

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL
DE HUAMANGA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA DE MINAS, GEOLOGÍA Y
CIVIL**

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL



TESIS:

**Aplicación de métodos no invasivos en la detección y
análisis de daños en bienes patrimoniales, Ayacucho - 2024**

Para optar el título profesional de:

INGENIERO CIVIL

PRESENTADO POR:

Bach. Litman CCENTE GARZON

ASESOR:

Msc. Ing. Moisés Nico BARBARÁN ORIUNDO

AYACUCHO - PERÚ

2026

RESUMEN

La Iglesia Santa Teresa de Ayacucho, edificación patrimonial del siglo XVII, presenta deterioro progresivo en su envolvente exterior por acción de agentes biológicos, climáticos y antrópicos, sin contar con un diagnóstico técnico cuantitativo que sustente intervenciones de conservación preventiva. Ante esta problemática, la presente investigación tuvo como objetivo determinar el estado de conservación mediante el mapeo georreferenciado de patologías superficiales empleando fotogrametría UAV y reconstrucción tridimensional por *Structure from Motion* (SfM), complementada con modelado BIM. El estudio fue de tipo aplicado, con enfoque cuantitativo, alcance explicativo y diseño no experimental transversal. Como instrumento principal se utilizó el UAV *Autel Robotics XT705* con cámara de 50 MP, ejecutándose un plan de vuelo combinado de pasadas nadirales y oblicuas a 25 m AGL que garantizó la cobertura integral de todas las fachadas y la cubierta. Las 1,189 imágenes obtenidas fueron procesadas en *Agisoft Metashape Professional v2.3.1*, lográndose una tasa de alineación del 100 % y obteniéndose un ortomosaico georreferenciado en WGS 84 / UTM zona 18S + EGM2008 con resolución GSD de 2.46 mm/píx y una nube de puntos densa de 274,990,458 puntos. La validación métrica se realizó comparando tres fuentes independientes — medidas de campo, modelo BIM y planos CAD — arrojando $RMSE = 0.0641$ m, $r = 0.9991$ y $d = 0.9982$, confirmándose la precisión del método dentro del rango reportado en la literatura para levantamientos UAV-SfM sin GCP sobre edificaciones patrimoniales. Se identificaron y cuantificaron 66 polígonos distribuidos en cuatro tipologías: Biodeterioro (157.69 m², 99.46 %), desprendimiento (0.73 m²), erosión superficial (0.10 m²) y daño antrópico (0.0015 m²), con un área total afectada de 158.52 m², clasificados en tres niveles de severidad: Leve, moderado y severo. Se concluyó que la metodología UAV-SfM-BIM constituye una herramienta no invasiva, sistemática y métricamente precisa para el diagnóstico de patologías en patrimonio cultural edificado, determinándose un estado crítico en la cubierta principal con 118.40 m² de biodeterioro severo que requiere intervención inmediata, y un estado moderado en las fachadas, siendo un precedente técnico replicable para los bienes del Centro Histórico de Ayacucho.

Palabras clave: Evaluación no invasiva, fotogrametría UAV, *Structure from Motion* (SfM-MVS), inspección visual sistemática georreferenciada, patologías superficiales, patrimonio cultural edificado.

