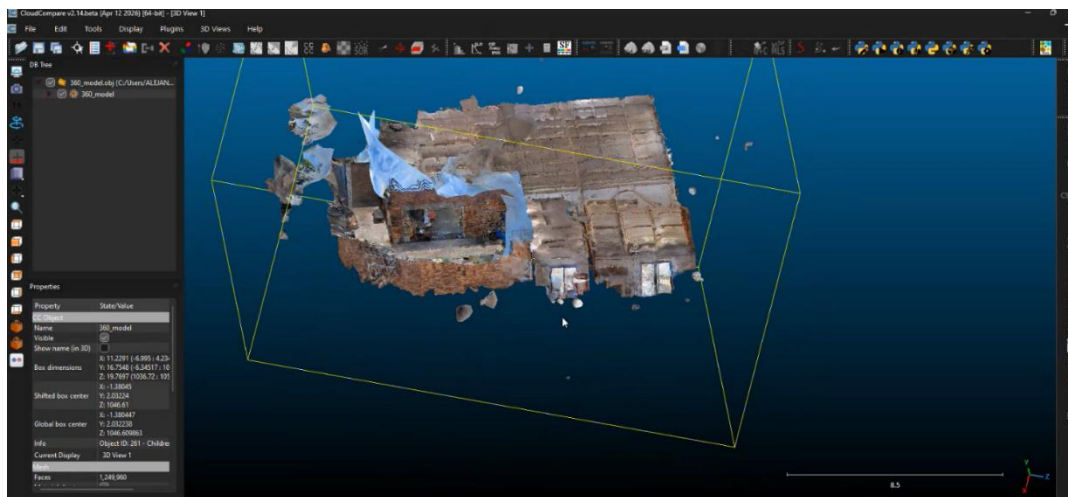


Figura 47. Modelo en Cloud Compare. Fuente: elaboración propia.

Para el ajuste y la georreferenciación del modelo se realizó utilizando la herramienta *Tools > Registration > Align (Point Pairs Picking)*, que permite alinear el modelo a coordenadas reales de Este, Norte y Elevación (X, Y, Z). El procedimiento consistió en identificar manualmente dentro de la nube los tres puntos estratégicos levantados con GNSS y digitar sus coordenadas de referencia correspondientes, como se explicó en los modelos anteriores como se observa en la Figura 49.

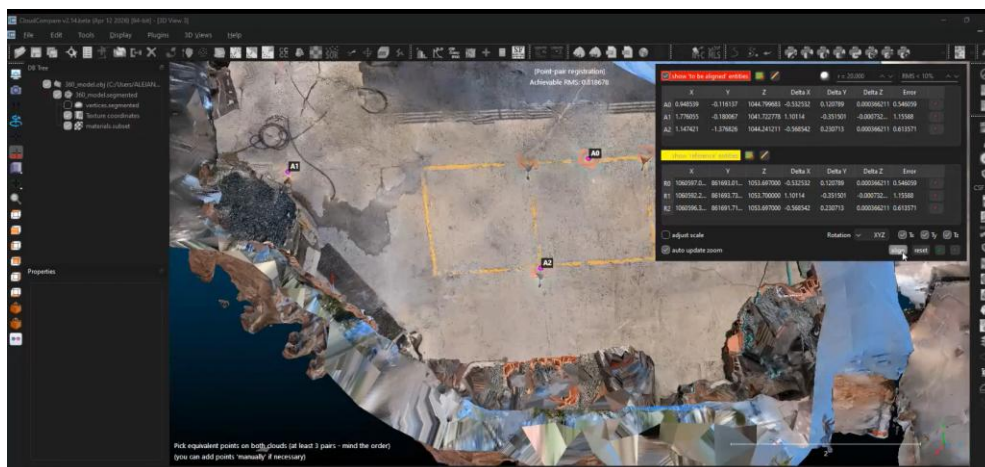


Figura 48. Georreferenciación modelo cámara 360. Fuente: elaboración propia.

El error cuadrático medio (RMS) obtenido en la georreferenciación fue de 0,81 m, valor significativamente superior al obtenido con el SLAM LiDAR, lo que refleja las limitaciones de precisión geométrica del modelo fotogramétrico con Cámara 360°, esto se puede deber a que no se tomaron puntos de georreferenciación en cada punto de toma de las fotografías. Finalmente, la malla limpia y georreferenciada fue convertida a nube de puntos mediante la herramienta *Edit* → *Mesh* → *Sample Points*, generando 10.000.000 de puntos distribuidos sobre la superficie del modelo. La nube de puntos resultante fue exportada en formato .LAS para su posterior importación en Autodesk ReCap Pro.

3. 3. 4. Modelado a partir de la Nube de Puntos Cámara 360 en Autodesk Revit

Una vez obtenida la nube de puntos procesada y filtrada del levantamiento con Cámara 360 exportada en formato .LAS se procedió a su integración en Autodesk Revit para la construcción del modelo BIM del Laboratorio de Mezclas. El proceso se desarrolló en dos fases: la preparación del archivo en Autodesk ReCap Pro y el modelado paramétrico en Revit.

El archivo .LAS fue importado en Autodesk ReCap Pro para la creación de un proyecto de nube de puntos en formato .RCP, que es el formato compatible con Autodesk Revit. En ReCap Pro se realizó una verificación visual de la nube para confirmar su integridad geométrica como se observa en la Figura 49.

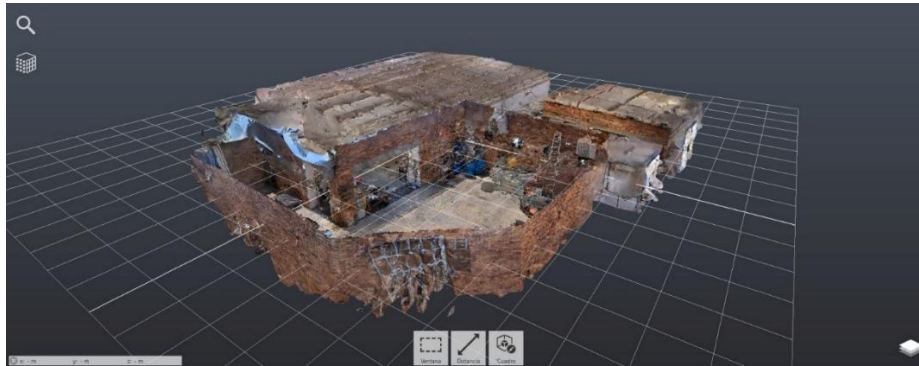


Figura 49. Nube de puntos cámara 360° visualización RecapPro. Fuente: elaboración propia.

Se creó un nuevo proyecto en Autodesk Revit utilizando la plantilla métrica de arquitectura. La nube de puntos en formato .RCP fue insertada, vinculándola al proyecto y estableciendo el origen del modelo como punto de referencia. El primer paso del modelado consistió en establecer los cuatro niveles que corresponden a las distintas alturas estructurales del laboratorio, identificadas a partir de la inspección visual de la nube de puntos en las vistas de alzado como se observa en la Figura 50:

- **Nivel 0 (cota -0,27 m):** cota del descenso existente en la zona central del laboratorio, que corresponde a un área del piso a una cota inferior respecto al nivel principal
- **Nivel 1 (cota $\pm 0,00$ m):** nivel del piso principal del laboratorio, tomado como referencia base del proyecto.

- **Nivel 2 (cota 2,0 m):** cota superior de los muros de menor altura, presentes en la zona de transición entre los dos tramos de muro del edificio.
- **Nivel 3 (cota 2,31 m):** cota superior de los muros de mayor altura, correspondiente al borde superior de la envolvente del laboratorio en su parte más elevada.

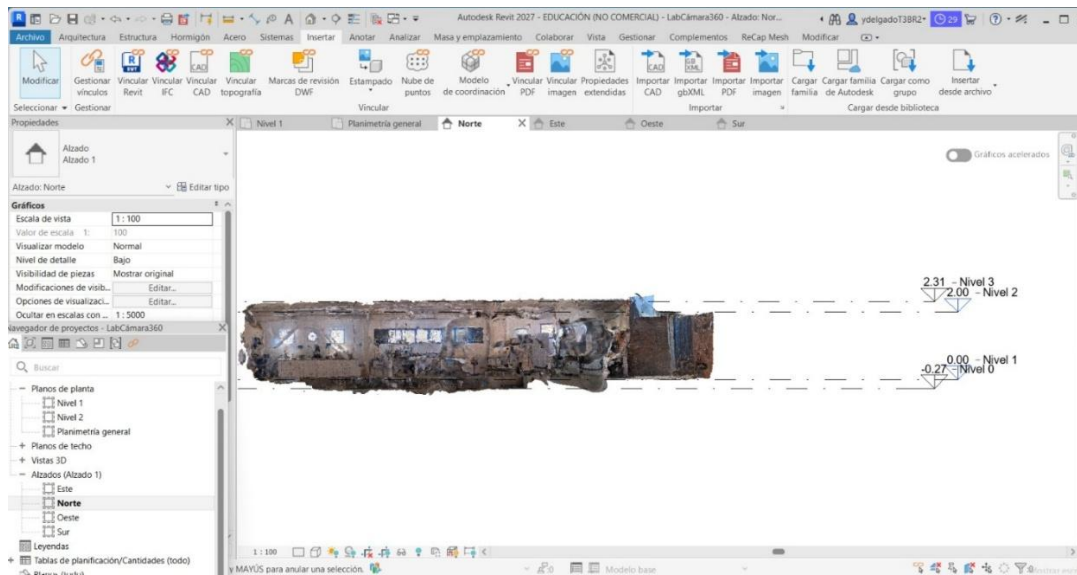


Figura 50. Niveles definidos en la nube de puntos Cámara 360°. Fuente: elaboración propia.

Con los niveles establecidos, se procedió al modelado de los muros desde la vista en planta del Nivel 1, trazando su posición horizontal sobre el contorno de la nube de puntos. Las longitudes y los espesores de cada muro fueron determinados mediante medición directa sobre la nube de puntos utilizando la herramienta de acotación, que en este caso fueron muy pocos los visibles y en ellos se hizo la medición (Figura 51). Las alturas de cada segmento de muro fueron asignadas con referencia a los niveles previamente definidos Nivel 1 a Nivel 3 para los muros más altos, y Nivel 1 a Nivel 2 para los muros de menor altura, verificando visualmente la correspondencia en las vistas de alzado, además de esto es importante recalcar que los materiales elegidos también se

colocaron según la colorimetría que nos daba la nube de puntos en este caso solo los visibles debido a que las fotografías fueron tomadas desde el interior del laboratorio, por lo cual el material externo no se mira, por ello se colocó concreto convencional y para los muros que si era visible se colocó ladrillo, como se puede observar en la Figura 52.

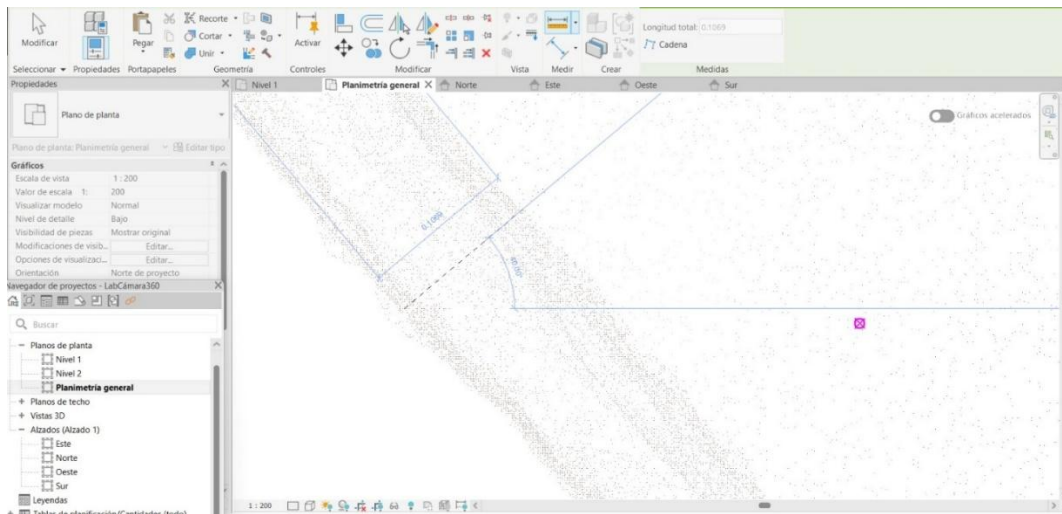


Figura 51. Espesor de muros nivel 2 externos medidos en nube de puntos Cámara 360°. Fuente: elaboración propia.

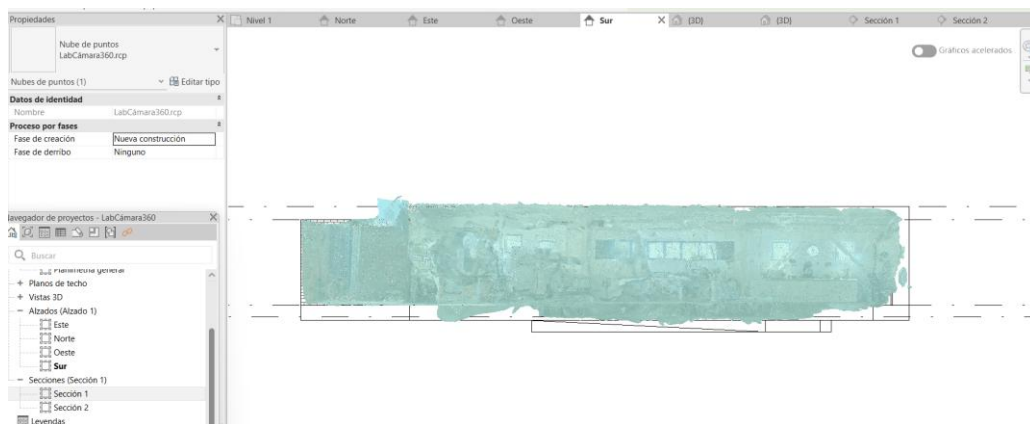


Figura 52. Dibujo de muros a diferente nivel con base en la nube de puntos Cámara 360°. Fuente: elaboración propia.

Una vez completados los muros, se procedió al modelado de los elementos de piso. Se definió un piso en el Nivel 1 cubriendo la planta principal del laboratorio, y un segundo piso en el Nivel 0

correspondiente al área deprimida central. Los contornos de cada piso fueron trazados sobre la planta de Revit siguiendo el perímetro interior de los muros, verificando el ajuste con la nube de puntos, así como el dibujado de una rampa pequeña que hay para descender del Nivel 1 al 0, los parámetros de la rampa longitud, ancho y pendiente fueron extraídos por medición directa sobre la nube de puntos en la vista de sección correspondiente como se observa en la Figura 53.

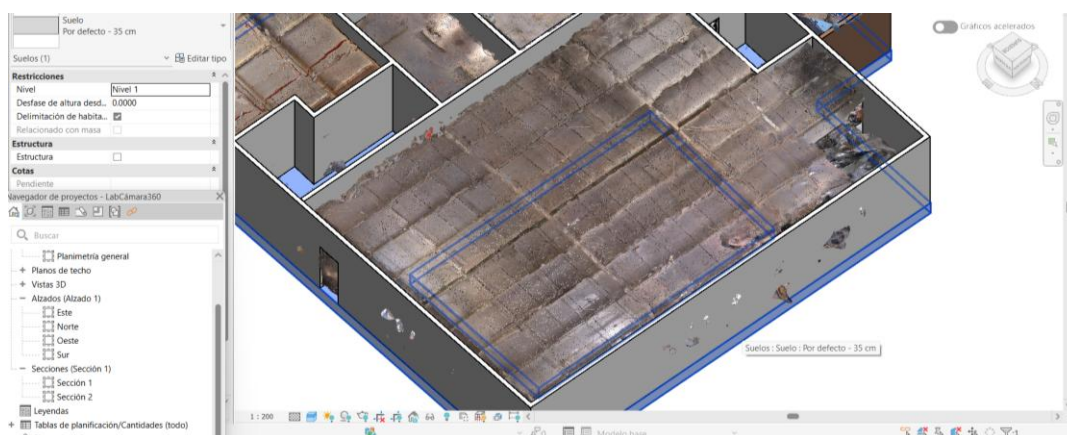


Figura 53. Suelo Nivel 1 dibujado Modelo Cámara 360°. Fuente: elaboración propia.

En la fase final del modelado se abordaron los distintos tipos de espacios presentes en el laboratorio, adoptando una estrategia diferenciada según las características de cada elemento. Los vanos correspondientes a puertas con ventana incorporada fueron modelados mediante la herramienta de muro cortina de Revit, que permite representar con fidelidad la combinación de perfiles y paneles de vidrio característica de este tipo de elemento. Las dimensiones ancho, alto y posición en el muro fueron extraídas por medición directa sobre la nube de puntos en las vistas de planta y alzado correspondientes (Figura 54). Los pasadizos entre espacios aberturas en los muros fueron resueltos mediante la edición del perfil del muro, sin necesidad de interrumpir o reemplazar

el elemento de muro. Este procedimiento respetó la continuidad estructural del muro en el modelo y reflejó con mayor fidelidad la condición real de la edificación.



Figura 54. Espacios y puertas en los muros desde la nube de puntos Cámara 360°. Fuente: elaboración propia.

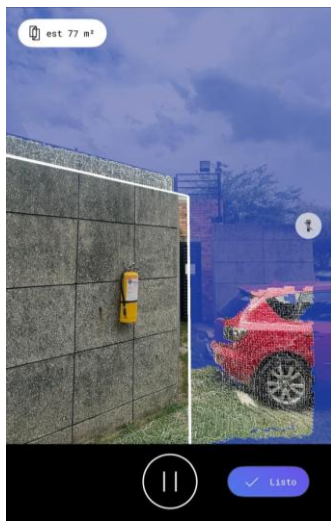
3. 3. 5. Levantamiento Mediante Escáner LiDAR Integrado en Dispositivo iPhone

El levantamiento del Laboratorio de Mezclas mediante el sensor LiDAR integrado en un dispositivo iPhone 16 Pro se realizó con el objetivo de evaluar las capacidades y limitaciones de esta tecnología de bajo costo para la generación de nubes de puntos aplicables a la documentación de edificaciones. Esta técnica aprovecha el sensor LiDAR disponible en los modelos iPhone 12 Pro o superiores, el levantamiento se realizó utilizando la aplicación Polycam, que utiliza el sensor de tiempo de vuelo (ToF) del dispositivo para capturar la geometría del espacio en tiempo real durante el recorrido. La metodología implementada se estructuró en dos fases: la adquisición de datos mediante el iPhone y el procesamiento de las nubes de puntos en CloudCompare para poder ser utilizada en entornos BIM como Revit.

Etapla I: Adquisición de datos con el sensor LiDAR del iPhone

El levantamiento se realizó efectuando un recorrido completo por los espacios del Laboratorio de Mezclas, tanto externos como internos buscando garantizar una cobertura completa del espacio como se observa en la Figura 55. Dado que el sensor LiDAR del iPhone opera mediante ToF, es capaz de capturar información de profundidad con gran rapidez y sin necesidad de procesamiento fotogramétrico posterior. Las condiciones de captura se basan principalmente en tener una buena iluminación, ir a una velocidad moderada ya que si se va muy rápido el equipo pierde señal, recorrer cada espacio para que alcance a tomar todos los puntos.

a)



b)

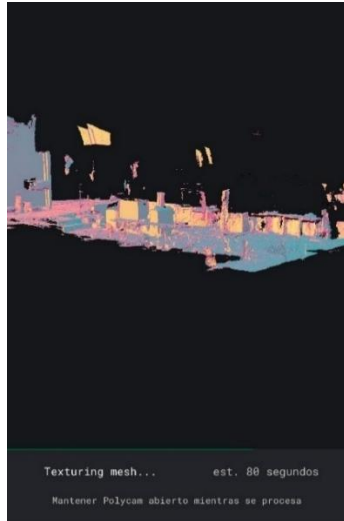


*Figura 55. Toma de datos con iPhone LiDAR; a) visualización Polycam, b) toma de datos en campo.
Fuente: elaboración propia.*

Una vez finalizada la toma de datos en campo la aplicación Polycam pide realizar un pre-procesamiento de los datos, la cual en este caso tardó aproximadamente 15 minutos, después de esto permite una visualización del levantamiento antes de su exportación, existen muchos formatos

de exportación, sin embargo, el único en versión gratuita es en .GLTF y es en el formato que se exporta para su posterior procesamiento en CloudCompare como se observa en las Figuras 56, 57.

a)



b)

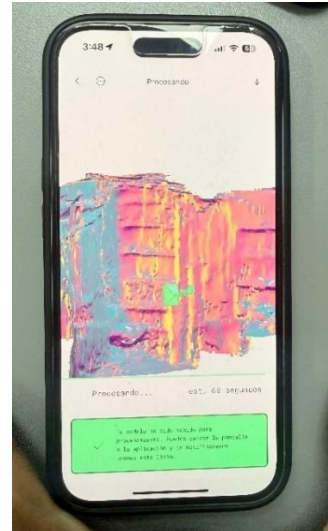


Figura 56. Pre-procesamiento en Polycam; a) Visualización antes de procesamiento, b) procesamiento del levantamiento. Fuente: elaboración propia.



Figura 57. Visualización después del procesamiento en Polycam. Fuente: elaboración propia.

Etapa II: Procesamiento de la nube de puntos en CloudCompare

Como resultado del escaneo se obtuvo un modelo tridimensional en formato .GLTF, correspondiente a una malla texturizada del espacio capturado. Este formato conserva la geometría del modelo y la información visual de color mediante textura proyectada sobre la superficie de la malla; sin embargo, el color no se encuentra almacenado como valores RGB por punto sino como una imagen proyectada, condición que requirió un procesamiento adicional para convertirlo en una nube de puntos utilizable en plataformas BIM.

El archivo .GLTF generado por Polycam fue abierto inicialmente en CloudCompare con el objetivo de realizar la conversión de textura a RGB y generar la nube de puntos directamente en esta plataforma. Sin embargo, al ejecutar el proceso de muestreo de puntos sobre la malla, la nube de puntos resultante se obtuvo en escala de grises sin información de color como se observa en la Figura 58, lo que dificultaba significativamente su uso como referencia para el modelado paramétrico posterior. Esta limitación evidenció la necesidad de incorporar un software intermedio capaz de gestionar correctamente la información de color del modelo antes de generar la nube de puntos.

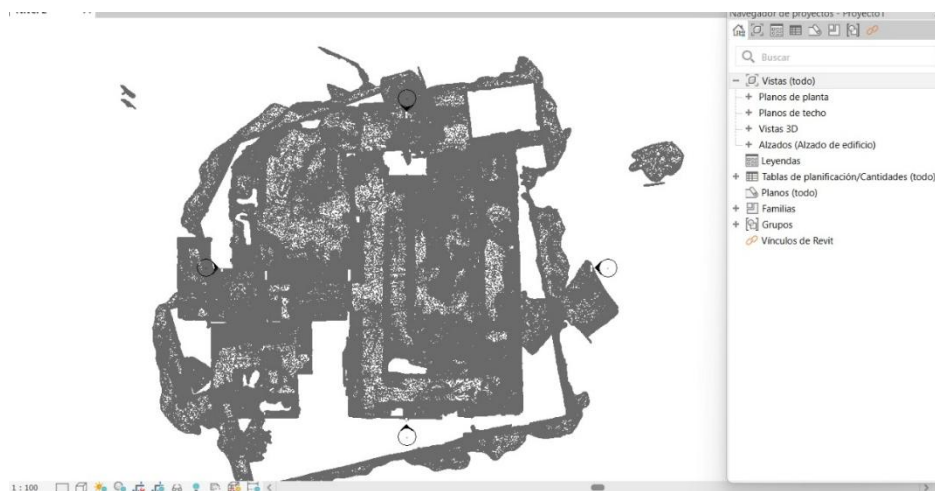


Figura 58. Visualización de nube de puntos iPhone sin color. Fuente: elaboración propia.

Para resolver la pérdida de color identificada en CloudCompare, se incorporó Blender como herramienta intermedia en el flujo de procesamiento. El archivo .GLTF fue importado en Blender, donde el modelo se cargó como una malla tridimensional conservando el color original capturado durante el levantamiento. Dentro de este entorno se realizó la conversión de la malla con color a una nube de puntos, proceso que permitió que cada punto generado heredara la información cromática de la superficie correspondiente. El resultado fue una nube de puntos con color real estructurada con coordenadas espaciales y atributos RGB por punto que conservaba la apariencia visual del espacio levantado y resultaba adecuada para su uso como referencia de modelado. La nube de puntos colorizada obtenida desde Blender fue importada en CloudCompare para su verificación geométrica, su georreferenciación, limpieza y exportación en formato .LAS, compatible con Autodesk ReCap Pro, la georreferencia se realizó con los puntos de control con GPS GNSS RTK South G7 y de la misma manera que se realizó con el levantamiento de SLAM como se observa en la Figura 59.

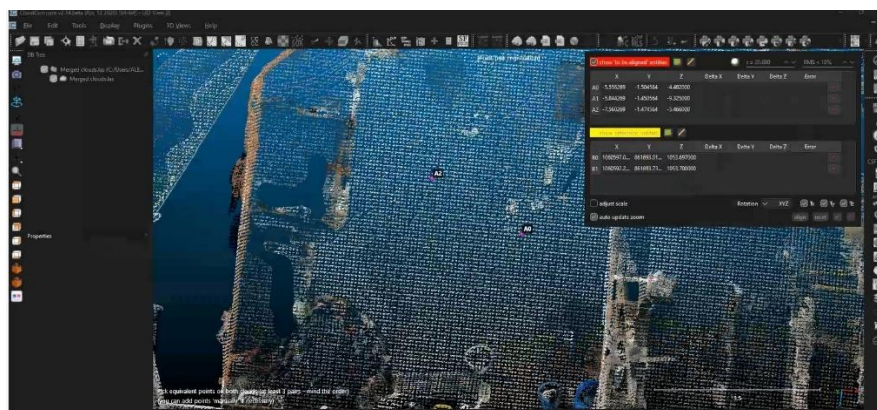


Figura 59. Georreferenciación de la nube de puntos de iPhone. Fuente: elaboración propia.