SUMMARY

The Santa Teresa Church in Ayacucho, a heritage building dating from the seventeenth century, exhibits progressive deterioration on its exterior envelope due to the combined action of biological, climatic and anthropic agents, without a quantitative technical diagnosis to support preventive conservation interventions. In response to this problem, the present research aimed to determine the conservation status of the building envelope through the georeferenced mapping of surface pathologies using UAV photogrammetry and three-dimensional reconstruction via *Structure from Motion* (SfM), complemented by BIM modelling. The study was applied in nature, with a quantitative approach, explanatory scope and non-experimental cross-sectional design. The primary instrument employed was the UAV *Autel Robotics XT705* with a 50 MP camera, by means of which a combined flight plan of nadir and oblique passes was executed at 25 m AGL, ensuring full coverage of all facades and the roof of the building. The 1,189 images obtained were processed in *Agisoft Metashape Professional v2.3.1*, achieving a 100 % alignment rate and producing a georeferenced orthomosaic in WGS 84 / UTM zone 18S + EGM2008 with a GSD resolution of 2.46 mm/px and a dense point cloud of 274,990,458 points. Metric validation was performed by comparing three independent sources — field measurements, BIM model and CAD survey plans — yielding $RMSE = 0.0641$ m, $r = 0.9991$ and $d = 0.9982$, confirming the geometric accuracy of the method within the range reported in the literature for UAV-SfM surveys without GCP on heritage buildings. A total of 266 polygons were identified and quantified across four pathology types: biodeterioration (157.69 m², 99.46 %), detachment (0.73 m²), surface erosion (0.10 m²) and anthropic damage (0.0015 m²), with a total affected area of 158.52 m², classified into three severity levels: low, moderate and severe. It was concluded that the UAV-SfM-BIM methodology constitutes a non-invasive, systematic and metrically accurate tool for the diagnosis of pathologies in built cultural heritage, with a critical conservation status identified on the main roof, where 118.40 m² of severe biodeterioration requires immediate intervention, and a moderate status recorded on the facades, making this study a replicable technical precedent for the heritage assets of the Historic Centre of Ayacucho.

Keywords: Non-invasive evaluation, UAV photogrammetry, *Structure from Motion* (SfM-MVS), systematic georeferenced visual inspection, surface pathologies, built cultural heritage.

INTRODUCCIÓN

La conservación del patrimonio cultural constituye una problemática multidimensional cuya complejidad trasciende las cifras de deterioro superficial que habitualmente la caracterizan. Detrás de cada bien patrimonial en estado de vulnerabilidad existe una cadena causal donde confluyen factores ambientales, antrópicos e institucionales: Fisuras originadas por sismos que se propagan sin ser monitoreadas, desprendimientos de revoques acelerados por ciclos de humedad y sequía, biodeterioro favorecido por la acumulación de materia orgánica en cornisas y paramentos, erosión provocada por vientos cargados de partículas abrasivas, y daños antrópicos generados por intervenciones informales sin sustento técnico. Estas condiciones se potencian mutuamente y configuran un escenario de deterioro irreversible que amenaza a más del 80 % del patrimonio cultural edificado a escala global, con una concentración desproporcionada en los países de ingresos bajos y medios donde la capacidad institucional de diagnóstico y respuesta es limitada. La pérdida de estos bienes no solo implica la destrucción de testimonios históricos irrecuperables, sino también el deterioro del capital cultural, identitario y turístico de las comunidades que los albergan.

En el Perú, los registros del Ministerio de Cultura documentan un universo patrimonial de extraordinaria riqueza que enfrenta un deterioro progresivo y sistemático. La Ley N° 28296 — Ley General del Patrimonio Cultural de la Nación — reconoce como bienes integrantes del patrimonio cultural a toda manifestación del quehacer humano de valor arqueológico, arquitectónico, histórico y artístico, cuya administración y supervisión corresponde al Ministerio de Cultura. Sin embargo, reducir la problemática al marco normativo sería desconocer sus verdaderos orígenes: Las edificaciones patrimoniales peruanas exhiben un nivel de vulnerabilidad que transforma los centros históricos en escenarios de pérdida cultural acelerada. Iglesias coloniales con bóvedas fisuradas sin diagnóstico técnico, fachadas con desprendimientos masivos de revoques históricos, muros con humedades activas no cuantificadas, e intervenciones de mantenimiento ejecutadas sin documentación previa del estado de conservación. Esta realidad se agrava por la ausencia de metodologías sistemáticas de inspección que permitan priorizar las acciones de conservación con criterio técnico, contexto en el que la reciente promulgación de la Ley N° 32094 evidencia el reconocimiento explícito del Estado peruano sobre la urgencia de atender el deterioro del patrimonio edificado nacional.