Durante la revisión de la nube de puntos se identificó que los datos correspondientes al exterior del laboratorio presentaban sobreposición de superficies producto de las múltiples pasadas del sensor en ese sector lo que resultó en geometría inconsistente y ruido excesivo que no permitía una

representación confiable de los elementos exteriores. En consecuencia, se tomó la decisión metodológica de limitar el modelado paramétrico en Revit a la volumetría interior del Laboratorio de Mezclas, donde la nube de puntos presentó la calidad geométrica necesaria para el trazado de muros, pisos y rampas.

3. 3. 6. *Modelado a partir de la Nube de Puntos iPhone en Autodesk Revit*

Una vez obtenida la nube de puntos procesada y exportada en formato .LAS se procedió a su integración en Autodesk Revit para la construcción del modelo BIM del Laboratorio de Mezclas. El proceso se desarrolló en dos fases: la preparación del archivo en Autodesk ReCap Pro y el modelado paramétrico en Revit.

El archivo .LAS fue importado en Autodesk ReCap Pro para la creación de un proyecto de nube de puntos en formato .RCP, que es el formato compatible con Autodesk Revit. En ReCap Pro se realizó una verificación visual de la nube para confirmar su integridad geométrica. Se creó un nuevo proyecto en Autodesk Revit utilizando la plantilla métrica de arquitectura. La nube de puntos en formato .RCP fue insertada mediante, vinculándola al proyecto y estableciendo el origen del modelo como punto de referencia. Una vez insertada, la nube quedó disponible como referencia visual permanente en todas las vistas del proyecto plantas, alzados y secciones sobre la que se construyó el modelo paramétrico como se observa en la Figura 60.

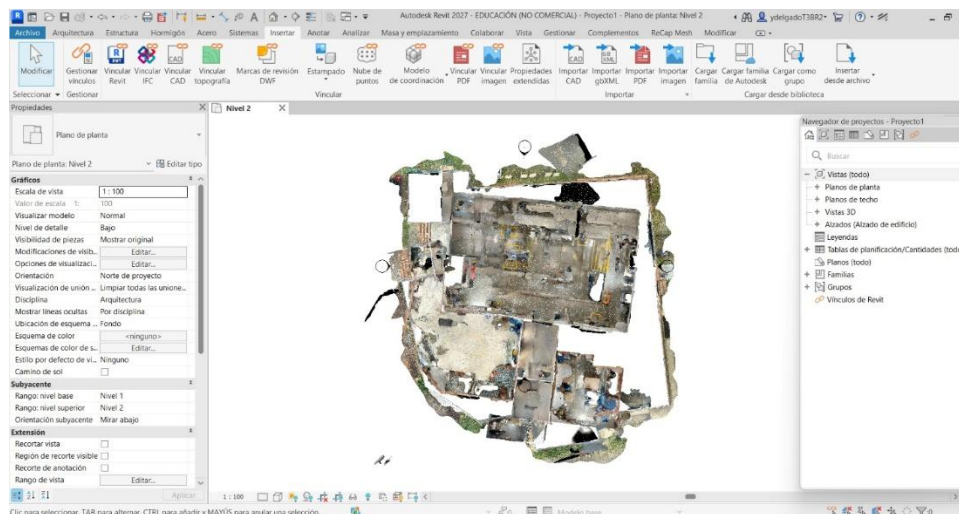


Figura 60. Nube de puntos iPhone en Revit. Fuente: elaboración propia.

El primer paso del modelado consistió en establecer los cuatro niveles que corresponden a las distintas alturas estructurales del laboratorio, identificadas a partir de la inspección visual de la nube de puntos en las vistas de alzado:

- **Nivel 0 (cota -0,40 m):** cota del descenso existente en la zona central del laboratorio, que corresponde a un área del piso a una cota inferior respecto al nivel principal
- **Nivel 1 (cota $\pm 0,00$ m):** nivel del piso principal del laboratorio, tomado como referencia base del proyecto.
- **Nivel 2 (cota 3,00 m):** cota superior de los muros de menor altura, presentes en la zona de transición entre los dos tramos de muro del edificio.
- **Nivel 3 (cota 4,00 m):** cota superior de los muros de mayor altura, correspondiente al borde superior de la envolvente del laboratorio en su parte más elevada.

La definición precisa de cada cota se realizó midiendo directamente sobre la nube de puntos en las vistas de alzado de Revit, utilizando la herramienta de medición del software para extraer las

alturas reales de los elementos capturados durante el levantamiento como se observa en la Figura 61.

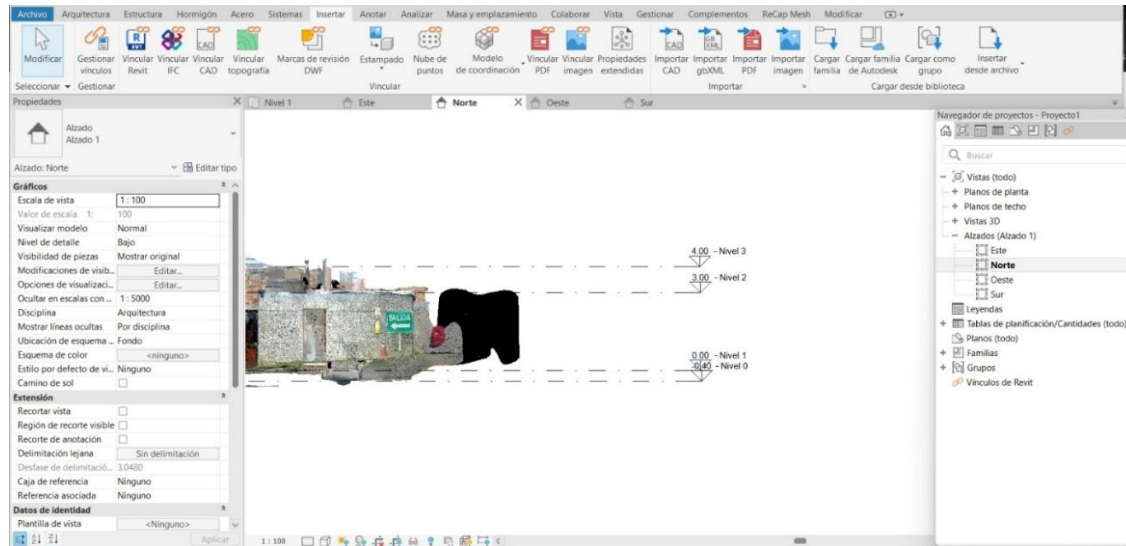


Figura 61. Niveles definidos en la nube de puntos iPhone. Fuente: elaboración propia.

Con los niveles establecidos, se procedió al modelado de los muros desde la vista en planta del Nivel 1, trazando su posición horizontal sobre el contorno de la nube de puntos. Las longitudes y los espesores de cada muro fueron determinados mediante medición directa sobre la nube de puntos utilizando la herramienta de acotación de Revit, que permite tomar distancias reales entre puntos seleccionados de la nube. Las alturas de cada segmento de muro fueron asignadas con referencia a los niveles previamente definidos Nivel 1 a Nivel 3 para los muros más altos que fueron los que finalmente se modelaron debido a que son los muros internos. Cada muro fue modelado con su espesor real medido de la nube (Figura 62), respetando las irregularidades geométricas propias de la edificación existente que se visualizara en la nube de puntos, además de esto es importante recalcar que los materiales elegidos también se colocaron según la colorimetría que nos daba la nube de puntos, para los muros de Nivel 1 a 2 se tomó concreto y para los muros de Nivel 1 a 3 se tomó ladrillo a la vista como se observa en la Figura 63.

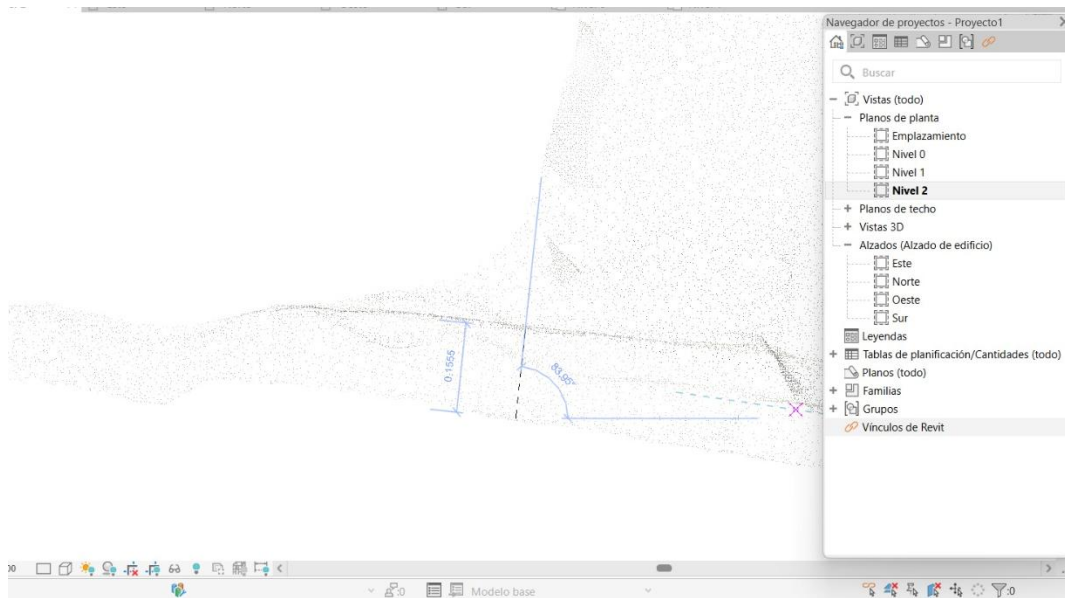


Figura 62. Medición espesor de muros en la nube iPhone. Fuente: elaboración propia.



Figura 63. Dibujo de muros internos con base en la nube de puntos iPhone. Fuente: elaboración propia.

Una vez completados los muros, se procedió al modelado de los elementos de piso. Se definió un piso en el Nivel 1 cubriendo la planta principal del laboratorio, y un segundo piso en el Nivel 0 correspondiente al área deprimida central. Los contornos de cada piso fueron trazados sobre la planta de Revit siguiendo el perímetro interior de los muros, verificando el ajuste con la nube de

puntos, así como el dibujado de una rampa pequeña que hay para descender del Nivel 1 al 0, los parámetros de la rampa longitud, ancho y pendiente fueron extraídos por medición directa sobre la nube de puntos en la vista de sección correspondiente como se observa en la Figura 64.

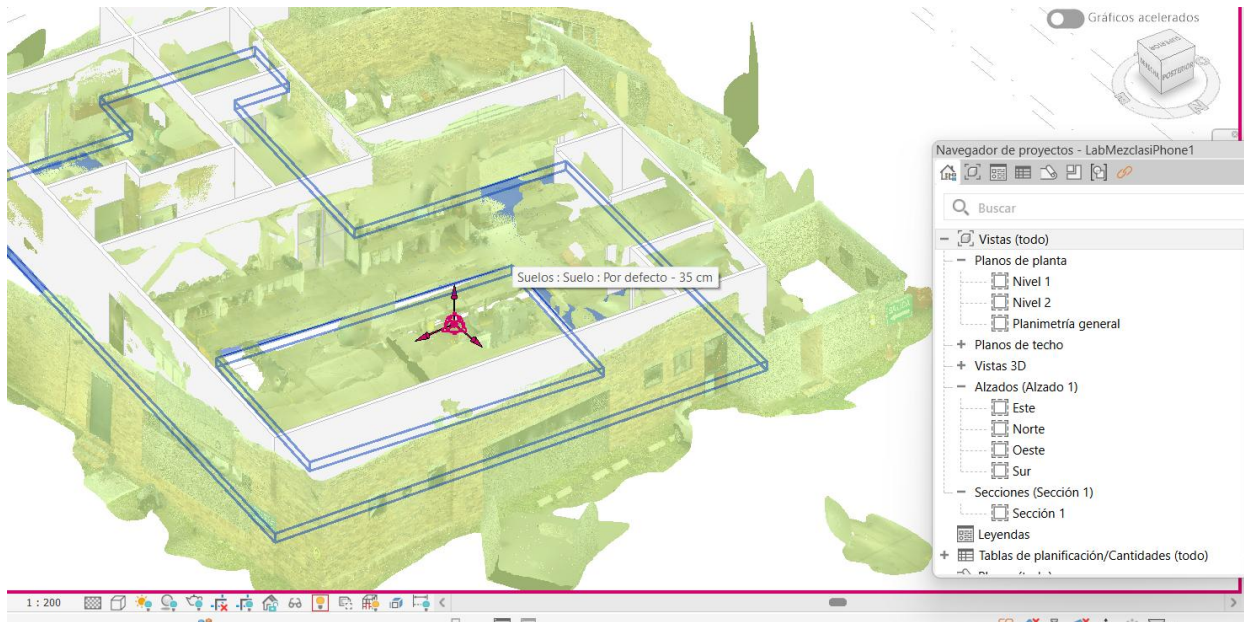


Figura 64. Suelo Nivel 1 dibujado. Fuente: elaboración propia.

En la fase final del modelado se abordaron los distintos tipos de espacios presentes en el laboratorio, adoptando una estrategia diferenciada según las características de cada elemento. Los vanos correspondientes a puertas con ventana incorporada fueron modelados mediante la herramienta de muro cortina de Revit, que permite representar con fidelidad la combinación de perfiles y paneles de vidrio característica de este tipo de elemento. Las dimensiones ancho, alto y posición en el muro fueron extraídas por medición directa sobre la nube de puntos en las vistas de planta y alzado correspondientes. Los pasadizos entre espacios aberturas en los muros fueron resueltos mediante la edición del perfil del muro. Este procedimiento respetó la continuidad estructural del muro en el modelo y reflejó con mayor fidelidad la condición real de la edificación como se observa en la Figura 65.

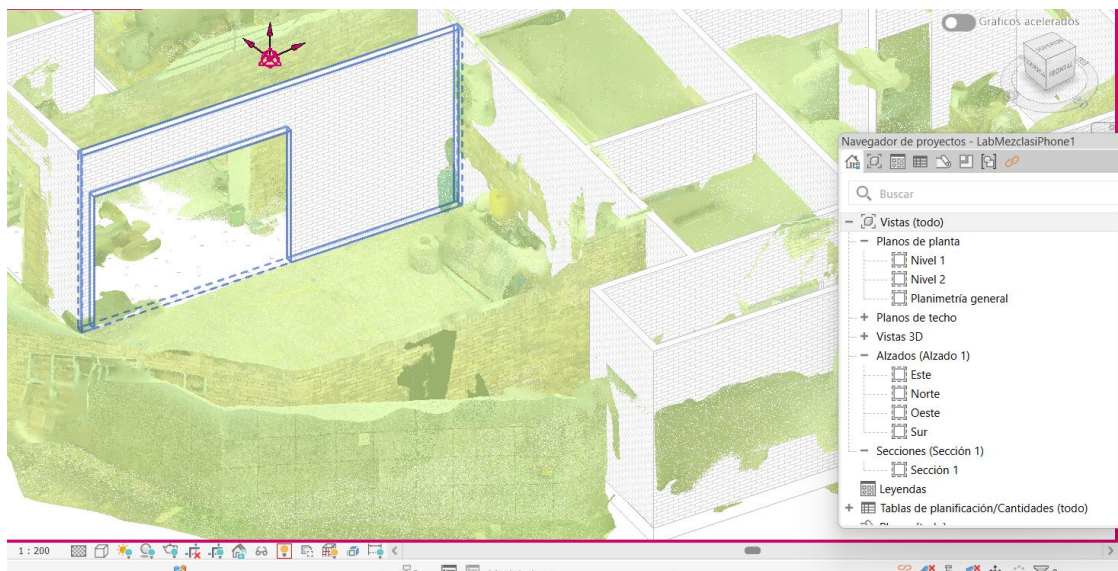


Figura 65. Espacios en los muros desde la nube de puntos iPhone. Fuente: elaboración propia.

3. 3. 7. Levantamiento Mediante Dron LiDAR UAV

El levantamiento aéreo del Laboratorio de Mezclas de la Pontificia Universidad Javeriana Cali se realizó mediante el sistema DJI Matrice 350 RTK equipado con el sensor LiDAR Zenmuse L2 (Figura 66), La metodología se estructuró en las etapas que se describen a continuación.

El sensor Zenmuse L2 montado sobre el Matrice 350 RTK alcanza una precisión horizontal de 5 cm y vertical de 4 cm a una altitud de vuelo de 150 m, con optimización de nube de puntos habilitada en DJI Terra. Estudios comparativos han reportado una mejora significativa de precisión del L2 respecto a su predecesor L1. A diferencia de los sistemas fotogramétricos UAV convencionales que operan únicamente con cámara RGB, el Zenmuse L2 integra un módulo LiDAR de marco, un sistema de alta precisión y una cámara de mapeo RGB con sensor CMOS 4/3, permitiendo la captura de nubes de puntos densas en una sola misión de vuelo.



Figura 66. Equipo DJI Matrice 350 RTK. Fuente: elaboración propia.

Etapas I: Adquisición de datos en campo

- **Configuración del sistema RTK y referenciación al punto de control**

Previo al vuelo, se configuró la antena RTK del DJI Matrice 350 RTK sobre una de las ubicaciones con coordenadas conocidas, obtenidas durante el levantamiento SLAM ejecutado anteriormente con el equipo GNSS RTK South G7. Esta decisión garantizó la coherencia del sistema de referencia entre ambos levantamientos y aprovechó los puntos de control ya establecidos en el área de estudio.

Dado que el Laboratorio de Mezclas se encuentra rodeado de paredes que limitan la visibilidad del cielo, la antena fue instalada a la mayor altura posible aproximadamente 2,50 m sobre el nivel del suelo para maximizar la recepción de señal de los satélites GNSS y asegurar la solución RTK durante la operación, como se observa en la Figura 67.



Figura 67. Antena RTK ubicada a 2,50 m de altura sobre el punto de control. Fuente: elaboración propia.

- **Configuración del equipo**

Una vez instalada la antena RTK, se procedió al encendido secuencial del sistema: primero la aeronave, luego el control remoto DJI RC Plus. La conexión entre el dron y el controlador se estableció a través de la red Wi-Fi generada por el equipo. Desde la aplicación DJI Pilot 2 instalada en el controlador, se verificó el estado de la señal RTK y se configuraron los parámetros de la misión de vuelo como se observa en la Figura 68.



Figura 68. Configuración del equipo. Fuente: elaboración propia.

La misión fue planificada en DJI Pilot 2 mediante una ruta de área (*Area Route*) con los siguientes parámetros de vuelo:

- **Altitud relativa de vuelo:** 90 m sobre el nivel del suelo
- **Velocidad de vuelo:** 15 m/s
- **Densidad de puntos:** 105 puntos por m²
- **Sensor activo:** Zenmuse L2 en modo de escaneo repetitivo

La selección de 90 m de altitud respondió a un balance entre la cobertura del área y la densidad de puntos requerida. El Zenmuse L2 montado sobre el Matrice 350 RTK alcanza una precisión horizontal de 5 cm y vertical de 4 cm a 150 m de altitud de vuelo con la opción de optimización de nube de puntos habilitada en DJI Terra; a menor altitud de vuelo, la densidad de la nube de puntos aumenta y la precisión geométrica mejora. Durante el vuelo, el sistema generó automáticamente una previsualización en tiempo real de la nube de puntos en la pantalla del controlador, permitiendo verificar la cobertura y calidad de los datos capturados sin necesidad de abandonar el área de trabajo como se puede observar en la Figura 69.



Figura 69. Planificación de la ruta de vuelo sobre el área del laboratorio. Fuente: elaboración propia.

Al finalizar el vuelo, DJI Pilot 2 quedan almacenados los datos de la nube de puntos en la tarjeta SD del propio sistema Zenmuse L2, esta información se pasa a un procesamiento inicial en un software propio como se explica a continuación.

Etapas II: Procesamiento de datos en DJI Terra

Los archivos generados durante el vuelo fueron exportados desde la tarjeta SD e importados al software DJI Terra para su procesamiento. En DJI Terra se creó una nueva misión de tipo "Nube de puntos LiDAR", se asignó un nombre al proyecto y se cargaron todos los archivos correspondientes a la sesión de vuelo.

El procesamiento en DJI Terra sigue un flujo de trabajo integrado que combina el cálculo de la trayectoria de vuelo con la optimización de la precisión de la nube de puntos. DJI Terra ofrece un preprocesamiento integral eficiente y confiable al importar datos de nubes de puntos, permitiendo generar un modelo de nube de puntos en formato .LAS, compatible con los principales software de procesamiento geoespacial y plataformas BIM.

3. 3. 8. *Modelado a partir de la Nube de Puntos Dron LiDAR en Autodesk Revit*

Una vez obtenida la nube de puntos procesada y filtrada del levantamiento exportada en formato .LAS, se procedió a su integración en Autodesk Revit para la construcción del modelo BIM del Laboratorio de Mezclas. El proceso se desarrolló en dos fases: la preparación del archivo en Autodesk ReCap Pro y el modelado paramétrico en Revit.

El archivo .LAS fue importado en Autodesk ReCap Pro para la creación de un proyecto de nube de puntos en formato .RCP, que es el formato compatible con Autodesk Revit. En ReCap Pro se realizó una verificación visual de la nube para confirmar su integridad geométrica, dado que el Dron realiza una toma muy amplia de puntos como se muestra en la Figura 70, se realiza antes de

pasar a Revit una limpieza de puntos, seleccionando los puntos no deseados y eliminándolos, permitiéndonos tener la nube de puntos limpia para su modelación como se observa en la Figura 72.

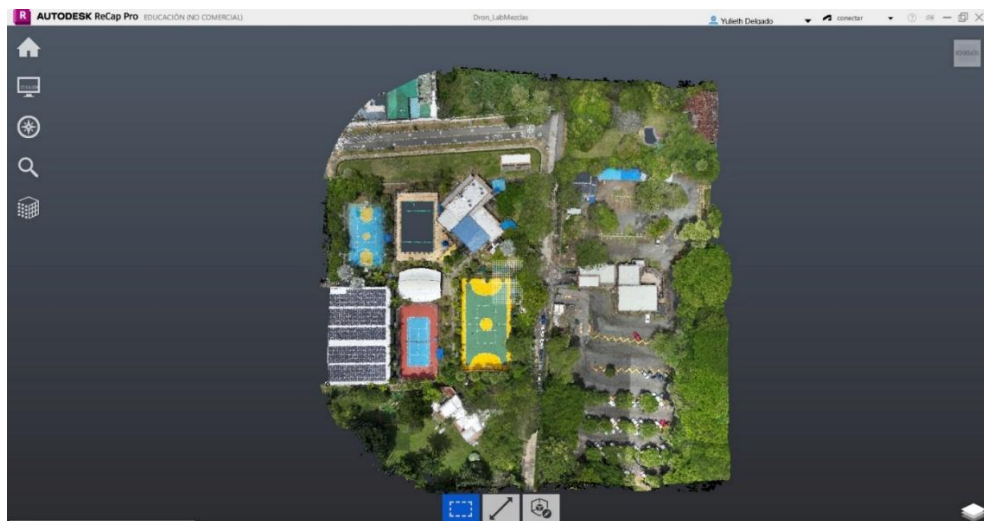


Figura 70. Nube de Puntos Dron LiDAR completa. Fuente: elaboración propia.

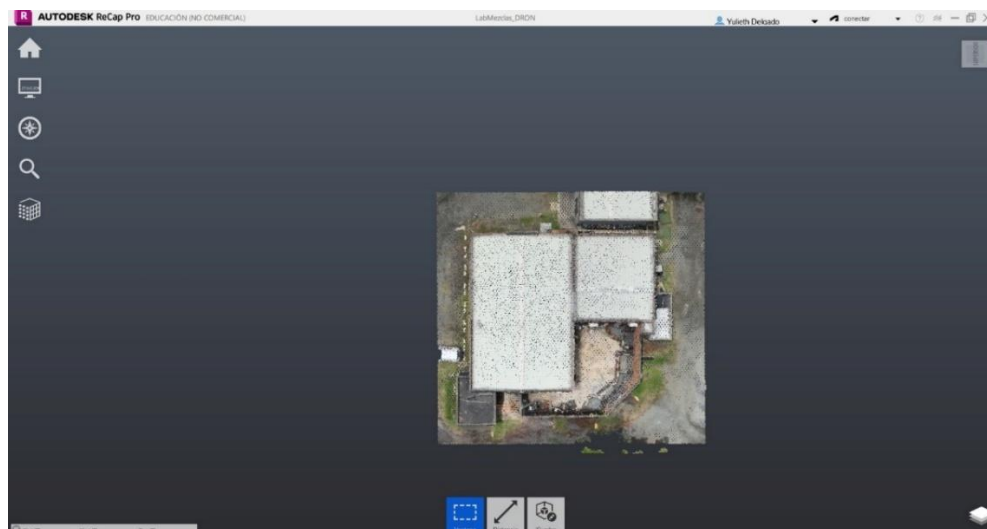


Figura 71. Nube de Puntos Dron LiDAR filtrada. Fuente: elaboración propia.

Teniendo esta nube se creó un nuevo proyecto en Autodesk Revit utilizando la plantilla métrica de arquitectura. La nube de puntos en formato .RCP fue insertada mediante la opción *Insertar >*

Nube de puntos, vinculándola al proyecto y estableciendo el origen del modelo como punto de referencia. Una vez insertada, la nube quedó disponible como referencia visual permanente en todas las vistas del proyecto plantas, alzados y secciones sobre la que se construyó el modelo paramétrico.

El primer paso del modelado consistió en establecer tres niveles que corresponden a las distintas alturas estructurales del laboratorio, identificadas a partir de la inspección visual de la nube de puntos en las vistas de alzado:

- **Nivel 1 (cota $\pm 0,00$ m):** nivel del piso principal del laboratorio, tomado como referencia base del proyecto.
- **Nivel 2 (cota 2,90 m):** cota superior de los muros de menor altura, presentes en la zona de transición entre los dos tramos de muro del edificio.
- **Nivel 3 (cota 3,70 m):** cota superior de los muros de mayor altura, correspondiente al borde superior de la envolvente del laboratorio en su parte más elevada.

La definición precisa de cada cota se realizó midiendo directamente sobre la nube de puntos en las vistas de alzado de Revit, utilizando la herramienta de medición del software para extraer las alturas reales de los elementos capturados durante el levantamiento como se observa en la Figura 72.