En la ciudad de Ayacucho, declarada Patrimonio Cultural de la Nación y reconocida por su extraordinaria concentración de arquitectura colonial barroca, todos estos factores se concentran y amplifican. El conjunto histórico de la ciudad alberga 33 iglesias coloniales construidas entre los siglos XVI y XVIII, cuyas estructuras de adobe, piedra y ladrillo artesanal acumulan siglos de deterioro sin haber sido objeto de un diagnóstico técnico integral. Las edificaciones patrimoniales ayacuchanas presentan patologías complejas originadas por la confluencia de la actividad sísmica propia de la zona sur-central andina, los

ciclos de humedad estacional, el biodeterioro favorecido por el microclima altoandino a 2 761 m s. n. m., y las intervenciones antrópicas informales acumuladas durante décadas. La Iglesia de Santa Teresa, inmueble de valor patrimonial excepcional ubicado en el Centro Histórico de Ayacucho, concentra estas problemáticas de manera emblemática, constituyendo un caso de estudio representativo donde la inspección técnica evidenció la presencia simultánea de desprendimientos, erosión, fisuras, humedad activa, biodeterioro y daños antrópicos distribuidos en la totalidad de sus paramentos, bóvedas y elementos ornamentales, validando la pertinencia del caso de estudio seleccionado.

Ante esta convergencia de factores, la presente investigación propone la aplicación de métodos no invasivos fotogrametría UAV, fotogrametría computacional SfM-MVS e inspección visual sistemática georreferenciada para la detección y análisis de daños en bienes patrimoniales edificados. A diferencia de los enfoques convencionales que requieren andamiaje, contacto directo con la superficie o instrumentación invasiva, los métodos no invasivos permiten documentar el estado de conservación con alta resolución espacial sin comprometer la integridad física del bien patrimonial.

La motivación que impulsa esta investigación se ancla en la necesidad de preservar la integridad física y cultural de los bienes patrimoniales ayacuchanos para las generaciones futuras. La ausencia de estudios de diagnóstico técnico no invasivo sobre la Iglesia de Santa Teresa representa una brecha metodológica que la presente investigación busca cubrir, demostrando que es posible adaptar técnicas fotogramétricas de precisión submilimétrica a las condiciones específicas del patrimonio edificado andino peruano.

El sistema metodológico integra la fotogrametría UAV para la documentación geométrica de alta fidelidad, la reconstrucción SfM-MVS para la generación de modelos tridimensionales densos, y la inspección visual sistemática georreferenciada para la clasificación y mapeo preciso de patologías, abordando de forma integral los múltiples factores que originan el deterioro patrimonial: Cuantifica la extensión superficial de cada categoría de daño, determina su localización exacta sobre el bien, y genera una cartografía patológica de precisión que constituye el insumo técnico fundamental para la planificación de intervenciones de conservación sustentadas en evidencia.

A quienes nunca midieron el esfuerzo para que yo pudiera llegar hasta aquí: mis padres, cuya entrega y fortaleza me enseñaron que los sueños se construyen con perseverancia. A mis hermanos, cómplices de cada jornada, por sostenerme con su confianza y alegría cuando el cansancio amenazaba con ganar la partida. Estas páginas llevan sus nombres grabados entre cada línea.

AGRADECIMIENTOS

El camino hacia la culminación de este trabajo no habría sido posible sin el aporte de personas e instituciones que marcaron cada etapa de este proceso.

En primer lugar, a la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga y a cada docente de la Escuela de Ingeniería Civil que, con su experiencia y vocación, me transmitieron no solo conocimientos técnicos sino también valores éticos que llevaré en el ejercicio profesional.

Al Mg. Ing. Moisés Nico Barbarán Oriundo, quien asumió la asesoría de esta investigación con dedicación y rigurosidad. Sus orientaciones metodológicas y su disposición para resolver cada consulta fueron determinantes para concretar los objetivos planteados.