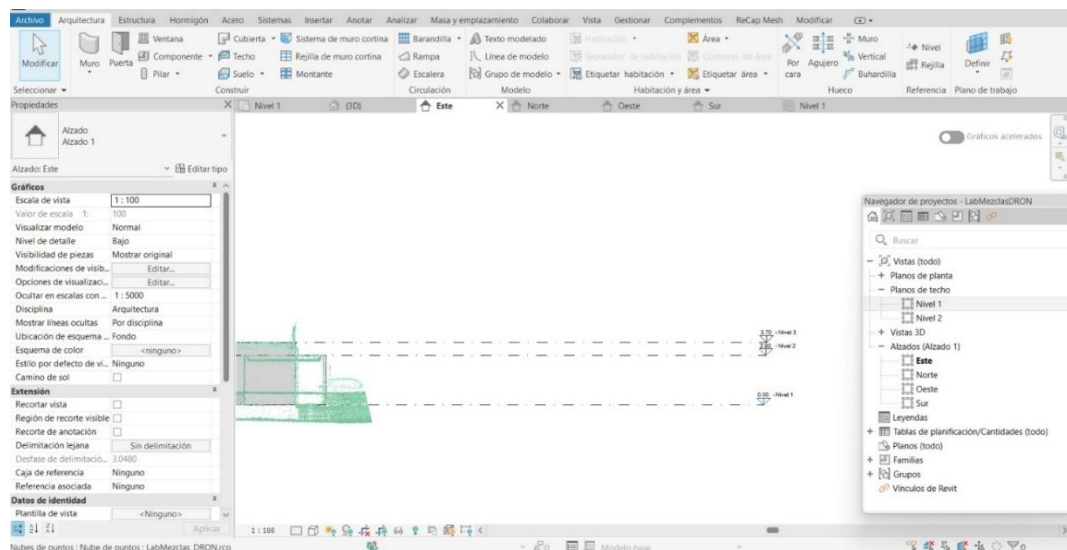


Figura 72. Niveles definidos en la nube de puntos SLAM. Fuente: elaboración propia.

Con los niveles establecidos, se procedió al modelado de los muros desde la vista en planta del Nivel 1, trazando su posición horizontal sobre el contorno de la nube de puntos. Las longitudes y los espesores de cada muro fueron determinados mediante medición directa sobre la nube de puntos utilizando la herramienta de acotación de Revit como se observa en la Figura 73, que permite tomar distancias reales entre puntos seleccionados de la nube. Las alturas de cada segmento de muro fueron asignadas con referencia a los niveles previamente definidos Nivel 1 a Nivel 3 para los muros más altos, y Nivel 1 a Nivel 2 para los muros de menor altura, verificando visualmente la correspondencia en las vistas de alzado, además de esto es importante recalcar que los materiales elegidos también se colocaron según la colorimetría que nos daba la nube de puntos, para los muros de Nivel 1 a 2 se tomó concreto y para los muros de Nivel 1 a 3 se tomó ladrillo a la vista. Cada muro fue modelado con su espesor real medido de la nube, respetando las irregularidades geométricas propias de la edificación existente como se observa en la Figura 74.

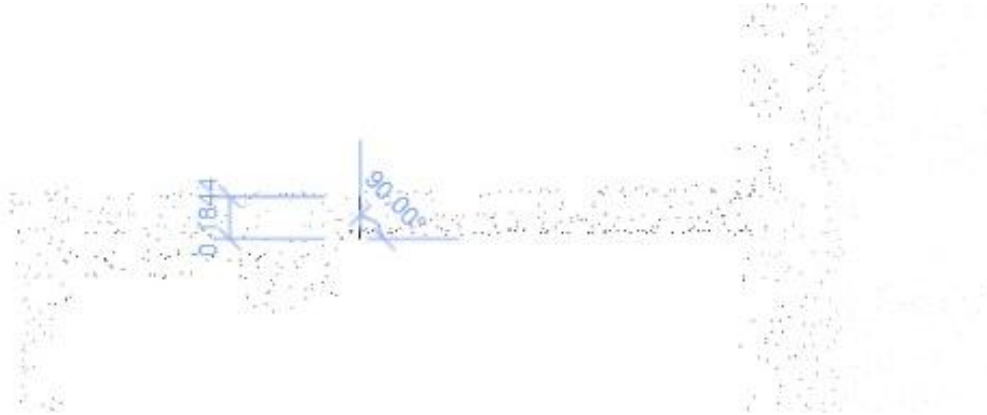


Figura 73. Medición espesor de muros según la nube de puntos Dron LiDAR. Fuente: elaboración propia.

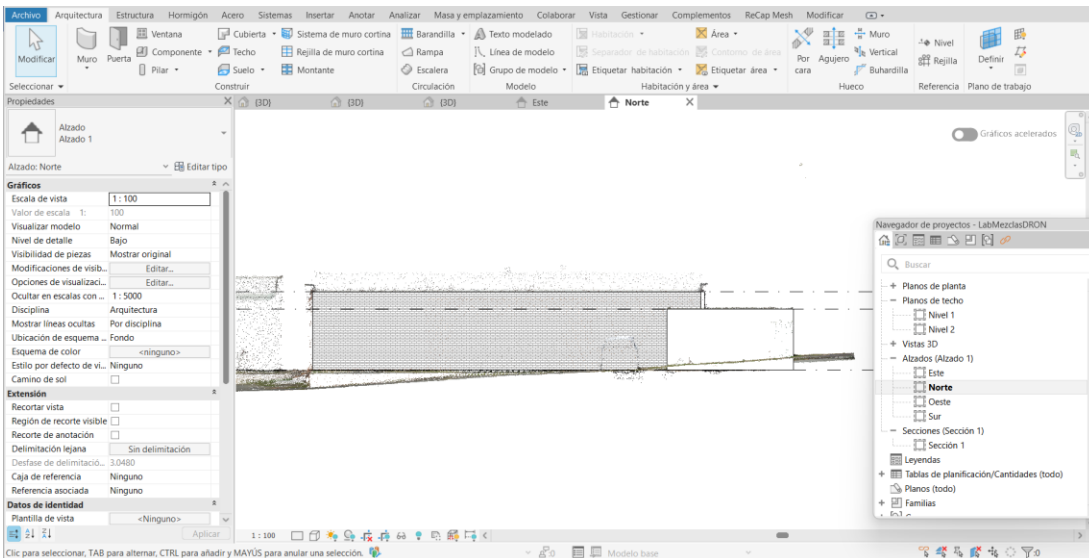


Figura 74. Muros dibujados a diferentes niveles siguiendo la nube de puntos Dron LiDAR. Fuente: elaboración propia.

Una vez completados los muros se abordaron los distintos tipos de espacios presentes en el laboratorio, adoptando una estrategia mediante la edición del perfil del muro. Este procedimiento respetó la continuidad estructural del muro en el modelo y reflejó con mayor fidelidad la condición real de la edificación. Con esto se finaliza este modelado recordando que este levantamiento es externo por ende las divisiones o espaciados internos no se visualizan en la nube de puntos.

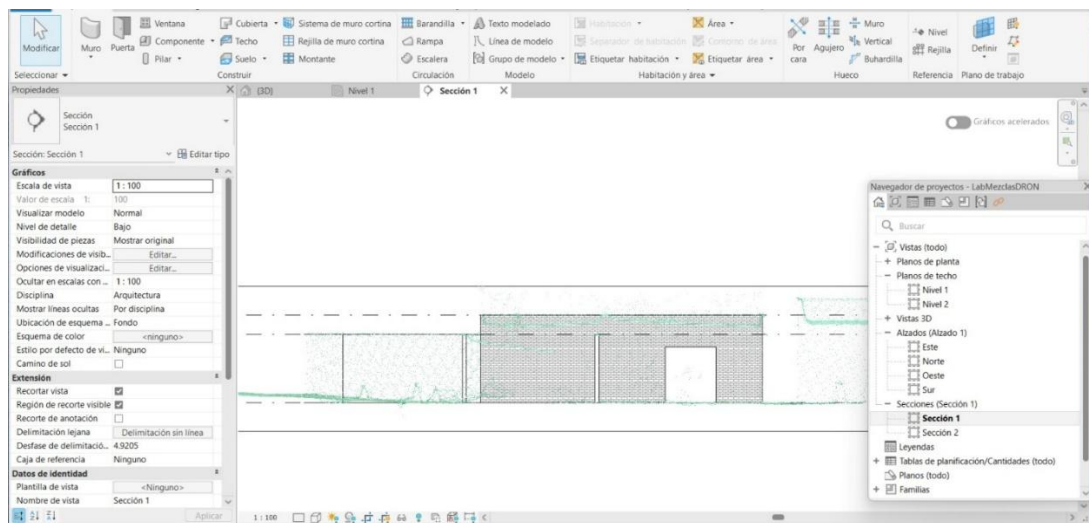


Figura 75. Espacios en los muros desde la nube de puntos Dron LiDAR. Fuente: elaboración propia.

3. 4. Análisis comparativo de técnicas

Con las tres nubes de puntos procesadas e integradas obtenidas en la Etapa III, la cuarta etapa se concentró exclusivamente en la evaluación comparativa del desempeño de cada técnica en función de diferentes criterios, entre ellos está: cobertura y elementos modelables donde se identifica que cobertura se obtuvo de cada levantamiento y con ello los elementos que pueden ser modelados en modelos BIM, las propiedades de la nube de puntos por técnica, teniendo en cuenta criterios como; coordenadas, color, intensidad de retorno, entre otras, para identificar cual nube es mas rica en propiedades las cuales puedan ayudar en el modelado, los indicadores de rendimiento operativo que indican el área levantada, el rendimiento de captura de cada levantamiento y el rendimiento global del flujo para cada técnica, así como el RMS de georreferenciación de cada una de ellas, criterios importantes que ayudan a evaluar los rendimientos de cada técnica y hacer una comparativa en conjunto, finalmente se realiza un análisis de mediciones geométricas el cual permite calcular la precisión de cada técnica, criterio clave para evaluar cada una de ellas, con el fin de cuantificar objetivamente la precisión geométrica de cada técnica de levantamiento, se

estableció una comparación directa entre las dimensiones reales del Laboratorio de Mezclas obtenidas mediante medición directa y las dimensiones equivalentes extraídas de cada nube de puntos en Revit, en total fueron 16 puntos tomados entre longitudes representadas por Lx , alturas hx , espesores ex y los niveles. Para cada uno de los dieciséis datos comparados (niveles de piso, longitudes de muro, alturas y espesores), se calculó el error absoluto (EA) y el error relativo porcentual (ER), definidos como:

$$EA_i = |x_{i \text{ técnica}} - x_{i \text{ real}}|$$

$$ER_i(\%) = \frac{EA_i}{x_{i \text{ real}}} \times 100$$

A partir de estos valores individuales se obtuvieron los estadísticos de síntesis por técnica: el error mínimo y el error máximo, correspondientes al menor y mayor EA registrado; el error medio, equivalente al promedio de los EA (MAE); y la raíz del error cuadrático medio (RMSE), calculada como:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_{i \text{ técnica}} - x_{i \text{ real}})^2}{n}}$$

Esta metodología de comparación, en la que las mediciones de una fuente de referencia in situ se contrastan contra las mediciones derivadas de la nube de puntos, sigue el procedimiento empleado por Nasr Saba (2021) para evaluar la precisión de sensores LiDAR de bajo costo frente a estación total, y por Chun et. al (2024) en un contexto de modelado as-built a partir de nubes de puntos con escáneres láser terrestres, calculando indicadores estadísticos para evaluar la precisión global frente a las tolerancias arquitectónicas permitidas. Esta metodología permite cuantificar la magnitud individual de las desviaciones y validar la fiabilidad del flujo de trabajo Scan-to-BIM en la representación de las dimensiones reales del Laboratorio de Mezclas. Este análisis, presentado

en el Capítulo 5, constituyó la base para las recomendaciones de selección de técnicas que orientan el flujo de trabajo propuesto en el Capítulo 6.

3. 5. Flujo de trabajo y protocolos para HBIM en BIC

La quinta y última etapa integró los resultados de todas las etapas anteriores para desarrollar el producto final de la investigación: un flujo de trabajo y protocolos documentados para la captura, procesamiento e integración de información orientados a la generación de modelos HBIM de Bienes de Interés Cultural. Estos protocolos incorporan tanto las lecciones aprendidas del proceso experimental como las particularidades documentales detectadas en la Iglesia La Merced, de manera que el flujo de trabajo propuesto responde simultáneamente a las capacidades de las tecnologías evaluadas y a las necesidades reales de los BIC de Cali.

4. DOCUMENTACIÓN DEL BIEN DE INTERÉS CULTURAL: IGLESIA LA MERCED

4. 1. Introducción al Bien

La Iglesia y Convento de La Merced constituyen el conjunto patrimonial más antiguo de Santiago de Cali y el primero en recibir declaratoria como Monumento Nacional en la ciudad. Su historia abarca casi cinco siglos de transformaciones arquitectónicas, intervenciones y restauraciones que han configurado su fisonomía actual un conjunto de planta en cruz irregular, con nave principal, capillas laterales, sacristía, campanario y claustro conventual en el cruce de la Carrera Cuarta con la Calle Séptima del centro histórico de Cali. La documentación de este bien reviste especial relevancia no solo por su valor histórico excepcional, sino porque la información existente sobre sus distintas etapas constructivas se encuentra dispersa en fuentes de diferente naturaleza; un libro monográfico de una restauración, planos físicos de dos períodos de restauración y documentación oral del bibliotecario institucional con vacíos significativos que esta investigación busca precisamente evidenciar, después de esto se recopilará información que se encuentre digitalizada disponible de la iglesia.

La principal fuente primaria para la documentación histórica de La Merced es la monografía de Sinisterra O'byrne (1974) escrita en los años 60, junto con el arquitecto Diego Salcedo Salcedo quien dirigió la primera restauración documentada del bien entre 1964 y 1965, pero hay ilustraciones técnicas que documentan el estado restaurado de la iglesia firmados y fechados por el arquitecto hasta el año 1969. Esta monografía, consultada directamente en el archivo físico de la institución durante las visitas de campo realizadas en el marco de esta investigación, constituye el registro técnico más detallado disponible sobre el estado original y el proceso de intervención de la Iglesia La Merced, y es la fuente base de la presente documentación (Sinisterra O'byrne, 1974).

4. 2. Cronología histórica del conjunto conventual

4. 2. 1. Siglo XVI — Fundación y primeras construcciones

La historia del conjunto conventual de La Merced es inseparable de la fundación de Cali, ciudad establecida en 1536 por Sebastián de Belalcázar y trasladada en 1537 a su emplazamiento actual por el Capitán Miguel Muñoz, traslado que dio origen a la misa celebrada por Fray Santos de Añasco y, con ella, a la Iglesia y Convento de La Merced. La fundación propiamente dicha del convento ocurrió cuatro años después, en 1541, cuando Fray Hernando de Granada inició una construcción débil y provisional, a la que pronto se anexó un hospital igualmente precario. A fines de siglo se erigió una nueva capilla financiada por Juana Ramírez, aunque de carácter humilde y sin que llegara a construirse el tabernáculo proyectado.

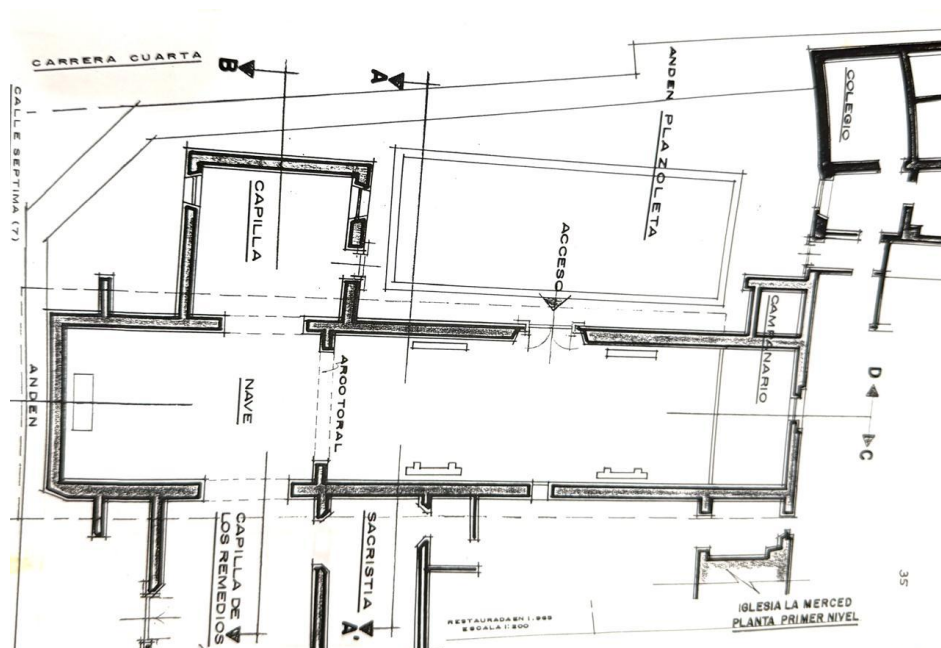


Figura 76. Plano en planta iglesia la merced despues de la primera restauración. Fuente: (Sinisterra O'byrne, 1974)

4. 2. 2. *Siglo XVII — Reconstrucción de la capilla y la sacristía*

El siglo XVII trajo las primeras intervenciones documentadas de carácter constructivo. En 1670, el Capitán Antonio Núñez de Rojas pagó carpinteros y albañiles para acometer obras en la Capilla de Las Mercedes, aunque en definitiva nunca se llevó a cabo. La intervención más significativa del período fue iniciada en 1678, cuando los frailes mercedarios emprendieron la reedificación de la Capilla y la Sacristía de La Merced con la ayuda de don Bernardo Alfonso de Saa y su esposa Ana Arboleda hecho mencionado por Gustavo Arboleda en su *Historia de Cali*. La obra quedó concluida en 1680. Para cubrir los gastos se vendió primero por setenta pesos un solar adyacente al convento y, posteriormente, la familia Saa aportó algo más de quinientos pesos. El valor de la obra subió así a algo más de quinientos setenta pesos (Sinisterra O'byrne, 1974).

4. 2. 3. *Siglo XVIII — Adorno del tabernáculo y consolidación del conjunto*

En el siglo XVIII el conjunto conventual alcanzó su configuración más estable. En el año de 1760, don Nicolás Sánchez donó doscientos pataconas para comenzar a adornar el Tabernáculo que en aquella época era sinónimo de retablo, según comenta Santiago Sebastián en su álbum de "arte colonial" de Santiago de Cali. Esta donación plantea una interrogante histórica relevante señalada por el propio arquitecto Sinisterra O'Byrne: ¿Se refería a comenzar el Tabernáculo que ya estaba hecho o era este el comienzo de las famosas reformas que sufrió La Merced? (Sinisterra O'byrne, 1974).

4. 2. 4. *Siglo XIX — Referencias históricas*

Este es el período con menor documentación arquitectónica disponible, aunque conserva referencias de valor como la entrega del pedestal de plata a la Virgen de las Mercedes en 1803 y el bastón de mando ofrecido por Joaquín de Caicedo y Cuero en 1811. El testimonio gráfico más

relevante es una fotografía panorámica de Cali tomada en 1895 desde la colina de San Antonio, en la que se aprecian la torre y los techos de la iglesia, así como la capilla de San Juan de Letrán; esta imagen resultó determinante para las restauraciones del siglo XX, al permitir reconstruir la altura y forma del cono de la torre (Sinisterra O'byrne, 1974).



Figura 77. Fotografía Cali 1895 donde se ve parte de la iglesia. Fuente: (Sinisterra O'byrne, 1974).

4. 2. 5. **Siglo XX: Reformas y ciclo de proyectos no ejecutados**

El siglo XX representa el periodo de mayor actividad institucional en torno al conjunto, aunque también el de mayor fragmentación documental. Hace aproximadamente cien años se ejecutaron reformas significativas sobre las cuales no se conserva proceso constructivo documentado que permita identificar con precisión el alcance de las intervenciones, los materiales empleados ni los criterios técnicos aplicados. Esta ausencia de documentación de proceso es precisamente uno de los déficits más graves que la implementación del HBIM busca subsanar para intervenciones futuras.

En 1956 una explosión afectó parte de la cubierta de la iglesia, lo que condujo a trabajos de reparación y consolidación estructural de alcance no documentado. Fue a raíz de estas y otras necesidades acumuladas que, en 1960, se formuló un diseño de propuesta de basílica encargado al arquitecto Alfredo Rodríguez Orgaz, del que se elaboraron planos de planta, corte y fachada fechados en 1961. De este proceso de diseño solo se conservan las láminas de planos y cartas de valor anecdótico, la propuesta contemplaba una transformación radical del conjunto hacia una basílica de mayores dimensiones, capillas laterales y fachada de composición más monumental. Este proyecto nunca se ejecutó, pero sus planos constituyen una fuente histórica de primer orden para comprender las intenciones de transformación del conjunto en ese periodo.

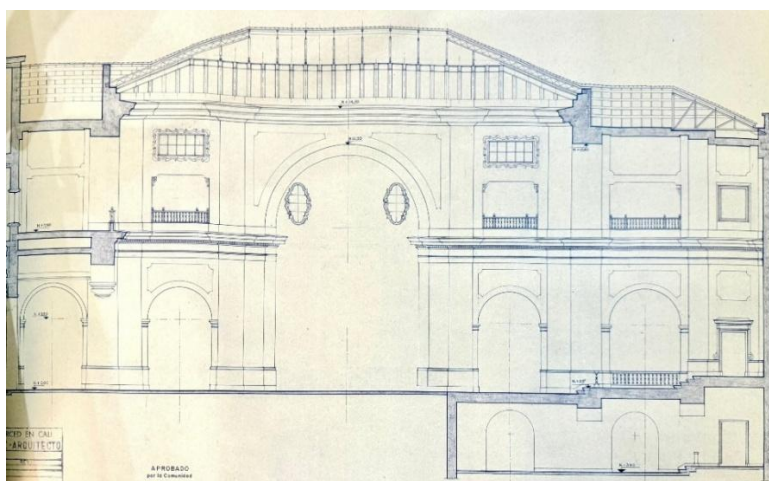


Figura 78. Una de las entradas proyecto basílica. Fuente: Planos físicos biblioteca Iglesia La Merced.

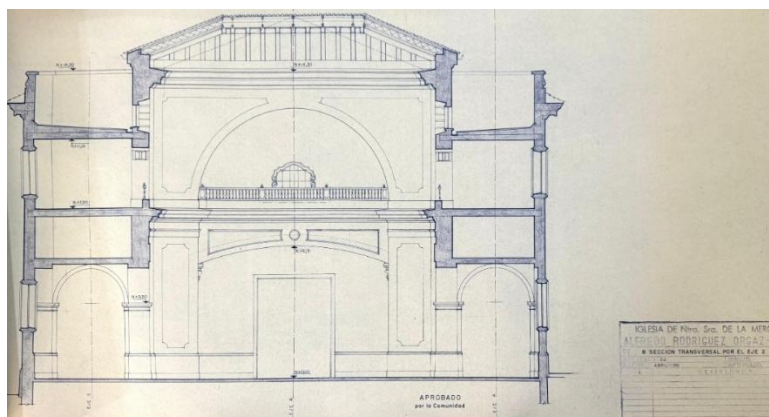


Figura 79. Sección transversal por el eje 2 proyecto basílica. Fuente: Planos físicos biblioteca Iglesia La Merced.

4. 3. Las restauraciones del siglo XX

4. 3. 1. Primera restauración documentada: 1964–1965

Contexto y antecedentes de la investigación

Los trabajos de restauración de la Iglesia La Merced se iniciaron el 25 de mayo de 1964 con un reconocimiento general apoyado en los planos levantados previamente por la Sociedad Colombiana de Arquitectos, Seccional Cali, y en un registro fotográfico complementario. La revisión de los archivos del convento no aportó información relevante sobre el espacio arquitectónico, por lo que la investigación se orientó hacia el museo de don Manuel María Buenaventura, donde se hallaron dos fotografías de 1895 una de la Carrera Cuarta y otra panorámica de la ciudad que resultaron determinantes para el proceso. Como último recurso se recogieron testimonios orales de personas mayores, útiles solo para detalles menores, dado que nadie había conocido la iglesia en su estado primitivo (Sinisterra O'byrne, 1974).

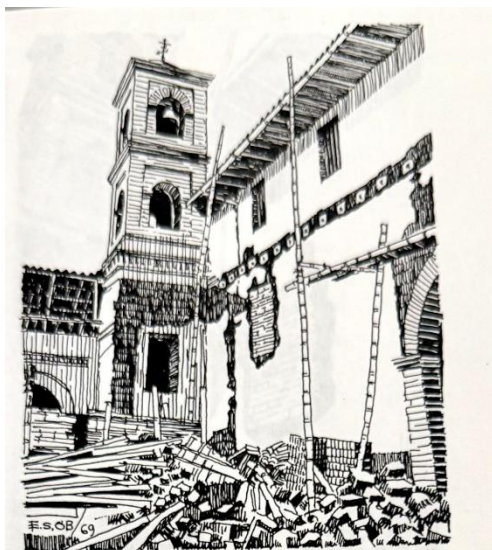


Figura 80. Iglesia la Merced: a) Estado de la iglesia antes de la restauración (Sinisterra O'byrne, 1974), b) Una de las primeras fotos encontradas (TuBarco News. s. f.).

Hallazgos durante la investigación constructiva

Mediante operaciones de raspado se determinó que el techo original había sido elevado (Figura 81): se identificó el cambio de material de tapia pisada a adobe a partir de una antigua solera de madera, así como el sistema constructivo original en "artesa", distinto al sistema contemporáneo de "tensor y rey" hallado bajo el cielo raso plano. Se localizaron también las "hojadas" y testigos que sirvieron de soporte al canecillo y al alero, permitiendo reconstruir la altura y el sistema de techumbre original. En cuanto a los vanos, se identificaron ventanas tapiadas mediante sondeos de raspado, ubicadas por simetría a partir del eje de la puerta principal (Figura 82). La Capilla de San Juan de Letrán fue reconstruida sobre sus cimientos originales intactos, hallándose además un pequeño vano en arco a nivel de piso cuyo uso no ha podido determinarse con certeza, posiblemente un torno para niños expósitos. Respecto a la torre, se desmontó el cuerpo superior y la cúpula por no corresponder a la época de restauración, revelándose la planta original cuadrada y cónica; sus dimensiones se restauraron con base en las marcas halladas y en cálculos geométricos derivados de la fotografía de 1895, liberándose además la estructura de un anexo posterior que la embebía (Sinisterra O'byrne, 1974).

a)



b)

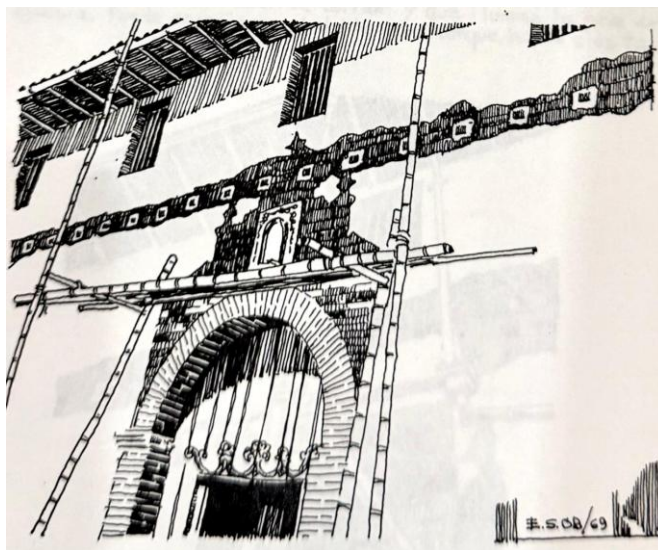


Figura 81. Hallazgos del techo; a) Se aprecian las "hojadas" que determinó la altura del antiguo techo, b) Apreciación de la localización de "hojadas" de la altura del techo. Fuente: (Sinisterra O'byrne, 1974)

a)



b)

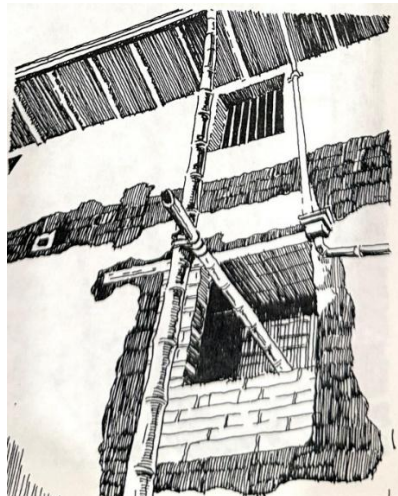


Figura 82. Ventanas originales tapadas; a) Vano tapiado de ventana original que esta junto a la torre, b) Vano tapiado de ventana junto a la capilla de "San Juan de Letrán". Fuente: (Sinisterra O'byrne, 1974)

Materiales y sistemas constructivos originales identificados

El piso: El piso que existía en la Iglesia era del tipo baldosín de cemento, evidentemente no el original. Se procedió a levantarlo, encontrando que había sido colocado sobre un relleno; este también fue retirado hasta encontrar el nivel primitivo la "tierra virgen". Bajo los altares laterales se encontraron algunos tramos con el antiguo enladrillado, que sirvieron de "testigos" para la restauración del piso ajustándose al tamaño y disposición de la época original (Sinisterra O'byrne, 1974).

La carpintería: En general, puertas, ventanas y rejas de barrotes se construyeron siguiendo el modelo correspondiente a otras puertas, ventanas y rejas que eran originales y que aún existían en la Iglesia. Para su construcción se copió no solamente su forma sino también los elementos y sistemas constructivos de la época original (Sinisterra O'byrne, 1974).

La pintura: Es necesario distinguir la pintura aplicada sobre la madera y la aplicada sobre los muros. En la colonia no dejaban las vigas al natural: las que estaban a la vista en los techos simplemente las encalaban; para puertas y ventanas se usaba un preparado de pintura generalmente en color rojo, azul o verde. Al raspar las sucesivas capas se encontró que la primitiva correspondía siempre a un color verde oliva, y se restauró en esa forma la totalidad de la pintura sobre madera. En cuanto a la pintura sobre muro, en la época colonial siempre se usó la cal y de preferencia el color blanco; para los muros exteriores se usaba el "zócalo" de color oscuro para disimular el salpique de la lluvia (Sinisterra O'byrne, 1974).

El altar principal: Su emplazamiento no era el original, pues había sido adelantado unos metros para formar un "camarín" a la estatua de la Virgen de la Merced. Al correr el altar a su antiguo emplazamiento comprobado, se encontraron en el muro posterior "hojadas" que habían sido tapadas con ladrillo. Se encontró también la antigua base del altar, intacta, con excepción de

unas pocas zonas que habían sido adaptadas como osarios. En esta antigua base se encontró otra terracota con los símbolos Mercedarios, cuya restauración fue encomendada igualmente a Dolcey Vergara. Es fácil establecer hoy que al altar principal le han suprimido los dos nichos superiores laterales y que en cambio han ampliado el nicho central; pero no cabe la menor duda de que el altar original debió tener tres nichos en la parte superior, similares a los que se encuentran en la base (Sinisterra O'byrne, 1974).

Los altares laterales: De los cuatro altares laterales que existieron, uno había sido suprimido en forma definitiva; dos se encontraban prácticamente destruidos, cubiertos por un "emplasto" de cemento, arena, yeso y pintura de barniz. Ante la imposibilidad de restaurarlos se fotografiaron para conservar la imagen de sus contornos generales y se procedió a retirarlos. Solo uno se encontraba en regular estado de conservación. Al limpiarlo se encontraron alrededor del nicho del altar una serie de pequeñas imágenes pintadas sobre pergamino y protegidas por vidrios, en cuyo respaldo se distingue la firma de Jacinto Sinisterra (Presbítero). (Sinisterra O'byrne, 1974).

4. 3. 2. *Intervalo entre restauraciones: proyectos para el conjunto conventual*

En el período previo a la segunda restauración y con miras a planificar una intervención más amplia del conjunto, se elaboraron planos para el complejo conventual que representan el estado del bien antes de la segunda restauración, los documentos físicos no presentan fecha exacta en todos los casos. Estos planos son de valor excepcional porque documentan el estado del conjunto antes de las intervenciones de 1976–1978 y reflejan además las aspiraciones programáticas del momento.

Los planos de este periodo incluyen un proyecto de propuesta de museo-convento que contemplaba la reconversión del claustro y las dependencias conventuales para albergar un programa museístico. Este proyecto no se ejecutó en su totalidad, aunque parcialmente inspiró la

reconversión posterior que hoy alberga el Museo de Arte Religioso y el Museo Arqueológico del Banco Popular. Igualmente, los planos de este periodo contemplan la apertura de la plazoleta exterior que se pensaba abrir entre la Carrera Cuarta y el costado norte del conjunto, siendo esta la única acción del plan general que finalmente se ejecutó completamente. La apertura de la plazoleta fue posible gracias a la venta del orfanato adyacente, lo que liberó el área que hoy configura el espacio público frente al campanario y la fachada principal de la iglesia (Figura 87). Algunos de estos planos incluyen propuestas de locales comerciales en lo que hoy es el Museo Arqueológico, y otra contempla el sistema “Massari” de desecación de muros, que sí se ejecutó más adelante para atender el problema de humedad como se observa en la Figura 88. Estos planos se quedaron en propuestas; el que finalmente se adoptó para la restauración se explica más adelante.

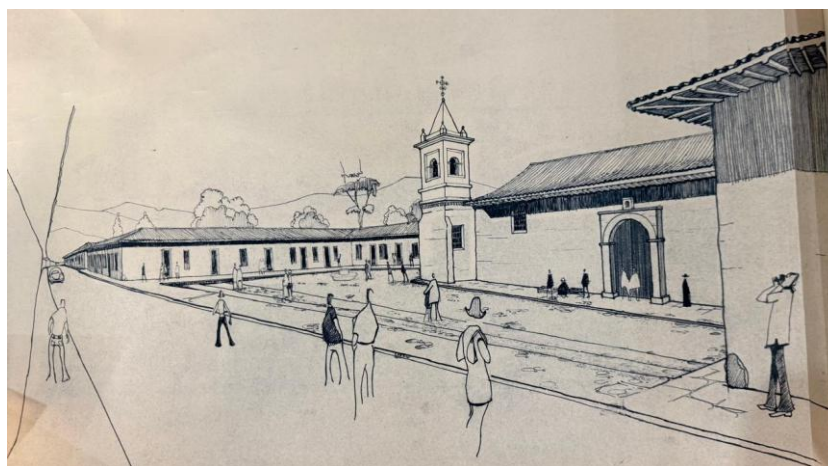


Figura 83. Dibujo de una de las propuestas con la plazoleta abierta. Fuente: Planos físicos biblioteca Iglesia La Merced.

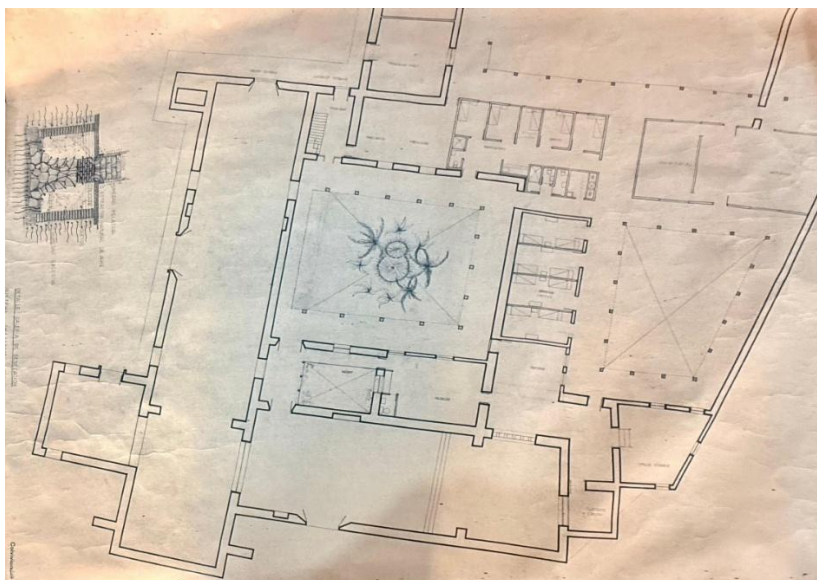


Figura 84. Propuesta CMC donde se puede observar el método Massari y la ampliación de una de las capillas. Fuente: Planos físicos biblioteca Iglesia La Merced

4. 3. 3. Segunda restauración (1976–1978)

La segunda restauración, ejecutada entre 1976 y 1978, es la intervención de mayor alcance registrada en el conjunto, ya que abarcó la totalidad del Complejo Monumental La Merced: la iglesia, la Capilla de Los Remedios, el claustro conventual y las dependencias. A diferencia de la primera restauración, esta intervención no dejó como resultado una monografía publicada, sino un conjunto de planos físicos en 2D conservados en el archivo de la institución junto con algunas fotografías, boletines de obra y documentación dispersa que no se encuentra sistematizada ni digitalizada.

En los planos de esta segunda restauración se pueden leer los materiales empleados y el método Massari para el tratamiento de humedades aplicado en los muros. El sistema Massari consiste en la construcción de una galería de desecación perimetral al interior de los muros más afectados, que incorpora ductos de ventilación natural para eliminar la humedad ascendente por capilaridad, uno de los problemas más graves en los muros de adobe y tapia pisada del conjunto. Los cambios de

materiales documentados en esta restauración corresponden fundamentalmente a la sustitución de materiales incompatibles introducidos en intervenciones anteriores: se retiró el cemento aplicado sobre los muros de adobe original, se repararon los pisos que presentaban problemas de humedad y fisuras, y se intervino la cubierta que también presentaba afectaciones por humedad.

Un hallazgo material de gran relevancia histórica se produjo en el muro más antiguo del conjunto y considerado el muro más antiguo de Cali, en algún momento de la historia del conjunto sobre este paramento de piedra y adobe se habían colocado azulejos, los cuales fueron retirados durante la segunda restauración con el criterio de que el valor de autenticidad del muro original era muy superior al de este revestimiento posterior. Como resultado, el paramento quedó expuesto tal como se observa hoy, mostrando con total transparencia las dos técnicas constructivas superpuestas: mampostería de piedra de río en la parte inferior y aparejo de adobe en la parte superior (Figura 85). Este muro es la evidencia material más directa de los orígenes del conjunto y constituye uno de los elementos de mayor valor patrimonial para documentar en el HBIM.



Figura 85. Muro más antiguo del conjunto religioso La Merced. Fuente: elaboración propia.

Los planos de la segunda restauración también incluyen la planta de la iglesia en su estado previo a la intervención, lo que permite comprender las transformaciones ejecutadas y constituye,

junto con los planos de la primera restauración, la fuente histórica de mayor valor técnico para la comprensión de la evolución del conjunto. Posterior a 1976 se ejecutó la construcción nueva del convento, que sí se realizó en su totalidad, incluyendo las nuevas dependencias conventuales que hoy se conservan.

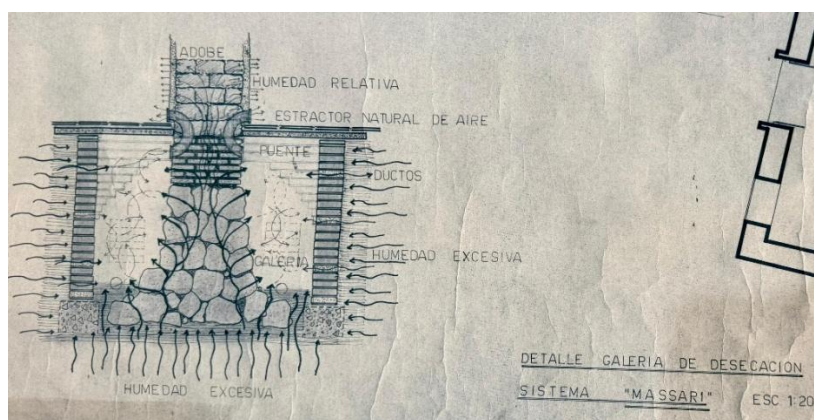


Figura 86. Sistema Massari a detalle. Fuente: Planos físicos biblioteca Iglesia La Merced.

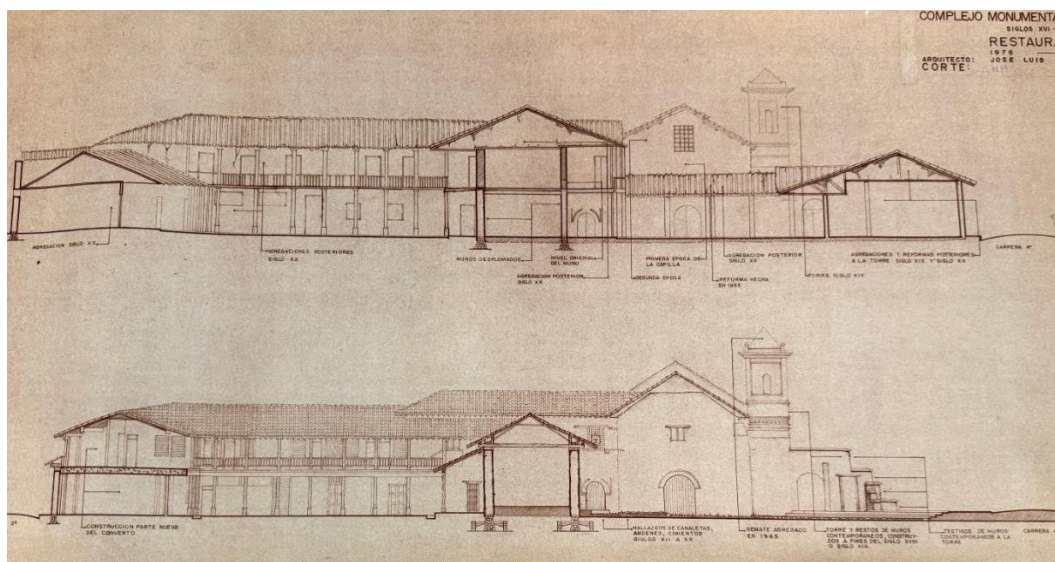


Figura 87. Corte lateral de antes y después de la restauración donde se puede ver la torre. Fuente: Planos físicos biblioteca Iglesia La Merced.

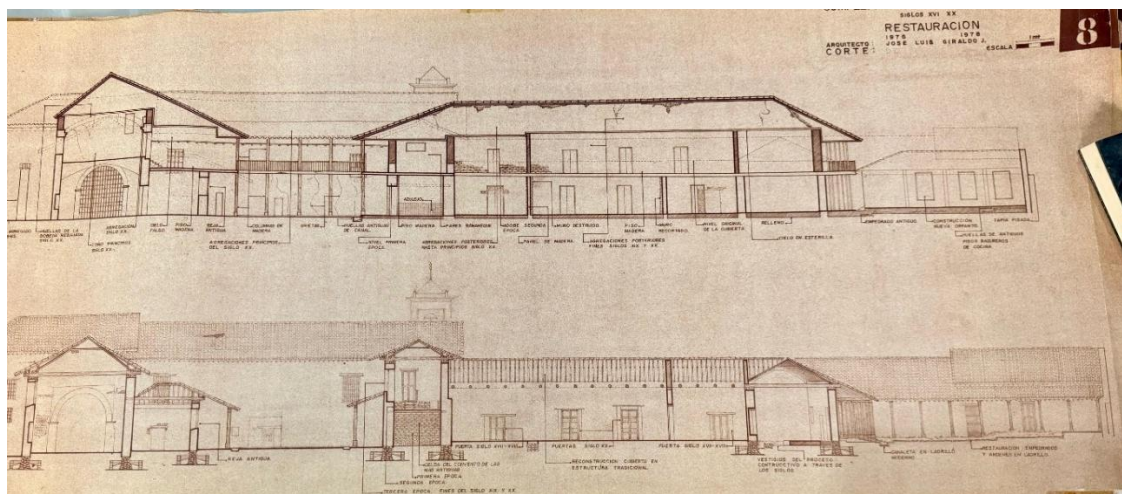


Figura 88. Corte lateral de antes y después de la restauración donde se puede ver parte del convento. Fuente: Planos físicos biblioteca Iglesia La Merced.

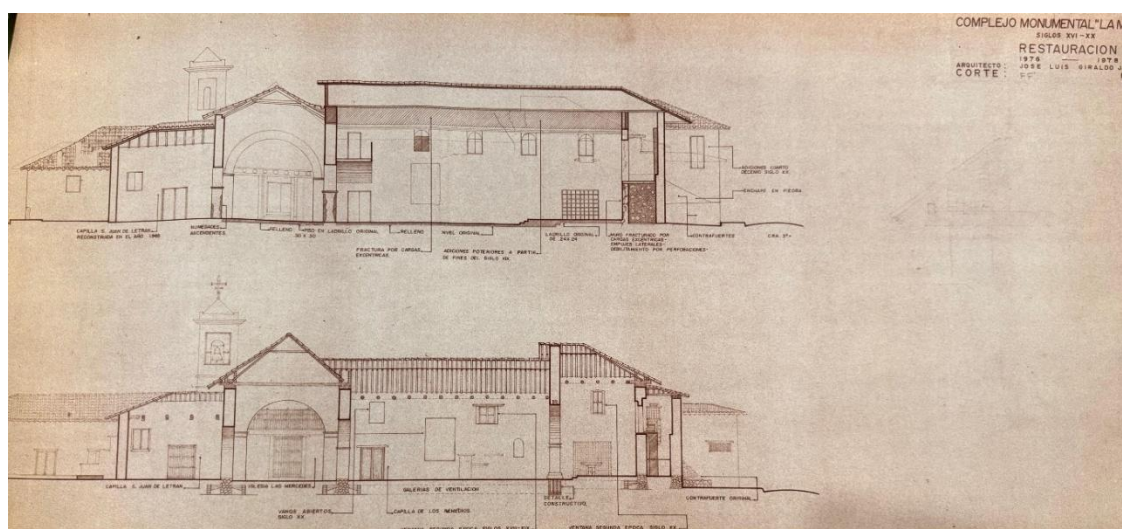


Figura 89. Corte lateral de antes y después de la restauración donde se ve la entrada Iglesia Las Mercedes. Fuente: Planos físicos biblioteca Iglesia La Merced.

4. 4. Caracterización del bien según fuentes institucionales y secundarias

Esta sección complementa la documentación de fuentes primarias presentada en las secciones anteriores con información proveniente de fuentes institucionales y secundarias verificables: la ficha técnica BIC N-23 del Departamento Administrativo de Planeación Municipal

de Santiago de Cali, el Decreto 285 de 1975 del Ministerio de Educación Nacional, y artículos de prensa con reportería directa en el conjunto.

4. 4. 1. Valor patrimonial y declaratoria como Monumento Nacional

La doble condición patrimonial del conjunto como Bien de Interés Cultural de ámbito nacional y Monumento Nacional constituye el principal marco jurídico que determina los alcances y restricciones de cualquier intervención y, por tanto, el nivel de exigencia documental que debe satisfacer el modelo HBIM. Comprender el proceso mediante el cual se obtuvo esta protección es esencial para contextualizar la urgencia de la documentación integral que esta investigación propone.

Según Alejandro Archila Castaño, director del Museo de Arte Colonial y Religioso La Merced, en 1971 el conjunto conventual de La Merced fue declarado el primer Monumento Nacional de Cali, marcando un hito en la conservación del patrimonio de la ciudad (Moreno, 2025). La declaratoria oficial, sin embargo, se formalizó mediante el Decreto 285 del 24 de febrero de 1975. Dicho decreto establece en su artículo primero: *"Declárase Monumento Nacional a la Iglesia y Convento de La Merced en la ciudad de Cali"*, fundamentado en la Ley 163 de 1959 y en el hecho de que, según prueba testimonial, la Iglesia y el Convento ya existían en el año 1540 (Ministerio de Educación Nacional, 1975)

La declaratoria como Monumento Nacional fue no solo un reconocimiento simbólico sino un factor determinante para la viabilidad económica de la segunda restauración. Con enormes esfuerzos, se logró en febrero de 1975 dicha declaratoria, y el 29 de junio de ese mismo año se anunció la vinculación del Banco Popular al proyecto, hecho que lo salvó definitivamente y le dio el impulso final para su ejecución. A principios de 1976, la Comunidad de Misioneras Agustinas Recoletas vendió una parte del convento al Banco Popular y se pusieron en marcha las labores de

restauración. Dos años después, el 10 de mayo de 1978, fueron entregadas oficialmente las obras que le devolvieron a la ciudad su joya histórica más preciada (Misioneras Agustinas Recoletas, 2018).

En el marco normativo vigente, el conjunto está catalogado como Bien de Interés Cultural (BIC N-23) en el Nivel 1 de Conservación Integral dentro del Plan de Ordenamiento Territorial (POT) de Santiago de Cali, Acuerdo No. 0373 de 2014. La ficha técnica del DAPM establece que este nivel se aplica a los inmuebles que deben ser conservados íntegramente por su carácter singular y monumental y por razones histórico-artísticas, preservando todas sus características arquitectónicas, y que corresponde al máximo nivel de conservación aplicado a todos los Monumentos Nacionales declarados (Departamento Administrativo de Planeación Municipal de Santiago de Cali (DAPM), 2014)

En 2025, el conjunto celebró cinco décadas desde su declaratoria oficial como Monumento Nacional, siendo el primer edificio en Cali en recibir este reconocimiento (Moreno, 2025). Este hito institucional reafirma la excepcionalidad del bien y, al mismo tiempo, pone de relieve la urgencia de actualizar su documentación técnica, que como se evidenció en la sección 4.3 no ha tenido una actualización integral desde la segunda restauración de 1976-1978, hace casi cincuenta años.

En conjunto, esta documentación complementaria de fuentes institucionales y secundarias confirma y amplía los vacíos identificados en las fuentes primarias del archivo del convento. Mientras la monografía de Sinisterra (Sinisterra O'byrne, 1974) y los planos físicos documentan con precisión el proceso constructivo y las intervenciones técnicas del bien, las fuentes institucionales aportan la dimensión normativa, administrativa e inmaterial que no se encuentra sistematizada en ningún documento del archivo: el marco jurídico que protege al conjunto como

Monumento Nacional y la continuidad de doscientos años de administración por parte de las comunidades religiosas, que constituye uno de los valores intangibles más significativos del bien para la ciudad de Cali.

Esta caracterización histórica y constructiva del bien no es únicamente un ejercicio documental: es el insumo directo que permite definir los criterios técnicos que deben orientar su digitalización. Los muros de tapia pisada y adobe de espesores considerables y superficies irregulares exigen técnicas capaces de capturar simultáneamente ambas caras del muro para obtener su ancho real. La complejidad espacial del conjunto nave principal, capillas laterales, coro, sacristía, claustro y espacios museísticos demanda cobertura tanto interior como exterior, sin que ninguna técnica de captura exclusivamente aérea o exclusivamente terrestre pueda documentar el conjunto de manera integral. La altura de la nave, el arco toral, los altares y los elementos ornamentales requieren una densidad de nube de puntos suficiente para representar geometrías curvas y superficies con relieve. Estos criterios técnicos, derivados directamente de las particularidades del bien, constituyen el marco de referencia que orienta tanto la selección de técnicas aplicadas en el caso de estudio como el flujo de trabajo HBIM propuesto en los capítulos siguientes.

5. EVALUACIÓN DE TÉCNICAS DE LEVANTAMIENTO

5. 1. Descripción de la edificación caso de estudio

El Laboratorio de Mezclas de la Pontificia Universidad Javeriana Cali fue seleccionado como edificación caso de estudio para la evaluación y comparación de las técnicas de levantamiento aplicadas en esta investigación. Esta selección respondió, en primer lugar, a criterios de accesibilidad y disponibilidad, dado que no fue posible realizar los levantamientos directamente sobre una iglesia patrimonial debido a restricciones de acceso e institucionales propias de estos bienes. Ante esta limitación, se optó por una edificación que, sin ser un bien patrimonial declarado, permitiera poner a prueba el flujo metodológico completo captura, procesamiento y modelado HBIM en condiciones reales de trabajo de campo, controlando así variables que podrían haberse visto afectadas por restricciones de horario, movilidad o manipulación de equipos propias de un entorno patrimonial protegido.