Al Mg. Ing. Saúl Walter Retamozo Fernández y al Mg. Ing. Víctor Bellido Aedo, jurados evaluadores de esta tesis, por el tiempo invertido en la revisión del manuscrito y por cada observación formulada, las cuales permitieron fortalecer tanto el sustento teórico como la solidez de los resultados presentados.

A las amistades que se consolidaron durante la vida universitaria, por las noches de estudio compartidas, las discusiones técnicas y el aliento mutuo que hicieron de esta travesía una experiencia enriquecedora.

A mis padres y hermanos, pilar fundamental en cada decisión tomada, por creer en mí incluso cuando las circunstancias parecían adversas. Este logro les pertenece tanto como a mí.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE GENERAL	VIII
LISTA DE FIGURAS	XI
LISTA DE CUADROS	XV
1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	1
1.0.1 A nivel mundial	1
1.0.2 A nivel país	2
1.0.3 A nivel regional	3
1.1 Delimitación del problema	5
1.1.1 Espacial (geográfica)	5
1.1.2 Temporal.	6
1.1.3 Temática y unidad de análisis	7
1.2 Formulación del problema	9
1.2.1 Problema general	9
1.2.2 Problemas específicos	9
1.3 Justificación e importancia	9
1.4 Limitaciones de la investigación	11
1.5 Objetivos de la investigación	11
1.5.1 Objetivo general	11
1.5.2 Objetivos específicos	11
2 MARCO TEÓRICO	12
2.1 Antecedentes	12
2.1.1 Investigaciones internacionales.	12
2.1.2 Investigaciones nacionales	16
2.2 Bases teóricas	18
2.2.1 Detección y análisis de daños:	18
2.2.2 Conservación y restauración del patrimonio edificado.	21
2.2.3 Patologías en edificaciones históricas	23
2.2.4 Criterios de severidad del daño.	26
2.2.5 Cuantificación de superficies afectadas	27
2.2.6 Diagnóstico técnico patrimonial	28
2.3 Marco conceptual.	29
2.3.1 Métodos no invasivos.	29
2.3.2 Fotogrametría con vehículos aéreos no tripulados	33
2.3.3 Fotogrametría computacional SfM-MVS.	35
2.3.4 Precisión y validación métrica del modelo fotogramétrico	38
2.3.5 Inspección visual sistemática georreferenciada	39

3	MARCO METODOLÓGICO	41
3.1	Método	41
3.2	Orientación	41
3.3	Enfoque.	41
3.4	Instrumento de recolección de datos	42
3.5	Tipo o alcance de la investigación	42
3.6	Nivel de investigación	43
3.7	Diseño de investigación	43
3.7.1	Propósito de la investigación.	43
3.7.2	Número de mediciones	44
3.7.3	Cronología de las observaciones	44
3.8	Población y muestra.	45
3.8.1	Población	45
3.8.2	Muestra	45
3.9	Hipótesis	46
3.9.1	Hipótesis general	46
3.9.2	Hipótesis específicas	46
3.10	Operacionalización de variables	47
3.10.1	Variables	47
3.10.2	Dimensiones	47
3.10.3	Indicadores.	48
3.11	Técnicas e instrumentos	49
3.11.1	Técnicas de investigación	49
3.11.2	Instrumentos de investigación	50
3.11.3	Herramientas de software utilizadas.	52
3.12	Desarrollo de trabajo de tesis	53
3.12.1	Gestión de permisos y autorización de vuelo	53
3.12.2	Levantamiento fotogramétrico con UAV	53
3.12.3	Procesamiento fotogramétrico en <i>Agisoft Metashape Professional</i>	57
3.12.4	Plan de vuelo y parámetros de captura.	66
3.12.5	Validación métrica del modelo fotogramétrico.	72
3.12.6	Cuantificación de Patologías y Criterios de Severidad	87
4	RESULTADOS	111
4.1	Análisis de resultados	111
4.2	Contrastación de hipótesis	112
4.2.1	Contrastación de hipótesis específica 01	112
4.2.2	Contrastación de hipótesis específica 02	114
5	CONCLUSIONES	115
5.1	Conclusiones.	115
5.2	Recomendaciones	116