En segundo lugar, la elección no fue arbitraria dentro del campus: el Laboratorio de Mezclas constituye una edificación de relevancia institucional para la Facultad de Ingeniería Civil, al ser un espacio activo de docencia e investigación, lo que aporta un valor adicional al ejercicio, pues su levantamiento y documentación digital pueden convertirse en un insumo útil para la propia universidad, ya sea como soporte para la gestión de infraestructura, como material didáctico en cursos relacionados con topografía, fotogrametría o modelado BIM, o como punto de partida documentado para investigaciones futuras que deseen profundizar en la aplicación de estas tecnologías dentro del campus. De este modo, la selección del laboratorio no solo resolvió una limitación práctica del proyecto, sino que dotó a la investigación de un componente de aplicabilidad institucional que trasciende el ejercicio comparativo de las técnicas de levantamiento

El laboratorio es una edificación de un solo nivel con espacios interiores de uso técnico, caracterizada por una geometría de planta irregular con distintos niveles de piso, variaciones en la altura de los muros y presencia de una rampa que conecta las diferentes cotas interiores como se observa en la Figura 90. Cuenta con espacios de puerta, ventanas y espacios de comunicación entre “aulas”, y su envolvente exterior está delimitada por muros de mampostería de diferentes alturas. Esta diversidad de elementos geométricos variaciones de altura, espesores de muro, cambios de nivel y espacios la convierte en una edificación adecuada para evaluar el desempeño de diferentes técnicas de levantamiento en condiciones representativas de los retos que plantea una edificación patrimonial.



Figura 90. Laboratorio de Mezclas Pontificia Universidad Javeriana Cali. Fuente: elaboración propia.

5. 2. Resultados del levantamiento con SLAM LiDAR

El levantamiento realizado con el sistema SLAM LiDAR permitió obtener una nube de puntos completa del Laboratorio de Mezclas, abarcando tanto los espacios interiores como el volumen exterior de la edificación. La cobertura integral del conjunto, donde la restricción fue la cubierta y algunas partes del techo si se tomaron en los puntos del recorrido, constituye el resultado más significativo de esta técnica en el contexto de la edificación evaluada (Figura 91).



Figura 91. Vista general de la nube de puntos SLAM del Laboratorio de Mezclas perspectiva exterior e interior, cobertura completa alcanzada con esta técnica. Fuente: elaboración propia.

A partir de la nube de puntos obtenida fue posible extraer las mediciones geométricas fundamentales para el modelado: los espesores de cada muro del laboratorio fueron determinados midiendo directamente sobre la nube en las vistas de planta, y las alturas de los distintos niveles incluyendo el nivel principal, el descenso central y los bordes superiores de los muros de diferente altura fueron extraídas desde las vistas de alzado. Esta información constituyó la base dimensional del modelo paramétrico desarrollado en Revit.

El modelo resultante incorporó casi la totalidad de los elementos del laboratorio: muros exteriores e interiores, pisos de los dos niveles, rampa de conexión entre cotas, espacios de puertas y ventanas (vanos) modelados como muros cortina, y los espacios de comunicación y puertas resueltos mediante la edición del perfil del muro, solo un lugar donde en el trabajo de campo se observaron dos vanos de puertas, no se pueden visualizar en el modelo, probablemente porque se pasó muy rápido por el lugar y el SLAM no alcanzó a tomar muchos puntos en él. La integridad del modelo que representa tanto el interior como el volumen exterior de la edificación es

directamente atribuible a la cobertura completa que ofrece el sistema SLAM durante el recorrido continuo, el modelo completo y sus vistas se puede observar en las Figuras 92, 93, 94, 95, 96.

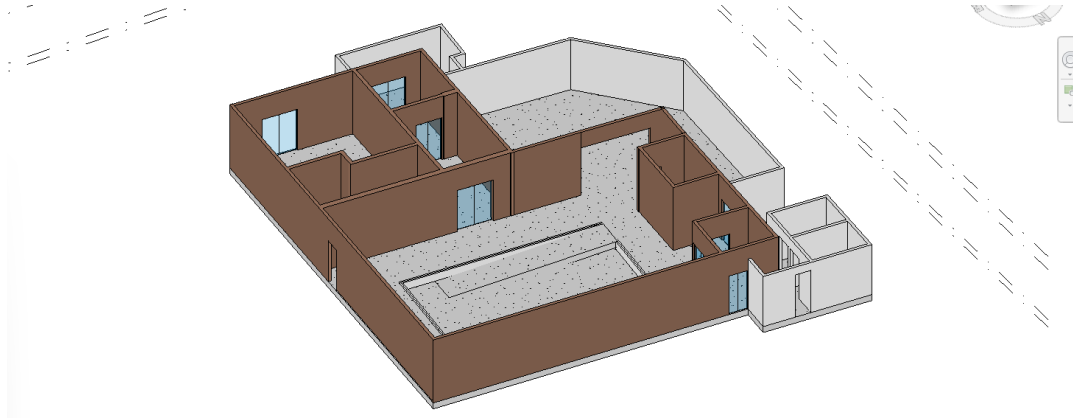


Figura 92. Modelo 3D resultante del levantamiento con SLAM. Fuente: elaboración propia.



Figura 93. Alzado Este modelo levantamiento con SLAM. Fuente: elaboración propia.

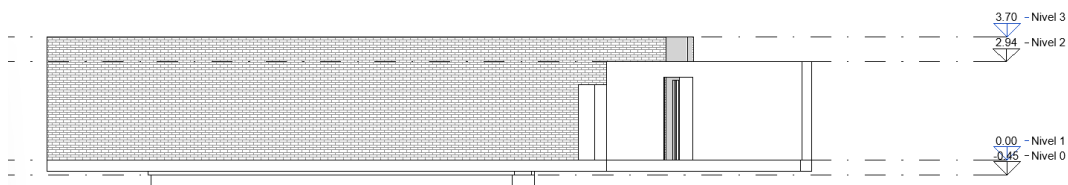


Figura 94. Alzado Norte modelo levantamiento con SLAM. Fuente: elaboración propia.

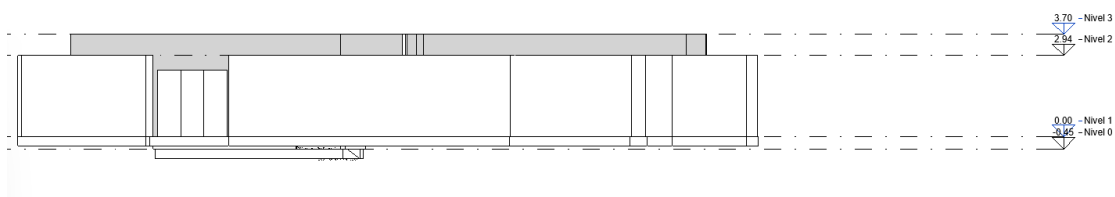


Figura 95. Alzado Oeste modelo levantamiento con SLAM. Fuente: elaboración propia.

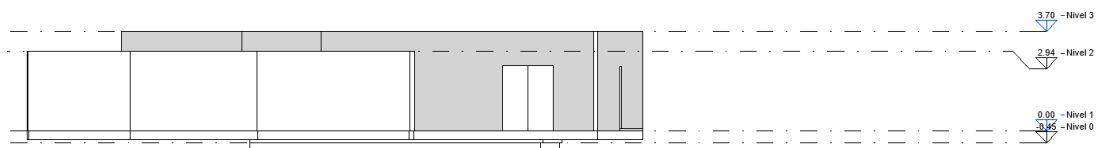


Figura 96. Alzado Sur modelo levantamiento con SLAM. Fuente: elaboración propia.

5. 3. Resultados del levantamiento con Cámara 360°

El levantamiento realizado con la Cámara 360° Insta360 X3 permitió obtener una nube de puntos del interior del Laboratorio de Mezclas a partir del procesamiento fotogramétrico descrito en la sección 3.3.3. Dado que todas las capturas fueron realizadas desde posiciones internas del laboratorio, la nube de puntos resultante documenta los espacios interiores del conjunto muros vistos desde adentro, pisos, vanos y elementos de carpintería, sin que sea posible obtener información sobre los materiales, texturas ni condiciones de las superficies exteriores de los muros (Figura 97). Esta condición es inherente al método de captura empleado y debe considerarse al evaluar la pertinencia de esta técnica para la documentación de edificaciones patrimoniales, donde la caracterización de la envolvente exterior es habitualmente un requerimiento fundamental.

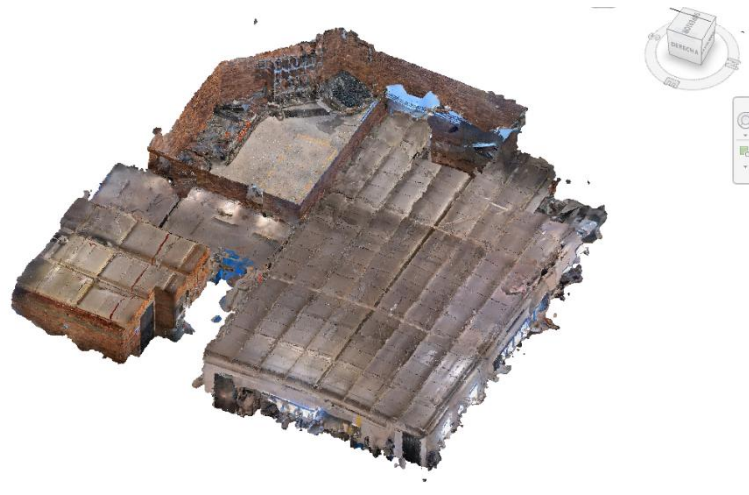


Figura 97. Vista general de la nube de puntos de la Cámara 360° donde se observa que se ven los materiales internos desde el exterior, mas no los materiales externos de los muros. Fuente: elaboración propia.

La nube de puntos obtenida permitió identificar y modelar en Revit los principales elementos del interior de la edificación: vanos de puertas, ventanas y espacios de comunicación entre recintos, que resultaron suficientemente legibles en la nube como para determinar su posición, ancho y altura con un nivel de detalle adecuado para el modelado paramétrico. Sin embargo, la representación de los distintos niveles de piso del laboratorio el nivel principal, el descenso central y la rampa de conexión presentó dificultades para su lectura detallada, dado que las superficies horizontales capturadas desde la posición de toma de la cámara no ofrecen la misma densidad de información que las superficies verticales, limitando la precisión con la que pueden identificarse los cambios de cota en la nube de puntos.

Un aspecto crítico identificado durante el modelado fue la dificultad para extraer el espesor de los muros a partir de esta nube de puntos. Al haberse capturado únicamente el interior del laboratorio, la nube representa exclusivamente el paramento interior de cada muro, sin que la cara exterior sea visible. En consecuencia, en la mayoría de los muros solo era perceptible el polígono de planta del espacio el contorno de la edificación, pero no el ancho real del elemento constructivo. El espesor solo pudo determinarse con certeza en los escasos puntos donde la geometría del espacio

permitía ver este espesor del muro, algunas zonas del modelo presentaron distorsión geométrica, particularmente en las superficies correspondientes a las esquinas, algunas puertas y a los cambios bruscos de plano, el modelo completo y sus vistas se puede observar en las Figuras 98, 99, 100, 101, 102.

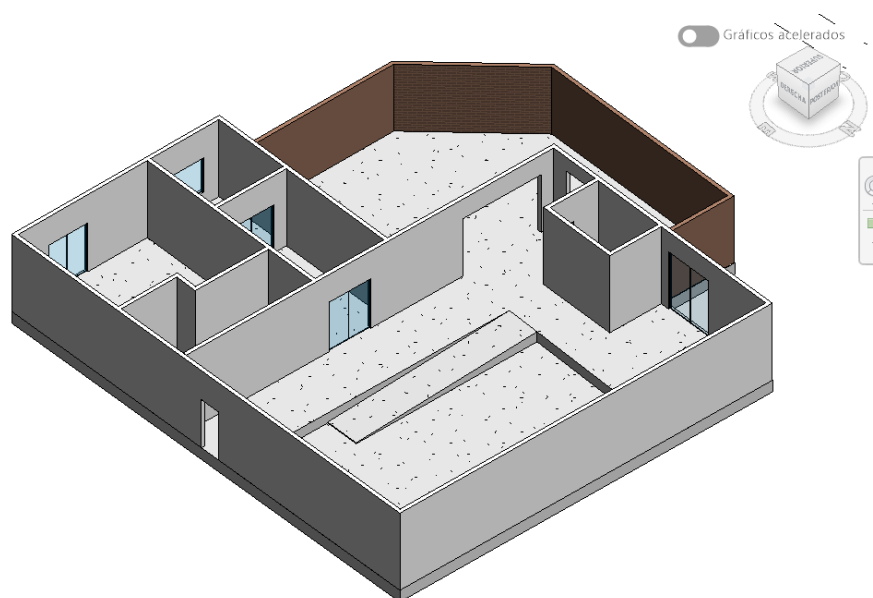


Figura 98. Modelo 3D resultante del levantamiento con Cámara 360°. Fuente: elaboración propia.

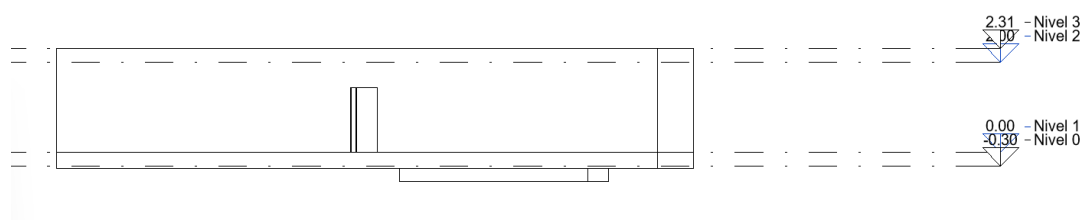


Figura 99. Alzado Este modelo levantamiento con Cámara 360°. Fuente: elaboración propia.

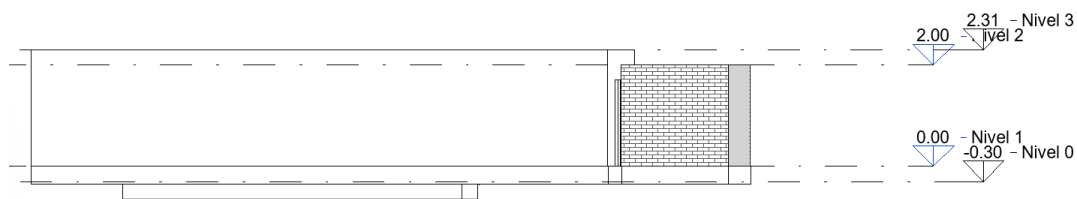


Figura 100. Alzado Norte modelo levantamiento con Cámara 360°. Fuente: elaboración propia.

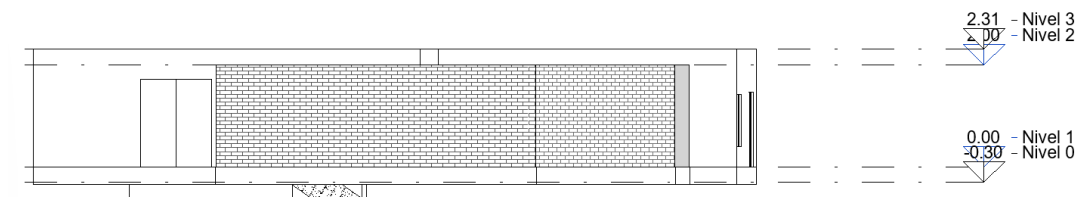


Figura 101. Alzado Oeste modelo levantamiento con Cámara 360°. Fuente: elaboración propia.

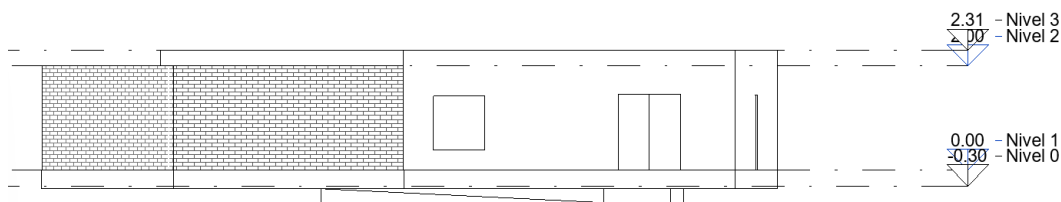


Figura 102. Alzado Sur modelo levantamiento con Cámara 360°. Fuente: elaboración propia.

5. 4. Resultados del levantamiento con Escáner LiDAR integrado en iPhone 16 Pro

El levantamiento realizado con el sensor LiDAR integrado en el dispositivo iPhone 16 Pro mediante la aplicación Polycam permitió obtener un modelo tridimensional del Laboratorio de Mezclas en formato .GLTF, que tras el procesamiento descrito en la sección 3.3.5. fue convertido en una nube de puntos con información de color (Figura 103). Sin embargo, como se documentó en la metodología, la nube de puntos correspondiente al exterior de la edificación presentó sobreposición de superficies y ruido excesivo, limitando el uso de los datos al volumen interior del laboratorio.



Figura 103. Vista general de la nube de puntos iPhone del Laboratorio de Mezclas perspectiva exterior e interior, rotación de la nube con esta técnica. Fuente: elaboración propia.

A partir de los datos interiores disponibles fue posible extraer los espesores de los muros internos y las alturas de los muros del interior del laboratorio. El modelo paramétrico en Revit se desarrolló exclusivamente sobre la volumetría interior, sin representación del volumen exterior de la edificación. Esta restricción implica que el modelo obtenido con esta técnica es parcial respecto al conjunto edificado, condición que debe considerarse en la evaluación de su pertinencia para la documentación de edificaciones patrimoniales donde la envolvente exterior es un elemento de valor fundamental, el modelo completo y sus vistas se puede observar en las Figuras 104, 105, 106, 107, 108.

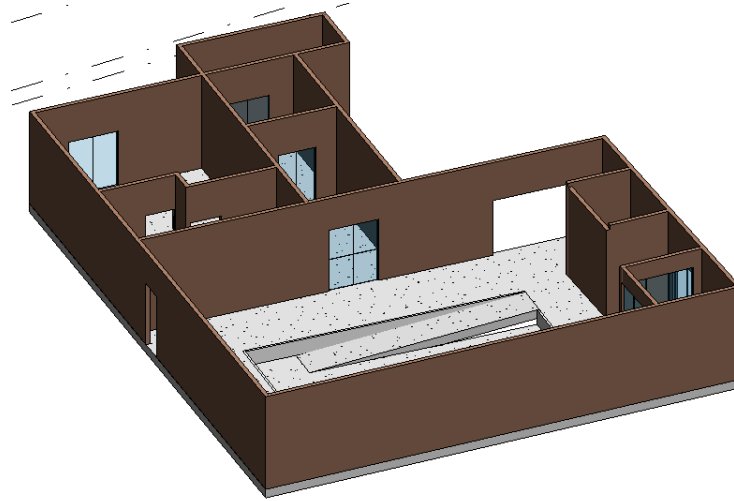


Figura 104. Modelo 3D resultante del levantamiento con iPhone. Fuente: elaboración propia

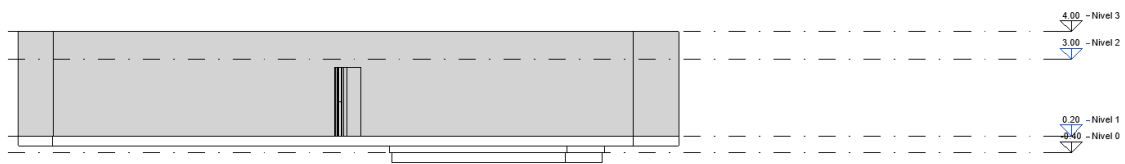


Figura 105. Alzado Este modelo levantamiento con iPhone. Fuente: elaboración propia.

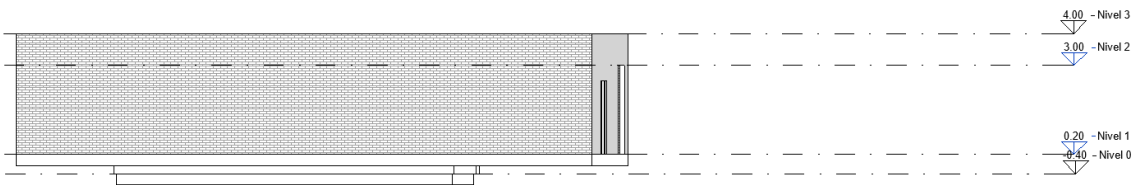


Figura 106. Alzado Norte modelo levantamiento con iPhone. Fuente: elaboración propia.

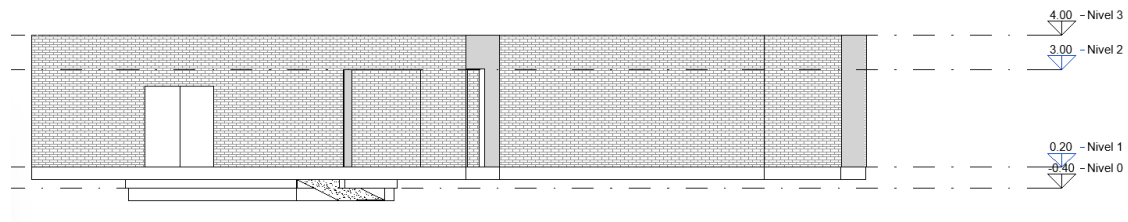


Figura 107. Alzado Oeste modelo levantamiento con iPhone. Fuente: elaboración propia.

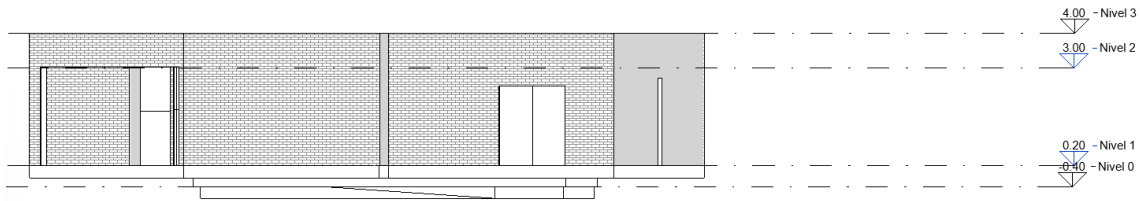


Figura 108. Alzado Sur modelo levantamiento con iPhone. Fuente: elaboración propia.

5. 5. Resultados del levantamiento con Dron LiDAR UAV

El levantamiento realizado con el sistema DJI Matrice 350 RTK equipado con el sensor Zenmuse L2 permitió obtener una nube de puntos de alta densidad del volumen exterior del Laboratorio de Mezclas. La naturaleza aérea del levantamiento con un vuelo a 90 m de altitud y una densidad de captura de 105 puntos por m² determinó tanto las fortalezas como las limitaciones del resultado obtenido como se observa en la Figura 109.



Figura 109. Vista general de la nube de puntos Dron LiDAR del Laboratorio de Mezclas perspectiva exterior. Fuente: elaboración propia.

La nube de puntos obtenida documenta con alta precisión las fachadas, la cubierta y el volumen exterior general de la edificación, permitiendo extraer mediciones de alturas de muro y dimensiones exteriores generales. A partir de esta información fue posible modelar los muros perimetrales del laboratorio en Revit, estableciendo sus posiciones, longitudes y alturas exteriores. Sin embargo, la condición de levantamiento exclusivamente aéreo impidió la captura de los elementos interiores del laboratorio pisos, rampas y espacios interiores no son accesibles desde la trayectoria de vuelo, por lo que estos elementos no pudieron ser modelados a partir de esta fuente, además al ser el vuelo a alturas elevadas algunos vanos de las fachadas externas no eran visibles en la nube de puntos y si se acerca mucho la nube para la modelación hay mucha dispersión de ellos. El modelo resultante con esta técnica corresponde únicamente a la envolvente exterior de la edificación, complementaria pero no sustituta de un levantamiento interior, el modelo completo y sus vistas se puede observar en las Figuras 110, 111, 112, 113, 114.

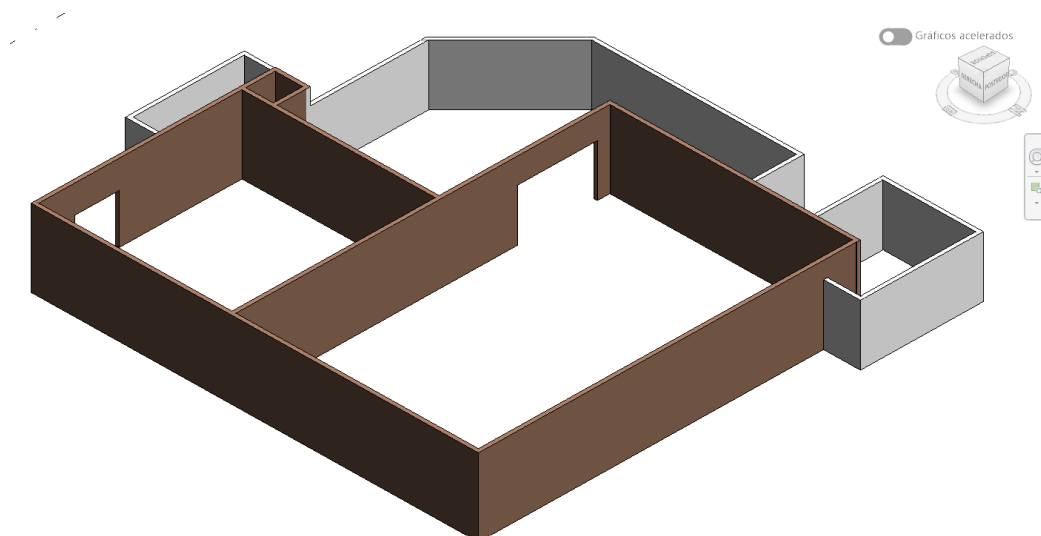


Figura 110. Modelo 3D resultante del levantamiento con Dron LiDAR. Fuente: elaboración propia

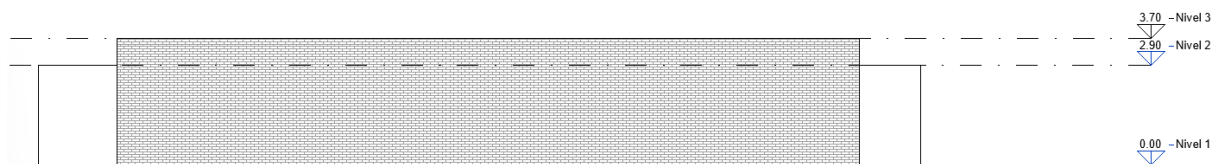


Figura 111. Alzado Este modelo levantamiento con Dron LiDAR. Fuente: elaboración propia.

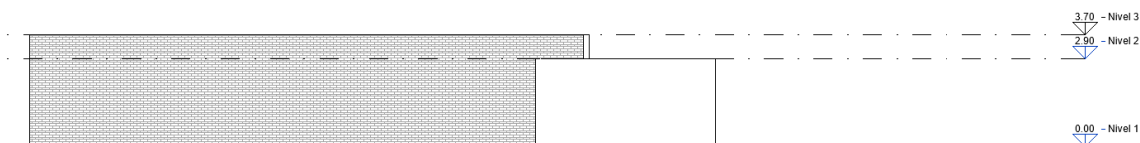


Figura 112. Alzado Norte modelo levantamiento con Dron LiDAR. Fuente: elaboración propia.