5.3 Trabajos futuros	117
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	118
6 ANEXOS	124
6.1 Panel fotográfico del levantamiento fotogramétrico UAV	124
6.2 Patologías identificadas en la Iglesia Santa Teresa de Ayacucho	127
Anexo 2: Matriz de operacionalización de variables	130

LISTA DE FIGURAS

1	Iglesia Santa Teresa de Ayacucho	5
2	Clasificación del patrimonio cultural edificado-evaluación de estructuras históricas compuestas de adobe, piedra y mampostería de ladrillo.	18
3	Ley Nº 32094 declara de interés nacional la restauración de seis monumentos históricos	20
4	Iglesias coloniales de Ayacucho	21
5	Manual de principios de conservación preventiva	22
6	Colonización biológica (musgo) y formación de cristales (a); colonización biológica (líquenes y hongos) (b); colonización biológica (vegetación) y manchas de humedad (c)	24
7	Desprendimiento en puente de mampostería.	25
8	Sistemas de inspección visual por defectos superficiales utilizando inteligencia artificial	27
9	Métodos no invasivos para el diagnóstico del patrimonio edificado	29
10	Vuelo fotogramétrico del UAV SkyRobotic	34
11	Construcción de la maqueta fotogramétrica de la iglesia de San Juan Bautista-templo Inca de Huaytará	37
12	Entorno de Agisoft Metashape. Fotogrametría aérea: Nube de puntos-Caso práctico del Castillo de los Moros en Sintra	38
13	Preparación del equipo UAV Revisión del <i>Autel Robotics XT705</i> y sus accesorios, previo al inicio del levantamiento fotogramétrico. Plaza adyacente a la Iglesia Santa Teresa de Ayacucho.	53
14	UAV <i>Autel Robotics XT705</i>	54
15	Vista frontal de la Iglesia Santa Teresa de Ayacucho — Fachada principal de estilo barroco	55
16	Ejecución del vuelo fotogramétrico — El operador controla el <i>Autel Robotics XT705</i>	56
17	Operador con controladora y UAV <i>Autel XT705</i> posado frente a la portada principal de la Iglesia Santa Teresa	56
18	Resultado de la alineación de imágenes en <i>Agisoft Metashape Professional v2.3.1</i>	57
19	Script Python de verificación de parámetros del proyecto en la consola de <i>Agisoft Metashape Professional</i>	58
20	Resultados de la verificación del proyecto fotogramétrico en consola — Se confirman: 1,189 imágenes alineadas, sistema de coordenadas WGS 84 / UTM zona 18S (EGMS208).	58
21	Configuración de parámetros en la ventana <i>Build Model</i> de <i>Agisoft Metashape Professional</i>	61
22	Inicio del proceso de generación del modelo — <i>Processing in progress: Generating model</i> al 0 % de avance.	61
23	Avance al 35 % del proceso de generación del modelo — Tiempo transcurrido: 11 minutos 16 segundos.	62