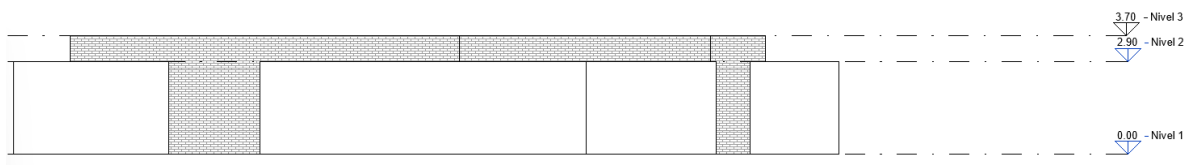


Figura 113. Alzado Oeste modelo levantamiento con Dron LiDAR. Fuente: elaboración propia.

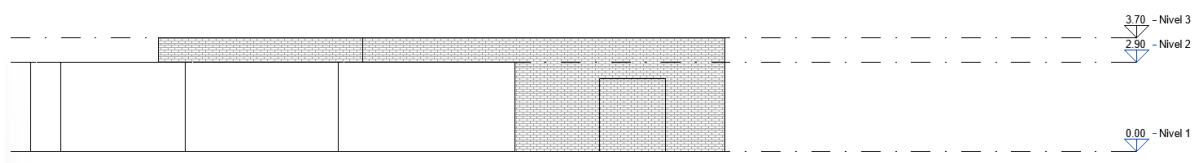


Figura 114. Alzado Sur modelo levantamiento con Dron LiDAR. Fuente: elaboración propia.

5. 6. Análisis Comparativo de Técnicas

Los resultados obtenidos con las cuatro técnicas de levantamiento aplicadas en el Laboratorio de Mezclas permiten establecer una comparación directa de su desempeño en términos de cobertura, capacidad de modelado, posibilidad de extracción de mediciones y densidad de la nube de puntos generada.

5. 6. 1. Cobertura y elementos modelables

La diferencia más determinante entre las cuatro técnicas evaluadas reside en la cobertura espacial que cada una es capaz de ofrecer y en los elementos que, como consecuencia, pueden ser representados en el modelo BIM. El SLAM LiDAR fue la única técnica que permitió documentar la edificación de manera integral interior y exterior, resultando en el modelo paramétrico más completo de los cuatro obtenidos. El iPhone LiDAR cubrió exclusivamente el interior, ofreciendo una representación completa de los espacios interiores, pero sin información del volumen exterior. El Dron LiDAR UAV cubrió exclusivamente el exterior fachadas y cubierta, sin datos de ningún elemento interior como pisos, tabiques o rampas. La Cámara 360° por su parte ofrece detalle de los elementos interiores donde se pueden modelar puerta, vanos, espacios, sin embargo al ser fotos internas no se puede ver los materiales externos de los muros, por lo cual se debe hacer mas amplio el levantamiento, así mismo por estos detalles se pierden lugares como los baños del laboratorio, un cuarto que está en la parte posterior y en medio de la distorsión de puntos no se puede ver una oficina dentro del laboratorio por lo que no es posible modelarla.

La Tabla 2 evalúa la calidad y cobertura general mediante cinco niveles: *Excelente* cuando el resultado es óptimo y cubre el criterio en su totalidad sin limitaciones; *Bueno* cuando el resultado es adecuado con limitaciones menores que no afectan la utilidad del dato para el modelado; *Regular* cuando el resultado es parcial y las limitaciones restringen el uso del dato o requieren complemento de otra fuente; *Deficiente* cuando el resultado no es utilizable para modelado puede ser por geometría incorrecta o cobertura mínima.

Tabla 2. Evaluación de cobertura y elementos modelables por técnica de levantamiento. Fuente: elaboración propia.

<i>Elemento</i>	<i>SLAM LiDAR</i>	<i>Cámara 360°</i>	<i>iPhone LiDAR</i>	<i>Dron LiDAR</i>
<i>Muros Exteriores</i>	Excelente	Regular	Deficiente	Excelente
<i>Muros Interiores</i>	Excelente	Bueno	Excelente	Regular
<i>Pisos</i>	Excelente	Excelente	Bueno	Deficiente
<i>Vanos</i>	Regular	Bueno	Regular	Regular
<i>Cubierta</i>	Deficiente	Deficiente	Deficiente	Excelente

Fuente: elaboración propia

La calificación regular de los vanos en el levantamiento con SLAM responde a los espacios visualizados en campo como lo fueron 2 vanos de puertas que en la nube de puntos no fueron visibles por lo que no fue posible modelarlos, y deficiente en cubierta ya que, aunque se alcanza a tomar puntos de la cubierta por la parte interna, realmente no hay cobertura completa de cubiertas utilizando este método. En el caso del iPhone LiDAR, la calificación Deficiente para los muros exteriores refleja la superposición de superficies identificada en ese sector de la nube, que impidió su uso como referencia para el modelado, para pisos Bueno por lo mismo que los pisos de la zona de patios no se pudo modelar debido a la rotación de algunos puntos, y en temas de cubierta igualmente Deficiente ya que no es un método que abarque las cubiertas al utilizarlo. En cuanto al Dron LiDAR la nube de la estructura externa es excelente y para dibujar la planta del edificio, en muros externos fue posible realizarlos de buena manera e internos que fueran visibles también desde la parte externa, pero en cuanto a pisos, divisiones internas, vanos internos es deficiente ya que no se miran y en cuanto a vanos externos son pocos los visibles en la nube de puntos.

5. 6. 2. *Propiedades de la nube de puntos por técnica*

Una diferencia fundamental entre las cuatro técnicas evaluadas reside en la naturaleza y riqueza de los atributos que cada una asocia a cada punto de la nube. Esta característica determina no solo la calidad geométrica del levantamiento, sino también la cantidad de información semántica que puede integrarse directamente en el modelo HBIM sin procesamiento adicional. La Tabla 3 sintetiza los atributos disponibles en la nube de puntos generada por cada técnica.

Tabla 3. Propiedades de la nube de puntos por técnica de levantamiento

<i>Propiedad</i>	<i>SLAM LiDAR</i>	<i>Cámara 360°</i>	<i>iPhone LiDAR</i>	<i>Dron LiDAR</i>
<i>Coordenadas (x,y,z)</i>	✓	✓	✓	✓
<i>Color (RGB)</i>	✓	✓	✓	✓
<i>Intensidad de retorno</i>	✓	X	X	✓
<i>Número de retorno</i>	X	X	X	✓
<i>Clasificación</i>	X	X	X	✓

Fuente: elaboración propia con base en DJI (2023); Teppati Losè et al. (2022); Turchetti et al. (2026).

Al evaluar las distintas técnicas, la diferencia fundamental no está únicamente en la densidad de puntos, sino en la riqueza de las propiedades que cada punto contiene. Esta distinción es importante para el modelado HBIM, ya que define qué tanta información semántica puede integrarse al modelo sin requerir procesos de post-procesamiento tan extensos.

Como se observa en la Tabla 3, el Dron LiDAR sobresale por su alta capacidad informativa. Además de capturar coordenadas (x, y, z) y color, su capacidad para registrar múltiples retornos es una ventaja decisiva para el levantamiento patrimonial, ya que permite filtrar la vegetación y aislar la estructura física del bien, reduciendo la complejidad de la limpieza de datos. Asimismo, el registro de la intensidad de retorno proporciona un parámetro objetivo para la caracterización de

materiales, facilitando la detección de patologías o discontinuidades superficiales como humedades o daños en los paramentos de manera independiente a las condiciones lumínicas del entorno.

Por otro lado, las técnicas basadas en fotogrametría, como la Cámara 360° e iPhone LiDAR, son eficaces para el registro visual mediante la captura de texturas RGB; sin embargo, tienen la limitación de la ausencia de datos de intensidad. Al no basarse en la emisión de pulsos láser, estas nubes carecen de la información física que permite diferenciar materiales por su reflectividad, limitando su uso a análisis principalmente geométricos y visuales.

Finalmente, el SLAM LiDAR se posiciona como una solución técnica intermedia. Aunque no alcanza la clasificación automática o el registro de retornos múltiples propios de los sistemas aéreos, aporta información de intensidad, lo cual resulta valioso en el levantamiento de interiores. Este atributo permite establecer un mayor contraste entre materiales, facilitando la segmentación de elementos arquitectónicos durante el proceso de modelado.

5. 6. 3. *Indicadores de rendimiento operativo*

En las Tablas 4, 5, 6 y 7 se presentan los indicadores de rendimiento operativo de cada técnica, permitiendo la comparación directa del flujo de trabajo completo desde la captura hasta el modelo BIM y en la Tabla 8 se resumen los resultados mas relevantes por técnica.

Tabla 4. Indicadores de rendimiento SLAM LiDAR.

<i>Indicador</i>	<i>Valor</i>	<i>Interpretación</i>
<i>Área total levantada</i>	490,81 m ²	Superficie documentada del Laboratorio de Mezclas (área medida mediante Revit)
<i>Tiempo de captura SLAM</i>	30 min (0,50 h)	Tiempo de recorrido móvil con el SatLab SL9 RTK
<i>Rendimiento de captura SLAM</i>	981,62 m ² /h	Productividad de la captura móvil sin incluir control GNSS

Indicador	Valor	Interpretación
<i>Tiempo de control GNSS RTK</i>	30 min (0,50 h)	Tiempo adicional para tres puntos de control
<i>Tiempo total de campo</i>	60 min (1,00 h)	Captura SLAM + control GNSS RTK
<i>Rendimiento operativo de campo</i>	490,81 m ² /h	Productividad considerando levantamiento y georreferenciación
<i>Preprocesamiento en Sat-LiDAR</i>	3 h	Descarga y conversión de la información SLAM a formato .LAS
<i>Trabajo en CloudCompare</i>	1 h	Ajuste, filtrado, segmentación y depuración de la nube
<i>Indexación en ReCap Pro</i>	15 min (0,25 h)	Conversión de la nube depurada a formato .RCP
<i>Modelado BIM en Revit</i>	2–3 h	Modelado as-built según experticia del modelador y tamaño del edificio
<i>Tiempo total estimado de gabinete</i>	6,25–7,25 h	Procesamiento, filtrado, indexación y modelado
<i>Tiempo total estimado del flujo</i>	7,25–8,25 h	Campo + gabinete hasta modelo BIM as-built
<i>Rendimiento global del flujo</i>	59,49–67,70 m ² /h	Productividad considerando todo el proceso hasta modelo BIM
<i>Puntos de control GNSS</i>	3 puntos	Base para ajuste espacial en CloudCompare
<i>RMS de ajuste</i>	0,33 m	Tolerable para gestión general; no para metrología fina

Fuente: elaboración propia.

Tabla 5. Indicadores de rendimiento Cámara 360°

Indicador	Valor	Interpretación
<i>Área documentada</i>	164,97 m ²	Superficie documentada del Laboratorio de Mezclas (área medida mediante Revit)
<i>Tiempo de captura en campo</i>	20 min (0,33 h)	Tiempo de toma de fotografías dentro del laboratorio
<i>Rendimiento de captura Cámara 360°</i>	499,91 m ² /h	Productividad de la captura sin incluir control GNSS
<i>Tiempo de control GNSS RTK</i>	30 min (0,50 h)	Tiempo adicional para tres puntos de control

Indicador	Valor	Interpretación
<i>Tiempo total de campo</i>	50 min (0,83)	Captura Cámara 360°+ control GNSS RTK
<i>Rendimiento operativo de campo</i>	198,76 m²/h	Productividad considerando levantamiento y georreferenciación
<i>Exportación en Insta360 Studio</i>	30 min (0,50 h)	Conversión a JPG equirrectangular
<i>Procesamiento en Metashape</i>	1-2 h	Alineación + modelo 3D + textura (16.384 px)
<i>Trabajo en CloudCompare</i>	1 h	Limpieza, georreferenciación
<i>Indexación en ReCap Pro</i>	15 min (0,25 h)	Conversión a formato .RCP
<i>Modelado BIM en Revit</i>	2–3 h	Modelado parcial — solo interior
<i>Tiempo total estimado de gabinete</i>	4,75 – 6,75 h	Procesamiento, filtrado, indexación y modelado
<i>Tiempo total estimado del flujo</i>	5,58 – 7,58 h	Campo + gabinete hasta modelo BIM
<i>Rendimiento global del flujo</i>	29,56 – 21,76 m²/h	Productividad considerando todo el proceso hasta modelo BIM
<i>Puntos de control GNSS</i>	3 puntos	Base para ajuste espacial en CloudCompare
<i>RMS de ajuste</i>	0,81 m	Alto (limitación significativa de precisión)

Fuente: elaboración propia.

Tabla 6. Indicadores de rendimiento iPhone LiDAR.

Indicador	Valor	Interpretación
<i>Área documentada</i>	326,86 m²	Superficie documentada del Laboratorio de Mezclas (área medida mediante Revit)
<i>Tiempo de captura en campo</i>	40 min (0,66 h)	Tiempo de levantamiento de datos con iPhone interior y exterior
<i>Rendimiento de captura iPhone</i>	495,24 m²/h	Productividad de la captura sin incluir control GNSS
<i>Tiempo de control GNSS RTK</i>	30 min (0,50 h)	Tiempo adicional para tres puntos de control
<i>Tiempo total de campo</i>	70 min (1,16 h)	Captura Cámara iPhone+ control GNSS RTK
<i>Rendimiento operativo de campo</i>	281,78 m²/h	Productividad considerando levantamiento y georreferenciación
<i>Pre-procesamiento y exportación Polycam</i>	40 min (0,66 h)	Procesamiento en la aplicación de levantamiento y exportación

Indicador	Valor	Interpretación
<i>Procesamiento en Blender</i>	30 min (0,50 h)	Conversión de malla .GLTF a nube de puntos RGB
<i>Trabajo en CloudCompare</i>	1 h	Limpieza, georreferenciación
<i>Indexación en ReCap Pro</i>	15 min (0,25 h)	Conversión a formato .RCP
<i>Modelado BIM en Revit</i>	1-2 h	Modelado parcial, solo interior
<i>Tiempo total estimado de gabinete</i>	3,41 – 4,41 h	Procesamiento, filtrado, indexación y modelado
<i>Tiempo total estimado del flujo</i>	4,57 – 5,57 h	Campo + gabinete hasta modelo BIM
<i>Rendimiento global del flujo</i>	71,52 – 58,68 m ² /h	Productividad considerando todo el proceso hasta modelo BIM
<i>Puntos de control GNSS</i>	3 puntos	Base para ajuste espacial en CloudCompare
<i>RMS de ajuste</i>	0,35	Aceptable para documentación general; precisión comparable a la obtenida con SLAM.

Fuente: elaboración propia.

Tabla 7. Indicadores de rendimiento Dron LiDAR UAV.

Indicador	Valor	Interpretación
<i>Área documentada</i>	470,41 m ²	Superficie documentada del Laboratorio de Mezclas (área medida mediante Revit)
<i>Tiempo de captura en campo</i>	30 min (0,5 h)	Tiempo de levantamiento de datos con Dron
<i>Rendimiento de captura Dron LiDAR</i>	940,82 m ² /h	Productividad de la captura sin incluir control GNSS
<i>Tiempo de control GNSS RTK</i>	30 min (0,50 h)	Tiempo adicional para puntos de control
<i>Tiempo total de campo</i>	60 min (1 h)	Captura Cámara Dron LiDAR+ control GNSS RTK
<i>Rendimiento operativo de campo</i>	470,41 m ² /h	Productividad considerando levantamiento y georreferenciación
<i>Procesamiento en DJI Terra</i>	1-2 h	Procesamiento en software del equipo
<i>Trabajo en CloudCompare</i>	30 min (0,50 h)	Georreferenciación
<i>Indexación en ReCap Pro</i>	15 min (0,25 h)	Conversión a formato .RCP
<i>Modelado BIM en Revit</i>	1-2 h	Modelado parcial exterior

<i>Indicador</i>	<i>Valor</i>	<i>Interpretación</i>
<i>Tiempo total estimado de gabinete</i>	2,75 – 4,75 h	Procesamiento, filtrado, indexación y modelado
<i>Tiempo total estimado del flujo</i>	4,57 – 5,57 h	Campo + gabinete hasta modelo BIM
<i>Rendimiento global del flujo</i>	102,93 – 84,45 m ² /h	Productividad considerando todo el proceso hasta modelo BIM
<i>Puntos de control GNSS</i>	3 puntos	Base para ajuste espacial en CloudCompare
<i>RMS de ajuste</i>	0,64	Moderadamente alto; afectado por la baja visibilidad de los puntos de control desde el aire.

Fuente: elaboración propia.

Tabla 8. Resumen indicadores de rendimiento

<i>Indicador</i>	<i>SLAM LiDAR</i>	<i>Cámara 360°</i>	<i>iPhone LiDAR</i>	<i>Dron LiDAR</i>
<i>Área total levantada (m²)</i>	490,81	164,97	326,86	470,41
<i>Rendimiento operativo de campo (m²/h)</i>	490,81	198,76	281,78	470,41
<i>Tiempo total estimado de gabinete (h)</i>	6,25–7,25	4,75 – 6,75	3,41 – 4,41	2,75 – 4,75
<i>Tiempo total estimado del flujo (h)</i>	7,25–8,25	5,58 – 7,58	4,57 – 5,57	4,57 – 5,57
<i>Rendimiento global del flujo (m²/h)</i>	59,49 - 67,70	21,76- 29,56	58,68 - 71,52	84,45 - 102,93
<i>RMS de ajuste (m)</i>	0,33	0,81	0,35	0,64

Fuente: elaboración propia.

Los indicadores de rendimiento operativo sintetizados en las Tablas 4 a 8 permiten evaluar cada técnica en términos de eficiencia operativa un criterio relevante cuando se plantea la aplicación de estas metodologías en contextos patrimoniales reales con recursos humanos y temporales limitados. En cuanto al área documentada, el SLAM LiDAR alcanzó la mayor cobertura con 490,81 m² prácticamente la totalidad de la superficie del Laboratorio de Mezclas seguido del Dron LiDAR UAV con 470,41 m². El iPhone LiDAR documentó 326,86 m² correspondientes al interior del laboratorio, y la Cámara 360° registra el valor más bajo con 164,97 m², dato que

requiere una lectura cuidadosa: durante el levantamiento con esta técnica solo quedaron sin modelar los baños y un pequeño cuarto externo de dimensiones reducidas, espacios cuya contribución al área total no es tan alta. En otras palabras, la Cámara 360° estuvo físicamente presente en prácticamente los mismos espacios que las demás técnicas, y aun así el área modelada representa apenas el 34% de la documentada por el SLAM LiDAR. Esto indica que el problema no es de cobertura espacial sino de calidad geométrica de la reconstrucción: las distorsiones propias de la proyección esférica, la baja densidad de la nube fotogramétrica resultante y la pérdida de continuidad superficial en zonas de cambio brusco de plano produjeron una malla fragmentada e incompleta que omitió grandes porciones de las superficies incluso en los espacios que sí fueron capturados.

El rendimiento operativo de campo que relaciona el área documentada con el tiempo total invertido en campo incluyendo la toma de puntos de control GNSS RTK posiciona al Dron LiDAR UAV como la técnica más eficiente con 470,41 m²/h, seguido del SLAM LiDAR con 490,81 m²/h. El iPhone LiDAR alcanzó 281,78 m²/h y la Cámara 360° 198,76 m²/h. Sin embargo, este indicador debe leerse con cautela: el rendimiento de campo del Dron es alto porque el vuelo cubre grandes áreas en poco tiempo, pero su cobertura es exclusivamente exterior; el SLAM, en cambio, documenta interior y exterior en ese mismo tiempo.

El tiempo total de gabinete invierte el orden de eficiencia: el Dron LiDAR UAV requiere entre 2,75 y 4,75 horas de procesamiento posterior, seguido del iPhone LiDAR con 3,41 a 4,41 horas. La Cámara 360° demanda entre 4,75 y 6,75 horas el peso del procesamiento fotogramétrico en Metashape es significativo y el SLAM LiDAR presenta el mayor tiempo de gabinete con 6,25 a 7,25 horas, principalmente por el preprocesamiento en Sat-LiDAR que insume 3 horas.

Considerando el rendimiento global del flujo que integra campo y gabinete hasta el modelo BIM terminado el Dron LiDAR UAV lidera con 84,45 a 102,93 m²/h, seguido del iPhone LiDAR con 58,68 a 71,52 m²/h y el SLAM LiDAR con 59,49 a 67,70 m²/h. La Cámara 360° presenta el rendimiento global más bajo con apenas 21,76 a 29,56 m²/h, resultado que combina su limitada cobertura real con el tiempo de procesamiento fotogramétrico requerido.

En cuanto al RMS de georreferenciación, los resultados muestran diferencias relevantes entre las técnicas. El SLAM LiDAR y el iPhone LiDAR obtuvieron los valores más bajos y consistentes, con 0,33 m y 0,35 m respectivamente, un margen tolerable para documentación general y gestión patrimonial. Por su parte, el Dron LiDAR presentó un RMS de 0,64 m. Este valor, más alto de lo esperado para un sistema aéreo de esta categoría, responde directamente a una dificultad operativa: los puntos de control de georreferenciación ubicados en el laboratorio no resultaron suficientemente visibles en la nube de puntos capturada desde el aire. Finalmente, la Cámara 360° registró el error de ajuste más alto con 0,81 m, lo que representa una limitación significativa en la precisión geométrica de la nube resultante.

Esta particularidad operativa del Dron LiDAR permite establecer una recomendación metodológica que en levantamientos híbridos o multitécnica, es indispensable emplear puntos de control o dianas con dimensiones y contrastes reflectantes específicos, que garanticen su correcta identificación en nubes de puntos de diferentes resoluciones y desde distintas perspectivas de captura (aérea y terrestre).

5. 6. 4. *Análisis de mediciones geométricas*

En la Tabla 9 se pueden observar las mediciones geométricas tomadas en el laboratorio y las de cada modelo y en la Tabla 10 se recopilan los resultados de EA y ER para cada dato tomado.

Tabla 9, Datos de medidas reales y de cada técnica analizada.

Dato	Medida real (m)	Medida SLAM (m)	Medida Cámara 360° (m)	Medida iPhone (m)	Medida Dron LiDAR (m)
Nivel 0	-0,634	-0,450	-0,270	-0,400	N/A
Nivel 2	2,906	2,940	2,000	3,000	2,900
Nivel 3	3,650	3,700	2,310	4,000	3,700
L1	18,576	18,692	11,906	18,251	18,584
L2	21,930	21,882	14,177	20,957	21,792
L3	3,878	3,897	2,400	3,914	3,900
L4	8,132	8,125	5,107	7,739	8,142
L5	10,304	10,289	6,271	10,014	10,268
L6	10,004	10,054	6,193	9,858	10,033
L7	1,981	1,930	1,204	1,900	2,145
L8	12,222	12,225	7,607	11,256	12,192
L9	9,320	9,354	4,816	9,259	9,336
h1	2,300	2,292	1,443	2,243	2,313
h2	2,388	2,402	1,461	2,283	2,364
e1	0,160	0,162	0,141	0,164	0,162
e2	0,143	0,147	0,119	0,137	0,155

Fuente: elaboración propia.

Tabla 10. Resultados EA y ER para cada dato

Dato	EA SLAM (m)	EA Cámara 360° (m)	EA iPhone (m)	EA Dron LiDAR (m)	ER% SLAM (m)	ER% Cámara 360° (m)	ER% iPhone (m)	ER% Dron LiDAR (m)
Nivel 0	0,184	0,364	0,234	N/A	29,02%	57,41%	36,91%	N/A
Nivel 2	0,034	0,906	0,094	0,006	1,16%	31,18%	3,22%	0,22%
Nivel 3	0,050	1,340	0,350	0,050	1,37%	36,71%	9,59%	1,37%
L1	0,116	6,670	0,325	0,008	0,62%	35,91%	1,75%	0,04%
L2	0,048	7,753	0,973	0,138	0,22%	35,35%	4,44%	0,63%
L3	0,019	1,478	0,036	0,022	0,49%	38,11%	0,93%	0,57%
L4	0,007	3,025	0,393	0,010	0,09%	37,20%	4,83%	0,12%
L5	0,015	4,033	0,290	0,036	0,15%	39,14%	2,81%	0,35%
L6	0,050	3,811	0,146	0,029	0,50%	38,09%	1,46%	0,29%
L7	0,051	0,777	0,081	0,164	2,57%	39,22%	4,09%	8,28%
L8	0,003	4,615	0,966	0,030	0,02%	37,76%	7,90%	0,25%
L9	0,034	4,504	0,061	0,016	0,36%	48,33%	0,65%	0,17%
h1	0,008	0,857	0,057	0,013	0,35%	37,26%	2,48%	0,57%
h2	0,014	0,927	0,105	0,024	0,59%	38,82%	4,40%	1,01%
e1	0,002	0,019	0,004	0,002	1,25%	11,88%	2,50%	1,25%
e2	0,004	0,024	0,006	0,012	2,80%	16,78%	4,20%	8,39%

Fuente: elaboración propia.

Los resultados resumidos se presentan en la Tabla 11.

Tabla 11. Resultados estadísticos de precisión geométrica por técnica de levantamiento.

Indicador	SLAM LiDAR	Cámara 360°	iPhone LiDAR	Dron LiDAR
<i>n</i>	16	16	16	15
<i>Error mínimo (m)</i>	0,002	0,019	0,004	0,002
<i>Error máximo (m)</i>	0,184	7,753	0,973	0,164
<i>Error medio MAE (m)</i>	0,040	2,569	0,258	0,037
<i>Error Relativo medio ER (%)</i>	2,60%	36,20%	5,76%	1,57%
<i>RMSE (m)</i>	0,061	3,475	0,392	0,060
<i>Clasificación de precisión</i>	Alta	Baja	Media	Alta

Fuente: elaboración propia.

Los resultados confirman cuantitativamente las tendencias identificadas cualitativamente en los apartados anteriores. El SLAM LiDAR y el Dron LiDAR UAV presentan el desempeño más consistente del conjunto, con RMSE de 0,061 m y 0,060 m respectivamente y errores relativos medios de 2,60% y 1,57%. Esta coherencia es consistente con el RMS de georreferenciación obtenido en el Capítulo 5 para ambas técnicas (0,33 m y 0,64 m respectivamente), y confirma que, en ausencia de TLS, estas dos técnicas ofrecen la mayor fiabilidad dimensional entre las evaluadas.

El iPhone LiDAR presenta un desempeño intermedio, con un error medio de 0,258 m, un error relativo de 5,76% y un RMSE de 0,392 m aproximadamente seis veces el del SLAM, lo que refleja las limitaciones de rango y precisión del sensor. Aun así, su error máximo (0,973 m) se mantiene dentro de un orden de magnitud manejable para documentación general, lo que la posiciona como una alternativa aceptable de bajo costo cuando no se requiere exactitud milimétrica.

La Cámara 360° presenta el desempeño más deficiente en todos los indicadores evaluados: un error medio de 2,569 m, un error relativo medio de 36,20% y un RMSE de 3,475 m, con un error

máximo individual de 7,753 m registrado en la longitud L2. Estos valores son coherentes con el RMS de georreferenciación más alto del conjunto (0,81 m) reportado en la sección 5.3, y confirman cuantitativamente que las limitaciones de esta técnica no derivan de una falta de cobertura espacial como se discutió en anteriores secciones sino de una deficiente reconstrucción geométrica de las superficies capturadas mediante fotogrametría esférica, esto como se mencionó anteriormente se pudo deber a que no se georreferenció cada punto de captura de fotogrametría.

En síntesis, el análisis de precisión geométrica establece el siguiente orden de fiabilidad dimensional entre las técnicas y en las condiciones evaluadas: SLAM LiDAR $\approx$ Dron LiDAR UAV > iPhone LiDAR > Cámara 360°. Este ordenamiento es consistente tanto con los indicadores de rendimiento operativo presentados en las Tablas 4 a 8 como con los valores de RMS de georreferenciación y respalda directamente la recomendación técnica establecida para esta investigación: el TLS permanece como el referente de precisión de la disciplina HBIM, y entre las alternativas evaluadas empíricamente en condiciones reales de disponibilidad institucional, el SLAM LiDAR y el Dron LiDAR UAV son las que ofrecen mayor fiabilidad dimensional cuando el TLS no está disponible.

6. FLUJO DE TRABAJO Y PROTOCOLOS PARA HBIM EN BIC

Los capítulos anteriores de esta investigación desarrollaron dos líneas de trabajo complementarias que confluyen en el presente capítulo. Por un lado, la documentación histórica de la Iglesia La Merced permitió caracterizar en detalle las particularidades constructivas, materiales y documentales de un BIC colonial de Cali, revelando al mismo tiempo los vacíos de información que cualquier proceso de digitalización patrimonial debe atender. Por otro lado, la evaluación comparativa de cuatro técnicas de levantamiento en el Laboratorio de Mezclas aportó evidencia empírica sobre el desempeño real de cada tecnología en términos de cobertura, precisión, riqueza de atributos y eficiencia operativa. Este capítulo sintetiza ambas líneas en una propuesta concreta: un flujo de trabajo y un conjunto de protocolos para la captura, procesamiento e integración de información orientados a la generación de modelos HBIM de Bienes de Interés Cultural, respondiendo directamente al tercer objetivo específico de esta investigación.

La propuesta se estructura en dos dimensiones. La primera es específica para la Iglesia La Merced: traduce las particularidades identificadas en su documentación histórica materiales, sistemas constructivos, complejidad espacial y vacíos documentales en criterios concretos de selección de técnicas y decisiones de modelado. La segunda es transferible a otros BIC coloniales con características similares: los protocolos definidos se formulan de manera que puedan adaptarse a diferentes bienes, recursos institucionales y niveles de detalle requeridos, constituyendo un marco metodológico replicable en el contexto latinoamericano.

6. 1. Criterios de selección de técnicas de levantamiento para BIC

La selección de las técnicas de levantamiento para la documentación de un BIC no puede basarse exclusivamente en la disponibilidad de equipos ni en la preferencia tecnológica del equipo investigador: debe responder a las particularidades físicas, espaciales e institucionales del bien

específico y a los objetivos del modelo HBIM que se busca generar. Los resultados del Capítulo 5 permiten establecer un conjunto de criterios técnicos que orientan esta decisión de manera sistemática.

El primer criterio es la cobertura requerida. Si el BIC demanda documentación simultánea de interior y exterior como ocurre con cualquier iglesia colonial cuyo valor patrimonial reside tanto en su nave y capillas como en sus fachadas y cubierta ninguna técnica individual es suficiente. El SLAM LiDAR ofrece la cobertura más completa en una sola sesión, pero su capacidad para documentar cubiertas desde el nivel del suelo es limitada; el Dron LiDAR UAV complementa esta limitación con precisión, aunque sin acceso al interior. La combinación de ambas técnicas usando los mismos puntos de control GNSS RTK como sistema de referencia común constituye el flujo óptimo para edificaciones de esta naturaleza.

El segundo criterio es el nivel de detalle ornamental. Los elementos decorativos de las iglesias coloniales de Cali portadas barrocas, retablos, molduras, arcos y capiteles requieren una densidad de nube de puntos superior a la necesaria para la documentación volumétrica general. Para estos elementos, la combinación de TLS o SLAM LiDAR con fotogrametría terrestre de alta resolución ofrece los mejores resultados, dado que la fotogrametría captura textura y color con mayor fidelidad que el LiDAR solo. No obstante, el TLS presenta limitaciones de acceso debido a sus altos costos; por ello, el SLAM LiDAR y la fotogrametría terrestre se consolidan como opciones viables y con mayor accesibilidad para el levantamiento de estos detalles.

El tercer criterio son las restricciones institucionales y de acceso. Las iglesias coloniales activas con comunidades religiosas residentes, horarios de culto y espacios con acceso condicionado favorecen los sistemas de captura continua y rápida como el SLAM LiDAR sobre los equipos que requieren posicionamiento fijo en múltiples estaciones, como el TLS. Las

restricciones de vuelo de drones en centros históricos urbanos pueden basarse en los edificios aledaños, las restricciones de la ciudad, pero en cuanto a espacio no es tan difícil el vuelo.

El cuarto criterio es el presupuesto disponible. Para instituciones o investigaciones con recursos limitados, el iPhone LiDAR representa la opción de menor costo para la documentación de interiores con precisión aceptable, mientras que el SLAM LiDAR disponible en varias universidades colombianas ofrece una alternativa de gama media que supera significativamente la calidad del iPhone sin alcanzar los costos del TLS o del Dron LiDAR. La Cámara 360°, aunque económica, demostró limitaciones geométricas que la descalifican como técnica principal para fines de modelado HBIM. La Tabla 12 sintetiza la idoneidad de cada técnica evaluada en esta investigación según los criterios descritos, aplicada específicamente al contexto de las iglesias coloniales de Cali.

Tabla 12. Matriz de selección de técnicas para la documentación de BIC coloniales.

Criterio	SLAM LiDAR	Cámara 360°	iPhone LiDAR	Dron LiDAR UAV
<i>Cobertura interior compleja</i>	Excelente	Bueno	Bueno	No aplica
<i>Cobertura exterior y cubierta</i>	Bueno	Regular	Deficiente	Excelente
<i>Captura de ornamentación</i>	Bueno	Regular	Deficiente	Regular
<i>Adaptabilidad a restricciones de acceso</i>	Excelente	Excelente	Excelente	Regular
<i>Riqueza de atributos por punto</i>	Bueno	Regular	Regular	Excelente
<i>Costo de implementación</i>	Medio	Bajo	Bajo	Alto
<i>Precisión en alturas</i>	Bueno	Deficiente	Regular	Excelente
<i>Rendimiento global del flujo</i>	Medio	Bajo	Medio	Alto
<i>Adecuación como técnica principal</i>	Recomendada	No recomendada	Complementaria	Recomendada

Fuente: elaboración propia con base en los resultados del Capítulo 5

Para la Iglesia La Merced específicamente, el flujo óptimo de levantamiento combina el SLAM LiDAR como técnica principal para la documentación interior; nave, capillas, sacristía, claustro y dependencias conventuales con el Dron LiDAR UAV para la documentación de las fachadas exteriores, la torre y la cubierta. El iPhone LiDAR podría emplearse como técnica complementaria en zonas de acceso restringido o espacios muy reducidos donde el equipo SLAM no pueda maniobrar con facilidad. La Cámara 360° quedaría reservada para la generación de recorridos virtuales y documentación fotográfica general del interior, sin participar en el flujo de modelado paramétrico.

6. 2. Flujo de trabajo recomendado para la digitalización de BIC mediante HBIM

El flujo de trabajo propuesto organiza el proceso de digitalización en siete etapas secuenciales, desde el diagnóstico documental inicial hasta la validación del modelo HBIM entregable. Cada etapa tiene un propósito definido, insumos requeridos y productos esperados que garantizan la trazabilidad del proceso y la coherencia del modelo final, este flujo de trabajo puede aplicarse en cualquier BIC pero se especifica en ciertas partes cosas puntuales de la Iglesia La Merced ya que en esta se pudo realizar la Etapa 0.

Es importante señalar que el flujo incorpora el Escaneo Láser Terrestre (TLS) como técnica principal recomendada para la documentación de interiores y fachadas, en coherencia con los estándares de la disciplina HBIM avalados por la totalidad de los casos de estudio internacionales revisados en el Capítulo 2. Si bien el TLS no fue evaluado en la fase experimental de esta investigación por razones de disponibilidad institucional, su inclusión en el flujo responde a un criterio técnico y no a una condición de los equipos empleados: un protocolo de trabajo orientado a la documentación patrimonial de alta exigencia no puede prescindir de la técnica que garantiza la precisión geométrica requerida para el modelado. Las técnicas evaluadas en campo se articulan

en el flujo como complementos con roles específicos y verificados, no como sustitutos del TLS.

La Figura 115 presenta el diagrama de flujo completo.

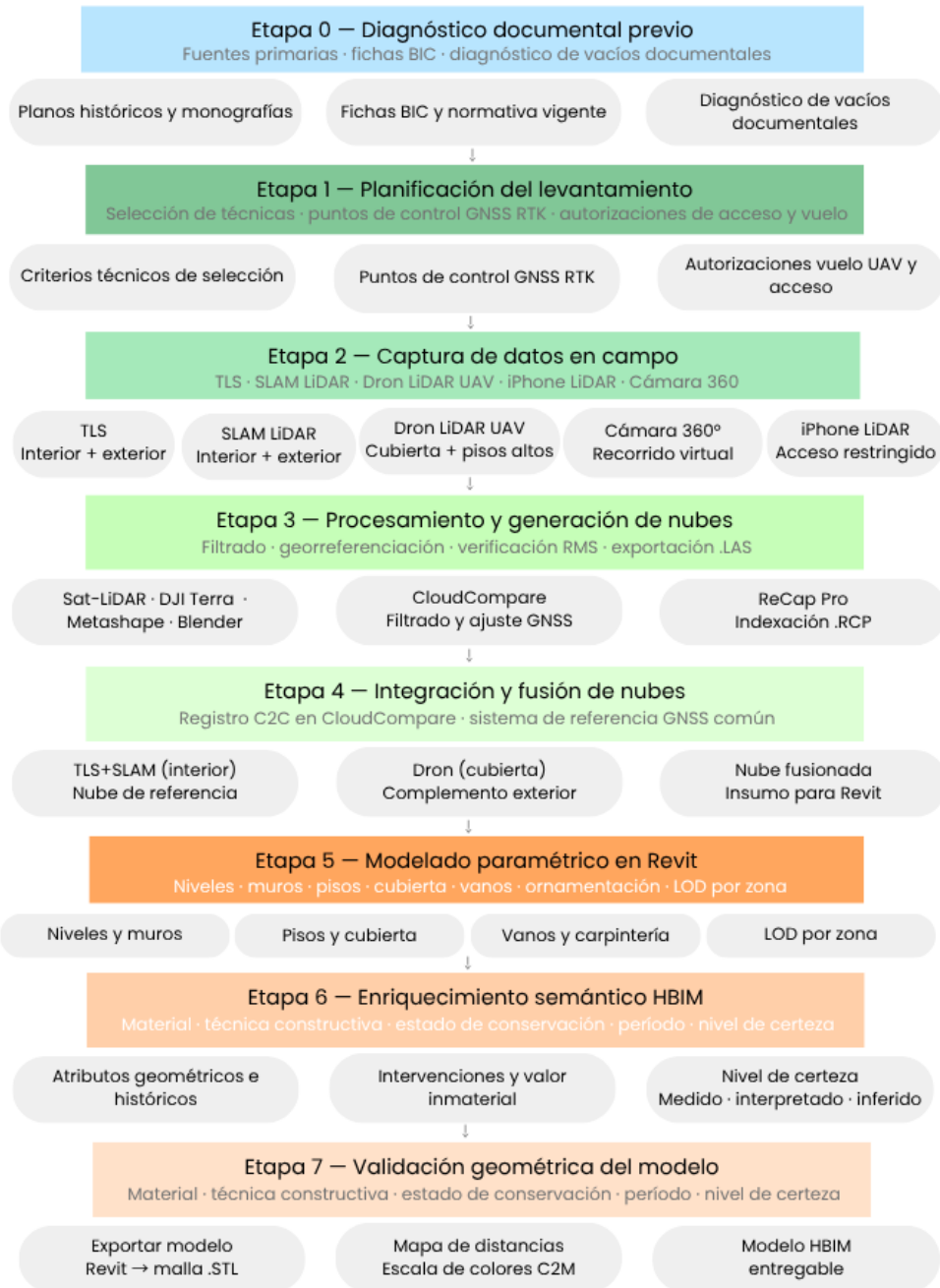


Figura 115. Diagrama de flujo vertical con las siete etapas. Fuente: elaboración propia.

6. 2. 1. *Etapla 0: Diagnóstico documental previo al levantamiento*

Antes de cualquier intervención técnica en campo, debe realizarse una revisión sistemática de toda la información preexistente sobre el bien. Esta etapa, que en la práctica convencional suele omitirse o realizarse de manera superficial, es determinante para la calidad y completitud del modelo HBIM resultante: la información histórica no es un complemento decorativo del modelo sino un atributo semántico fundamental que diferencia el HBIM del simple modelado geométrico.

El diagnóstico documental comprende la revisión de fuentes primarias; planos originales, monografías de restauración, fotografías históricas y documentación oral de administradores, y fuentes secundarias e institucionales; fichas técnicas BIC, decretos de declaratoria, estudios académicos previos y cartografía disponible en portales de datos abiertos. El resultado de esta etapa es un diagnóstico del estado documental del bien que identifica: qué información existe y en qué formato, qué períodos constructivos están documentados y cuáles no, qué elementos del bien tienen información técnica confiable y cuáles son desconocidos, y qué nivel de LOD es alcanzable con la información disponible. En el caso de La Merced, este diagnóstico fue realizado durante las visitas de campo de febrero de 2026 y sus resultados se presentan en el Capítulo 4 de esta investigación.

6. 2. 2. *Etapla 1: Planificación del levantamiento*

Con base en el diagnóstico documental, se planifica el levantamiento definiendo las técnicas a emplear, los parámetros de captura de cada una y la estrategia de integración entre ellas. Cuando el TLS esté disponible, debe ocupar el primer lugar en la planificación como técnica principal para la documentación de interiores y fachadas, definiendo la distribución de estaciones y el porcentaje de solapamiento entre ellas. Las técnicas complementarias como lo son Dron LiDAR UAV, SLAM LiDAR e iPhone LiDAR se planifican en función de las zonas que el TLS no puede cubrir eficientemente: cubierta, zonas de alta movilidad requerida y espacios de acceso muy restringido.

Esta etapa incluye la selección y materialización de los puntos de control GNSS RTK, que deben distribuirse de manera que garanticen la georreferenciación de todas las técnicas a un mismo sistema de referencia. Los puntos de control deben estar ubicados en posiciones estables, visibles desde múltiples zonas del levantamiento y señalizados de manera que sean identificables en todos los levantamientos ejecutados.

Para la Iglesia La Merced, la planificación debe considerar adicionalmente las restricciones de uso del espacio propias de una comunidad religiosa activa horarios de misa, espacios de clausura y zonas museísticas con restricción de acceso y verificar las normativas de vuelo de drones aplicables al centro histórico de Cali antes de incluir el Dron LiDAR UAV en el plan. La distribución de estaciones TLS debe contemplar la complejidad espacial del conjunto: la nave principal, el arco toral, las capillas laterales, la sacristía y el claustro requieren posiciones de escáner específicas para garantizar la cobertura de sus superficies sin oclusiones.

6. 2. 3. *Etapa 2: Captura de datos en campo*

La captura de datos en campo se ejecuta siguiendo los protocolos específicos de cada técnica definidos en la Etapa 1. El Escaneo Láser Terrestre (TLS) constituye la técnica principal recomendada para la documentación de interiores y fachadas en el flujo HBIM para BIC coloniales: su precisión milimétrica, la densidad de nube generada y la robustez de su integración en plataformas BIM lo convierten en el estándar de la disciplina, avalado por los casos de estudio internacionales revisados en el Capítulo 2 de esta investigación.

Las técnicas complementarias se incorporan al flujo para resolver las limitaciones del TLS convencional desde el nivel del suelo. El Dron LiDAR UAV documenta la cubierta y las zonas altas de fachada que el TLS no alcanza con suficiente cobertura; debe ejecutarse en condiciones meteorológicas adecuadas ausencia de viento fuerte y luz diurna una vez verificado el

levantamiento terrestre. El SLAM LiDAR actúa como alternativa al TLS cuando este no está disponible institucionalmente, o como complemento en recorridos de gran longitud donde el número de estaciones TLS requeridas haría inviable el levantamiento: su captura continua sin necesidad de posicionamiento fijo reduce significativamente el tiempo en campo en espacios de gran extensión como el claustro o las dependencias conventuales. El iPhone LiDAR se reserva para zonas de acceso muy restringido donde ni el TLS ni el SLAM pueden operar. La Cámara 360° no participa en el flujo de modelado paramétrico y se emplea exclusivamente para documentación fotográfica general y generación de recorridos virtuales. Al finalizar cada sesión de captura, debe realizarse una verificación visual de la nube de puntos en campo para identificar zonas con cobertura insuficiente y ejecutar recapturas antes de abandonar el sitio.

6. 2. 4. *Etapas 3: Procesamiento y generación de nubes de puntos*

Los datos capturados en campo son procesados en las plataformas correspondientes para generar las nubes de puntos definitivas de cada técnica. Para el TLS, el procesamiento primario se realiza en el software del fabricante del equipo antes de exportar al flujo común en CloudCompare. Para las técnicas complementarias, los flujos de software son los descritos en la sección 3.2 de esta investigación. En todos los casos, el procesamiento incluye la descarga de datos, la aplicación de algoritmos de filtrado y limpieza, la georreferenciación mediante los puntos de control GNSS RTK, que deben ser visibles para cada técnica que se utilice y suficientes para alcanzar una mayor precisión, la exportación en formato .LAS como formato estándar compatible con las plataformas HBIM.

Una consideración crítica en esta etapa es la verificación del RMS de ajuste obtenido en la georreferenciación, valores muy altos de RMS deben interpretarse como señal de alerta que puede indicar problemas en la distribución de los puntos de control, errores en su identificación en la nube

o limitaciones inherentes a la técnica empleada. En ningún caso debe procederse al modelado paramétrico con una nube que no haya superado satisfactoriamente la verificación de georreferenciación, por ello la importancia de tomar mayor cantidad de puntos de control con estación total.

6. 2. 5. *Etapa 4: Integración y fusión de nubes de puntos*

Cuando se emplean múltiples técnicas de levantamiento como se recomienda para la Iglesia La Merced las nubes de puntos individuales deben fusionarse en una nube unificada antes de proceder al modelado. Esta fusión se puede realizar en CloudCompare mediante un registro nube-a-nube (C2C) utilizando como sistema de referencia común los puntos de control GNSS RTK compartidos entre técnicas, para que todos tengan un amarre desde los mismos puntos y se pueda alcanzar mayor precisión.

La nube del TLS actúa como nube de referencia principal en la fusión, dado que ofrece la mayor precisión geométrica del conjunto. Cuando el TLS no esté disponible, la nube del SLAM LiDAR asume ese rol como la alternativa de mayor cobertura y menor RMS de las técnicas complementarias evaluadas, pero este no se puede utilizar para HBIM ya que no es tan preciso, serviría para tener un modelo detallado teniendo en cuenta las limitaciones de precisión. En ambos casos, el proceso de fusión no implica la superposición total de todas las nubes sino una integración selectiva: la nube de referencia aporta la información interior completa y los planos de fachada a nivel del suelo, mientras que la nube del Dron LiDAR UAV agrega exclusivamente la información de cubierta y las zonas superiores de fachada no capturadas desde el nivel del suelo. Este enfoque selectivo, equivalente al empleado por Aricò et al. (2023) en las iglesias de Palermo, evita la redundancia de datos y mantiene la coherencia geométrica del conjunto. En los casos donde se emplee iPhone LiDAR como complemento en zonas de acceso restringido, su nube se incorpora

como capa adicional referenciada a la nube principal, no como sustituto de ninguna de las técnicas anteriores.

6. 2. 6. *Etapa 5: Modelado paramétrico en Revit*

El modelado paramétrico se desarrolla en Autodesk Revit utilizando la nube de puntos integrada como referencia. Previo al inicio del modelado propiamente dicho, debe realizarse una planeación del modelado que establezca los criterios que regirán todo el proceso y garantizarán la coherencia y utilizabilidad del modelo resultante. Esta planeación comprende la definición de los siguientes elementos:

La plantilla de modelado que centraliza las convenciones de nomenclatura, los sistemas de clasificación de elementos y los parámetros de proyecto específicos para BIC. Las familias paramétricas de los elementos arquitectónicos propios del bien arcos, bóvedas, elementos ornamentales, sistemas de cubierta que no existen en las bibliotecas estándar de Revit y deben crearse o adaptarse antes de iniciar el modelado. Los usos del modelo, es decir, para qué fines se empleará el HBIM resultante documentación patrimonial, planificación de intervenciones, mantenimiento programado o difusión ya que estos determinan qué información debe estar disponible en el modelo y con qué nivel de detalle.

La asignación del LOD a cada elemento del modelo debe responder a dos factores: la calidad de los datos de levantamiento disponibles para ese elemento y el uso previsto del modelo. Dependiendo del objetivo final del modelo, variará el nivel de detalle y la información requerida; por ejemplo, si el uso está orientado a la gestión administrativa, el inventario patrimonial o la divulgación cultural, se requiere un nivel de detalle moderado. En contraste, si el modelo se empleará para análisis estructurales, simulaciones de vulnerabilidad o proyectos de restauración arquitectónica, es indispensable alcanzar un alto grado de precisión geométrica y de detalle

constructivo. La Tabla 13 presenta una estrategia de LOD zonificado como la aplicada por Babakhani (2025) en el Palazzo Reale permite concentrar el esfuerzo de modelado donde la calidad de los datos lo justifica y donde el uso del modelo lo requiere, evitando tanto la simplificación excesiva en zonas críticas como el sobredimensionamiento de zonas secundarias.

Tabla 13. LOD recomendado por elemento para BIC

<i>Elemento</i>	<i>LOD recomendado</i>	<i>Técnica principal</i>	<i>Técnica complementaria</i>	<i>Atributos mínimos requeridos</i>
<i>Muros exteriores</i>	300	TLS	SLAM + Dron LiDAR	Material, técnica constructiva, período, estado de conservación
<i>Muros interiores</i>	300	TLS	SLAM	Material, técnica constructiva, período, patologías visibles
<i>Cubierta</i>	200–300	Dron LiDAR + TLS	SLAM	Sistema estructural, material de cubrimiento, SLAM para la parte estructural de la cubierta de manera interna.
<i>Pisos</i>	200-300	TLS	SLAM	Material original, intervenciones previas
<i>Vanos (puertas y ventanas)</i>	300	TLS	SLAM	Dimensiones, carpintería, período de instalación
<i>Arco toral y arcos interiores</i>	300–400	TLS	SLAM	Material, geometría, estado de conservación
<i>Torre campanario</i>	300	TLS + Dron LiDAR	SLAM	Materiales por período constructivo, intervenciones
<i>Altars y retablos</i>	300	TLS + Fotogrametría	SLAM + iPhone	Descripción histórica, estado, referencia fotográfica
<i>Elementos ornamentales</i>	350-400	TLS + Fotogrametría	SLAM + iPhone	Dimensión, material, ubicación, geometría
<i>Capillas laterales</i>	300	TLS	SLAM	Configuración espacial, materiales
<i>Claustro y convento</i>	200	TLS	SLAM	Configuración espacial, períodos constructivos

Fuente: elaboración propia con base en Babakhani (2025) y Murphy et al. (2013).

6. 2. 7. *Etapa 6: Enriquecimiento semántico del modelo HBIM*

Una vez completado el modelado geométrico, cada elemento del modelo debe enriquecerse con los atributos no geométricos que lo convierten de un modelo BIM convencional en un modelo HBIM. Estos atributos incluyen como mínimo: material original identificado en fuentes primarias, técnica constructiva, período histórico de construcción, estado de conservación actual, intervenciones previas documentadas, fuente de la información y fecha del último relevamiento. Para elementos cuya información no está disponible o es incierta, debe registrarse explícitamente el nivel de incertidumbre, siguiendo el principio propuesto por Babakhani (2025) de distinguir entre lo medido, lo interpretado y lo desconocido.

6. 2. 8. *Etapa 7: Validación geométrica del modelo*

Al finalizar el enriquecimiento semántico, se realiza una validación geométrica del modelo mediante la comparación nube-a-malla (C2M) en CloudCompare, exportando el modelo de Revit como malla en formato .STL y superponiéndolo con la nube de puntos de referencia. Esta comparación genera un mapa de distancias con escala de colores que permite identificar las zonas del modelo con mayor desviación respecto al levantamiento real y cuantificar el error de representación por tipo de elemento.

6. 3. Limitaciones y consideraciones para la implementación en BIC

Toda propuesta metodológica de esta naturaleza debe reconocer explícitamente sus límites para que quien la aplique pueda calibrar adecuadamente sus expectativas y decisiones. En cuanto a las limitaciones técnicas; el flujo propuesto establece el TLS como técnica principal recomendada para la documentación de BIC mediante HBIM; sin embargo, esta investigación no contó con acceso a un equipo TLS durante la fase experimental, lo que constituye la limitación técnica más

significativa del trabajo: los resultados empíricos presentados en el Capítulo 5 reflejan el desempeño de cuatro alternativas complementarias SLAM LiDAR, Dron LiDAR UAV, iPhone LiDAR y Cámara 360° pero no permiten establecer una comparación directa entre dichas alternativas y el TLS en las mismas condiciones de levantamiento. Esta comparación queda planteada como línea de trabajo futura. El RMS de georreferenciación obtenido con la técnica de mayor precisión entre las evaluadas 0,33 m para el SLAM LiDAR es tolerable para gestión patrimonial general pero significativamente superior al que el TLS alcanza en condiciones estándar ($< 0,01$ m), esto se puede deber a los puntos limitados de control y a que en el software se identifican de manera visual lo que puede generar errores significativos y depende de la persona que esté procesando la nube, lo que implica que los modelos generados exclusivamente con las técnicas evaluadas en esta investigación son insuficientes para metrología de precisión o para cálculos estructurales, Asimismo, se recomienda realizar un análisis comparativo de precisión incorporando una mayor cantidad de puntos de control, lo que permitirá una evaluación más rigurosa utilizando herramientas de procesamiento como Python, para evitar el error por imprecisión humana. Si el modelo HBIM va a utilizarse como base para análisis estructural o intervenciones de consolidación, el TLS con puntos de control topográficos de alta exactitud es indispensable y no puede sustituirse por las alternativas evaluadas. El flujo propuesto asume además la disponibilidad simultánea de al menos dos técnicas complementarias: en contextos donde solo se disponga de una, el modelo resultante será inevitablemente parcial en cobertura o en precisión, y debe comunicarse con claridad qué zonas del bien quedan sin documentar y por qué.

Tabla 14. Recomendaciones por técnica aplicada

Técnica	Recomendaciones de Campo (Captura)	Recomendaciones de Procesamiento	Limitaciones / Consideraciones clave
SLAM LiDAR	Configurar correctamente la altura del bastón antes de iniciar para una altimetría precisa. Recorrido continuo e ininterrumpido por interior y exterior en una sola sesión. Reducir la velocidad al pasar por vanos/puertas, estrechos: pasar muy rápido genera pérdida de puntos en esas zonas	Si no hay amarre geodésico directo durante la captura (pérdida de señal GNSS en interiores), corregir en gabinete integrando los puntos de control. Verificar el RMS de ajuste; valores altos indican necesidad de más puntos de control.	No cubre bien la cubierta RMS obtenido (0,33 m) es tolerable para gestión general pero insuficiente para metrología de precisión o cálculos estructurales no sustituye al TLS. Mayor tiempo de gabinete por el preprocesamiento en software propio (~3 h).
Cámara 360°	Montar la cámara sobre bastón estabilizado a altura fija, usando disparador remoto para evitar vibraciones. Mantener iluminación uniforme; evitar reflejos especulares, sombras intensas, superficies brillantes/transparentes y objetos en movimiento. Capturar también desde el exterior, no solo desde el interior: si solo se toma desde adentro, no se obtiene el espesor real de los muros ni los materiales de la fachada exterior. Tomar puntos de control en cada punto de toma de fotogrametría.	Exportar en la mayor resolución posible y con compresión mínima. Retirar del modelo elementos no deseados (ej. conos de soporte que el algoritmo reconoce como sólidos).	Es la técnica con mayor RMS de ajuste (0,81 m) y mayor desviación en mediciones en este estudio para mejorar se recomienda ubicar sobre los puntos de control las tomas. El área realmente modelada puede ser muy inferior a la documentada (en el caso de estudio, solo 38% del área de muros vs. LiDAR) por baja calidad geométrica de la reconstrucción, no por falta de cobertura física. No recomendada como técnica principal de modelado HBIM; útil como complemento visual/documental (recorridos virtuales), en caso de no tener puntos de control si se tienen se debe evaluar su precisión geométrica.
iPhone LiDAR	Mantener buena iluminación y velocidad de desplazamiento moderada (ir muy rápido provoca pérdida de señal del sensor). Recorrer cada espacio de manera completa para asegurar cobertura de todos los puntos. Tener en cuenta el rango operativo limitado (~5 m), lo que afecta la precisión en espacios de mayor altura o amplitud.	Exportar en formato .GLTF (único disponible en versión gratuita de Polycam). No generar la nube de puntos directamente en CloudCompare desde el .GLTF : el muestreo directo pierde la información de color (queda en escala de grises). Usar otro software en este caso se usó Blender como paso intermedio para convertir la malla texturizada	Los datos del exterior suelen presentar sobreposición de superficies por múltiples pasadas del sensor, generando ruido y geometría inconsistente; se recomienda limitar el modelado a la volumetría interior y si se requiere exterior hacerlas por separado y luego unir las mediante software. Precisión decreciente en estructuras de mayor escala o complejidad; error acumulado

<i>Técnica</i>	<i>Recomendaciones de Campo (Captura)</i>	<i>Recomendaciones de Procesamiento</i>	<i>Limitaciones / Consideraciones clave</i>
		en nube de puntos conservando el atributo RGB por punto, antes de pasar a CloudCompare para georreferenciación y exportación a .LAS.	más notorio en niveles/alturas superiores.
Dron LiDAR UAV	Usar como referencia los mismos puntos de control empleados en los otros levantamientos, para mantener coherencia del sistema de referencia entre técnicas. Instalar la antena RTK a la mayor altura posible cuando el entorno esté rodeado de muros/paredes que limiten la visibilidad del cielo (en el caso de estudio, 2,50 m), para maximizar la recepción satelital. Seleccionar la altitud de vuelo como balance entre cobertura y densidad de puntos (a menor altitud, mayor densidad y precisión, pero menor cobertura).	Procesar los datos en el software propio del sistema antes de exportar a .LAS. Realizar limpieza de puntos no deseados en ReCap Pro antes de pasar a Revit, dado el gran volumen de puntos capturado. Recomendación metodológica clave: usar puntos de control con dimensiones y contraste reflectante específico, que garanticen su identificación clara en la nube capturada desde el aire en este proyecto el RMS fue más alto de lo esperado (0,64 m) precisamente porque los puntos de control no eran suficientemente visibles desde la perspectiva aérea.	Cubre exclusivamente el exterior (fachadas y cubierta); no captura pisos, divisiones internas ni rampas. A mayor altura de vuelo, algunos vanos de fachada dejan de ser visibles o se dispersan al acercarse la nube. Técnica de mayor costo y menor eficiencia en interiores, pero la de mejor rendimiento global del flujo (m ² /h) y mayor precisión en la poligonal exterior.

Fuente: elaboración propia.

Hablando de limitaciones institucionales; la aplicación del flujo en iglesias coloniales activas depende de la voluntad y disponibilidad de las instituciones administradoras para facilitar el acceso. La experiencia con La Merced donde el acceso fue posible gracias a la disposición de la comunidad de Misioneras Agustinas Recoletas y del bibliotecario institucional no puede asumirse como garantizada en otros bienes, la restricción en ese caso fue por el vuelo del dron y los permisos que se requerían para el sobrevuelo de la zona donde se encuentra ubicada. Las restricciones de vuelo de drones en centros históricos varían según la ciudad y deben verificarse caso a caso. Las

limitaciones de acceso a determinados espacios; coro, sacristía, zonas de clausura pueden impedir la cobertura completa del interior independientemente de la técnica empleada.

Consideraciones de sostenibilidad del modelo; un modelo HBIM que no se actualiza pierde rápidamente su utilidad como herramienta de gestión. Para que el modelo de La Merced o de cualquier otro BIC cumpla su función a largo plazo, debe adoptarse un protocolo de mantenimiento que establezca: quién es responsable de la actualización, con qué periodicidad se realizan inspecciones, qué tipos de cambios o deterioros activan una actualización y en qué formato se entrega el modelo actualizado a las autoridades patrimoniales. Sin este protocolo de mantenimiento, el modelo HBIM se convierte en un producto estático que replica las limitaciones de la documentación convencional que se busca superar.

En síntesis, el flujo de trabajo propuesto establece una ruta metodológica estructurada para la digitalización de Bienes de Interés Cultural (BIC), organizando el proceso desde el diagnóstico documental preliminar hasta la validación geométrica final. La articulación de esta metodología muestra que el TLS como técnica principal, complementado por el Dron LiDAR UAV para cubiertas y fachadas altas y por el SLAM LiDAR cuando el TLS no está disponible, constituye la configuración que mejor responde a las exigencias de precisión y cobertura de un flujo HBIM para BIC coloniales. Las técnicas evaluadas empíricamente en esta investigación SLAM, Dron, iPhone y Cámara 360° aportan evidencia sobre el rol que cada una puede desempeñar como complemento de ese flujo, en condiciones reales de disponibilidad institucional limitada. Más allá de la precisión en la captura espacial, el verdadero valor de este proceso radica en el enriquecimiento semántico del modelo, un paso muy importante para no solo tener una simple representación geométrica a una herramienta integral de gestión. Sin embargo, la viabilidad de esta implementación no depende exclusivamente del rigor técnico, sino también de la articulación institucional que facilite el acceso

a los bienes. En última instancia, para evitar que el modelo HBIM se convierta en un archivo digital estático, resulta importante la adopción de protocolos de actualización y mantenimiento continuo. Solo bajo estas premisas, la digitalización se considera como un activo dinámico para la conservación preventiva y la gestión sostenible del patrimonio.

7. CONCLUSIONES

- La documentación histórica de la Iglesia y Convento de La Merced evidenció que los BIC coloniales de Cali presentan particularidades constructivas y documentales que condicionan de manera determinante cualquier proceso de digitalización. Sus muros de tapia pisada y adobe de espesores considerables e irregulares exigen técnicas capaces de capturar simultáneamente la cara interior y la cara exterior para determinar el ancho real del elemento constructivo; ninguna técnica que acceda exclusivamente a uno de los dos paramentos ofrece información suficiente para el modelado paramétrico. La complejidad espacial del conjunto con; nave, capillas, sacristía, claustro y cubiertas a diferentes alturas, demanda cobertura integral interior y exterior, lo que descarta la aplicación de técnicas exclusivamente aéreas o exclusivamente terrestres como solución única.
- La presencia de comunidades religiosas activas con restricciones de acceso favorece los sistemas de captura continua y rápida sobre los equipos de estación fija. Y la dispersión documental identificada entre archivo físico, planos sin sistematizar y fuentes institucionales independientes, sin ninguna versión digitalizada a febrero de 2026 demuestra que el modelo HBIM no solo debe documentar la geometría del bien sino integrar en un único entorno toda la información histórica, normativa e inmaterial disponible, marcando explícitamente el nivel de certeza de cada dato. Estos criterios técnicos, derivados directamente del análisis del bien, constituyen el marco de referencia para la selección de técnicas y la estrategia de modelado en un BIC.
- El análisis comparativo confirmó que complementar técnicas no es una opción de optimización sino una condición necesaria para la documentación integral de edificaciones patrimoniales complejas. El flujo óptimo para el contexto de las iglesias coloniales de Cali

combina el TLS como técnica principal para la documentación de interiores y fachadas por ser el estándar de precisión reconocido de la disciplina HBIM con el Dron LiDAR UAV para la cubierta y las zonas altas de fachada inaccesibles desde el nivel del suelo. En contextos donde el TLS no esté disponible institucionalmente, el SLAM LiDAR constituye la alternativa de mayor versatilidad entre las técnicas evaluadas en esta investigación: su cobertura interior y exterior en una sola sesión, su menor RMS de georreferenciación respecto a las demás técnicas complementarias (0,33 m) y la riqueza de atributos que genera lo posicionan como el sustituto más adecuado, con la claridad de que su precisión no alcanza la del TLS.

- El flujo de trabajo Scan-to-HBIM estructurado en siete etapas secuenciales desde el diagnóstico documental hasta la validación geométrica del modelo constituye la principal contribución metodológica de esta investigación. El flujo establece el TLS como técnica principal recomendada para la documentación de BIC mediante HBIM, en coherencia con los estándares de la disciplina y con los casos de estudio internacionales revisados. Su diferencia fundamental respecto a los flujos descritos en la literatura internacional reside en que define con claridad dos escenarios de implementación: el escenario con TLS disponible flujo completo con máxima precisión y el escenario sin TLS disponible donde el SLAM LiDAR asume el rol de técnica terrestre principal con las implicaciones de precisión que esto conlleva. Esta doble definición responde directamente a las condiciones del contexto latinoamericano, donde la disponibilidad del TLS no puede asumirse como garantizada en todos los proyectos de documentación patrimonial, y donde las técnicas evaluadas empíricamente en esta investigación SLAM LiDAR, Dron LiDAR UAV, iPhone LiDAR y Cámara 360° aportan evidencia verificada sobre el desempeño real de las alternativas

disponibles. La estrategia de LOD zonificado que concentra el mayor nivel de detalle en los elementos mejor documentados y con mayor valor patrimonial permite mantener la coherencia metodológica del modelo sin comprometer la viabilidad del proyecto ante limitaciones de tiempo o recursos. El enriquecimiento semántico estructurado con atributos de material, técnica constructiva, período histórico, nivel de certeza y fuente documental convierte el modelo de una representación geométrica en un repositorio de conocimiento actualizable, capaz de soportar decisiones de conservación a lo largo del tiempo. La distinción explícita entre lo medido, lo interpretado y lo desconocido, incorporada como atributo de cada elemento, responde directamente a la dispersión documental identificada en La Merced y constituye una práctica que debería estandarizarse en todo proyecto HBIM de BIC en Colombia.

8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acuerdo N° 0373 DE 2014. (s.f.). *POR MEDIO DEL CUAL SE ADOPTA LA REVISIÓN ORDINARIA DE CONTENIDO DE LARGO PLAZO DEL PLAN DE ORDENAMIENTO TERRITORIAL DEL MUNICIPIO DE SANTIAGO DE CALI*. CONCEJO DE SANTIAGO DE CALI. Obtenido de <https://saul.cali.gov.co/pimu/pot/otros/Acuerdo%200373%20de%202014.pdf>
- Arango, S. (1989). *Historia de la arquitectura en Colombia (1.ª ed.)*. UNAL. Obtenido de <https://portaldelibros.unal.edu.co/gpd-historia-de-la-arquitectura-en-colombia-pilares-1-9789581700615.html>
- Aricò, M., Lo Brutto, M., & Maltese, A. (2023). A Scan-to-BIM Approach for the Management of Two Arab-Norman Churches in Palermo (Italy). *Heritage MDPI*. doi:<https://doi.org/10.3390/heritage6020087>
- Babakhani, H. (2025). *Enhancing HBIM Visualization and Multi-Scale Modeling for the Conservation of Palazzo Reale, Turin*. Politecnico di Torino. Obtenido de <https://webthesis.biblio.polito.it/36625/1/tesi.pdf>
- Barazzetti, L., Previtali, M., & Roncoroni, F. (2018). CAN WE USE LOW-COST 360 DEGREE CAMERAS TO CREATE ACCURATE 3D MODELS? *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. doi:<https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-69-2018>
- Barney, B. (26 de Marzo de 2024). *La Historia de Cali*. Obtenido de Cali Escribe: <https://caliescribe.com/2024/03/26/la-historia-de-cali-benjamin-barney-caldas-22/>
- BIM Forum. (2024). *Level of Development (LOD) Specification*. BIM Forum. Obtenido de <https://bimforum.org/resource/lod-level-of-development-lod-specification/>
- Bonilla, R., & Hincapie, R. (1999). La arquitectura de las iglesias y su importancia urbana en el Valle del Cauca. *Universidad del Valle*.
- Borona, V., & Colapietro, M. (2026). Performance Assessment of Portable SLAM-Based Systems for 3D Documentation of Historic Built Heritage. *MDPI*. doi:<https://doi.org/10.3390/s26020657>

- Chica, A., León, C., & Patiño, L. (2023). El estudio patológico en tiempos de Building Information Modeling: de la teoría a la práctica. *Revista de Arquitectura*. doi:<https://doi.org/10.14718/RevArq.2023.25.4265>
- Chieffo, N., Clementi, F., Formisano, A., & Lenci, S. (2019). Comparative fragility methods for seismic assessment of masonry buildings. *Journal of Building Engineering*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2019.100813>
- Choay, F. (2007). Alegoría del patrimonio. *Revista de Geografía Norte Grande*. doi:<http://dx.doi.org/10.4067/S0718-34022008000300008>
- Chun, A., Mohd, F., Abdullah, O., & Zulkarnaini, M. (2024). Comparison of As-Built Surveys Using Handheld Laser Scanner and Conventional Method. *Journal of Advanced Geospatial Science & Technology JAGST*.
- Congreso de la República de Colombia. (1959). *Ley 163 de 1959*. Obtenido de https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma_pdf.php?i=326
- Congreso de la República de Colombia. (1997). *Ley 397 de 1997*. Obtenido de https://patrimonio.mincultura.gov.co/legislacion/Documents/ley_397_de_1997.pdf
- Consejo de Europa. (1975). *Declaración de Ámsterdam*. Consejo de Europa. Obtenido de <http://icomos.es/wp-content/uploads/2020/01/19.DECLARACIONDEAMSTERDAM1975.pdf>
- Cruz, S. (21 de Agosto de 2025). Convento La Merced: 500 años de historia y el desafío del relevo generacional de sus monjas. *El País*. Obtenido de <https://www.elpais.com.co/cali/convento-la-merced-en-cali-500-anos-el-legado-de-las-primeras-monjas-y-el-riesgo-de-ser-las-ultimas-2154.html>
- Decreto 264 de 1963. (s.f.). Presidencia de la República de Colombia. Obtenido de <https://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=1307#:~:text=por%20el%20cual%20se%20reglamenta,monumentos%20p%C3%BAblicos%20de%20la%20Naci%C3%B3n>
- Decreto 763 de 2009. (s.f.). Ministerio de Cultura. Obtenido de https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma_pdf.php?i=35447

- Departamento Administrativo de Planeación Municipal de Santiago de Cali (DAPM). (2014). *Ficha BIC N-23: Iglesia y Convento de La Merced. En Plan de Ordenamiento Territorial del Municipio de Cali*. Obtenido de https://idesc.cali.gov.co/download/bic_2014/BICN-23.pdf
- Feilden, B., & Jukka, J. (2003). *Manual para el manejo de los sitios del Patrimonio Cultural Mundial*. ICCROM. Obtenido de https://www.iccrom.org/sites/default/files/2018-02/2003_feilden_manual_manejo_spa_85882_light.pdf
- Figueroa, E. (2011). *La torre y el convento : dos ejemplos de arquitectura religiosa de la colonia en el Valle del Cauca*. Cali: Universidad del Valle. Obtenido de <https://hdl.handle.net/10893/2240>
- Francel, A., & Ojeda, J. (2016). Interacciones conceptuales y estilísticas en la arquitectura del periodo republicano. Ibagué, Colombia, 1893-1945. *Arquitectura y Urbanismo*.
- Froner, Y., Gonçalves, W., Souza, L., Costa, A., Rosado, A., Mizrahy, A., . . . Hardy, T. (2024). Data Collection for Cultural Heritage Risk Management: the Damage Map through Heritage Building Information Modeling (HBIM) Project Applied to the Façade of St Francis of Assisi, Ouro Preto, Brazil. *Studies in Conservation*. doi:<https://doi.org/10.1080/00393630.2024.2379132>
- Galindo, J. (2011). Arquitectura mudéjar en la región del valle del Alto Cauca, Colombia (siglo XVIII): tipos y técnicas.
- Gamez, M. (2020). Arquitectura religiosa en la Nueva Granada. La catedral de Santa Marta durante el siglo XVIII. *Fronteras de la Historia*, 148-171.
- Günay, S. (2022). VIRTUAL REALITY FOR LOST ARCHITECTURAL HERITAGE VISUALIZATION UTILIZING LIMITED DATA. *International Society for Photogrammetry and Remote Sensing ISPRS*. doi:<https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVI-2-W1-2022-253-2022>
- ICCROM. (20 de Octubre de 2022). *Applying Digital Documentation for Sustainable Heritage Preservation and Management*. Obtenido de <https://www.iccrom.org/events/applying-digital-documentation-sustainable-heritage-preservation-and-management>

- IDESC. (2014). *Infraestructura de Datos Espaciales de Santiago de Cali*. Obtenido de Plan de Ordenamiento Territorial de Cali: <https://saul.cali.gov.co/pimu/pot/otros/Acuerdo%200373%20de%202014.pdf>
- Jimenez, S. (2009). *La arquitectura de Cali valoración histórica*. Cali: Universidad de San Buenaventura.
- Kędzior, P., Jagoda, M., Tysiąc, P., & Katzer, J. (2024). An Example of Using Low-Cost LiDAR Technology for 3D Modeling and Assessment of Degradation of Heritage Structures and Buildings. *materials MDPI*. doi:<https://doi.org/10.3390/ma17225445>
- Lin, G., Li, G., Giordano, A., Kun, S., Stendardo, L., & Yang, X. (2024). Three-Dimensional Documentation and Reconversion of Architectural Heritage by UAV and HBIM: A Study of Santo Stefano Church in Italy. *MDPI*. doi:<https://doi.org/10.3390/drones8060250>
- López, C., & Ruiz, D. (2010). *Bóvedas de madera y bahareque en iglesias coloniales bogotanas. Estudio de cuatro iglesias del siglo XVII*. Bogotá.
- López, F., Lerones, P., Llamas, J., Gómez, J., & Zalama, E. (2018). A Review of Heritage Building Information Modeling (H-BIM). *Multimodal Technologies and Interaction MDPI*. doi:<https://doi.org/10.3390/mti2020021>
- Ministerio de Cultura. (s.f.). *Ley 1185 de 2008*. Obtenido de https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma_pdf.php?i=29324
- Ministerio de Educación Nacional. (26 de Febrero de 1975). Decreto 285 de 1975 . *Por el cual se declara Monumento Nacional a la Iglesia y Convento de La Merced en la ciudad de Cali*. Obtenido de <https://www.suin-juriscol.gov.co/viewDocument.asp?ruta=Decretos/1066167>
- Misioneras Agustinas Recoletas. (01 de Junio de 2018). CONMEMORACIÓN DE LOS 40 AÑOS DE LA RESTAURACIÓN DE LA IGLESIA Y CONVENTO DE LA MERCED. Obtenido de <https://misionerasmar.org/conmemoracion-de-los-40-anos-de-la-restauracion-de-la-iglesia-y-convento-de-la-merced/>
- Moreno, J. C. (26 de Febrero de 2025). Los secretos del Complejo Religioso La Merced: desde el muro más antiguo de Cali hasta una virgen traída de las montañas. *El País*. Obtenido de

<https://www.elpais.com.co/cultura/complejo-religioso-la-merced-cumple-50-anos-como-monumento-nacional-una-historia-entre-muros-2632.html>

- Moyano, J., Justo, Á., Nieto, J., Ojeda, A., & María, F. (2022). Evaluation of records using terrestrial laser scanner in architectural heritage for information modeling in HBIM construction: The case study of the La Anunciación church (Seville). *Journal of Building Engineering*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.105190>
- Moyano, J., León, J., Nieto, J., & Bruno, S. (2021). Semantic interpretation of architectural and archaeological geometries: Point cloud segmentation for HBIM parameterisation. *Automation in Construction*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103856>
- Murphy, M., McGovern, & 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*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2012.11.006>
- Preciado, A., Ramirez, A., Santos, J., & Rodriguez, O. (2020). Seismic vulnerability assessment and reduction at a territorial scale on masonry and adobe housing by rapid vulnerability indicators: The case of Tlajomulco, Mexico. *International Journal of Disaster Risk Reduction*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2019.101425>
- Saba, N. (2021). Accuracy Assessment of Horizontal Measurements from LiDAR Available in Mobile Phones. *International Journal of Engineering Research & Technology IJERT*.
- Saldarriaga Roa, A. (1988). *Arquitectura y cultura en Colombia*. Fundación Jorge Tadeo Lozano. Obtenido de https://www.utadeo.edu.co/files/node/publication/field_attached_file/pdf-habitat_y_arq._pag.pdf
- Sebastian, S. (1965). *Arquitectura Colonial en Popayán y Valle del Cauca*. Cali: Universidad del Valle. doi:<https://doi.org/10.25100/peu.234>
- Sinisterra O'byrne, E. (1974). *Restauración de la Iglesia La Merced de Santiago de Cali*. Cali.
- Smith, L. (2006). *Uses of Heritage (1 st ed.)*. Routledge. doi:<https://doi.org/10.4324/9780203602263>

- Tello, M. (2013). *El proyecto de conservación integral del patrimonio inmueble: Enfoques conceptuales, reflexiones valorativas y apuntes metodológicos para la sustentabilidad integral del patrimonio inmueble*. Módulo Arquitectura CUC. Obtenido de <https://revistascientificas.cuc.edu.co/moduloarquitecturacuc/article/view/41>
- Teppati, L., Chiabrando, F., & Giulio, F. (2021). Documentation of Complex Environments Using 360° Cameras. The Santa Marta Belltower in Montanaro. *Remote Sensing MDPI*. doi:<https://doi.org/10.3390/rs13183633>
- Teppati, L., Spreafico, A., Chiabrando, F., & Giulio, F. (2022). Apple LiDAR Sensor for 3D Surveying: Tests and Results in the Cultural Heritage Domain. *Remote Sensing MDPI*. doi:<https://doi.org/10.3390/rs14174157>
- Tysiac, P., Sienska, A., Tarnowska, M., Piotr, K., & Jagoda, M. (2023). Combination of terrestrial laser scanning and UAV photogrammetry for 3D modelling and degradation assessment of heritage building based on a lighting analysis: case study—St. Adalbert Church in Gdansk, Poland. *Heritage Science*. doi:<https://doi.org/10.1186/s40494-023-00897-5>
- UNESCO. (1972). *Convención sobre la protección del patrimonio mundial, cultural y natural*. UNESCO. Obtenido de <https://whc.unesco.org/archive/convention-es.pdf>
- Vasilakos, C., Chatzistamatis, S., Roussou, O., & Soulakellis, N. (2018). TERRESTRIAL PHOTOGRAMMETRY VS LASER SCANNING FOR RAPID EARTHQUAKE DAMAGE ASSESSMENT. *isprs*. doi:<https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-3-W4-527-2018>
- Vásquez Benítez, E. (2001). *Historia de Cali en el siglo 20: Sociedad, economía, cultura y espacio*. Cali: Universidad del Valle.
- Zhang, Z., & Zou, Y. (2022). Research hotspots and trends in heritage building information modeling: A review based on CiteSpace analysis. *Humanities & Social Sciences Communications*. doi:<https://doi.org/10.1057/s41599-022-01414-y>