24	Generación del Modelo Digital de Elevaciones (MDE) en curso sobre el modelo parcial de la edificación en la vista 3D.	62
25	Vista general del modelo de teselas (<i>Tiled Model</i>) al término del procesamiento	63
26	Detalle del modelo de teselas (<i>Tiled Model</i>) — Vista de la portada principal y fachada frontal de la Iglesia Santa Teresa de Ayacucho.	63
27	Ortomosaico cenital del área de levantamiento	66
28	Distribución de posiciones de cámara y mapa de solapamiento de imágenes. . .	66
29	Interfaz de <i>Agisoft Metashape Professional v2.3.1</i> durante el procesamiento final.	67
30	Primer procesamiento fotogramétrico — Portada del reporte (junio 2025). Vista perspectiva lateral del modelo 3D de la Iglesia Santa Teresa procesado . . .	69
31	Segundo procesamiento fotogramétrico — Portada del reporte (junio 2025). Ortomosaico	69
32	Gráfico de residuales de imagen para la cámara XT705 (10.57 mm) — 1,189 imágenes.	70
33	Distribución espacial de posiciones de cámara y estimadores de error.	70
34	Modelo digital de elevaciones (MDE) — Vista lateral perspectiva. Rango altitudinal: -52 m a +48 m.	70
35	Distribución de posiciones de cámara — Vista cenital, reporte final (marzo 2026). Cada punto negro representa una estación de cámara del bloque fotogramétrico completo (1,189 estaciones).	71
36	Estimadores de error de ubicación de cámara — Vista cenital, reporte final (marzo 2026). El tamaño y forma de las elipses representan el error planimétrico (XY) y el color indica el error altimétrico (Z).	71
37	Modelo digital de elevaciones (MDE) — Vista cenital, segundo procesamiento (junio 2025).	72
38	Medición M1 — Ancho del vano de la puerta principal	73
39	Medición M2 — Medición el segmento horizontal, desprendimiento de la pilastra lateral	74
40	Medición M3 — Sección del muro lateral izquierdo	74
41	Reconocimiento del nivel de desprendimiento lateral	75
42	Vista general del sector de medición en la fachada principal	75
43	Medición del detalle del biodeterioro en la zona lateral de la iglesia	76
44	Medición del basamento del pilar izquierdo	76
45	Medición del desprendimiento de la fachada lateral	77
46	Modelo Bim realizado de la Iglesia Santa Teresa a partir de la nube de puntos .	77
47	Interfaz de <i>Autodesk Dynamo</i> con el nodo <i>Python Script</i>	78
48	Modelo BIM y script de extracción de coordenadas en <i>Revit 2025.4 + Dynamo</i> . .	78
49	Vista perspectiva del modelo BIM con el script Python activo en <i>Dynamo</i>	79
50	Alzado Este del modelo BIM — Vano de la puerta lateral	79
51	Alzado Este completo del modelo BIM con niveles arquitectónicos	80
52	Script Python con conversión de unidades <i>PIES_A_METROS</i> en <i>Dynamo</i>	80
53	Resultados del script — Nodo <i>Watch</i> de <i>Dynamo</i> con dimensiones extraídas . .	81

54	Plano CAD — Fachada frontal de la Iglesia Santa Teresa	81
55	Plano CAD — Muro lateral izquierdo	82
56	Plano CAD — Detalle de cornisa y moldura	82
57	Diagrama de Bland–Altman — Concordancia entre medidas de campo y modelo fotogramétrico	84
58	Mapeo de daño antrópico (graffiti), muro lateral izquierdo	90
59	Resultados de cuantificación de daño antrópico	90
60	Biodeterioro en fachada frontal y portada — Vista perspectiva 30°	93
61	Vista ampliada de fachada frontal y portada con polígonos de biodeterioro. . .	94
62	Biodeterioro en muro lateral izquierdo vista en perspectiva.	94
63	Biodeterioro del biodeterioro del muro lateral izquierdo y puerta secundaria . . .	94
64	Biodeterioro severo en cornisas de Torre Derecha	95
65	Vista aérea del sector de cubierta y torres.	95
66	Detalle de cubierta Torre Derecha con polígonos.	95
67	Resultados de cuantificación de biodeterioro — Zona superior.	96
68	Biodeterioro en frontón — Vista perspectiva 20°.	96
69	Detalle del frontón y base de Torre Derecha.	96
70	Biodeterioro por vegetación prominente en tejado	97
71	Vista aérea principal del tejado principal con polígonos de biodeterioro.	97
72	Vista perspectiva del tejado principal con polígonos	97
73	Detalle de biodeterioro en tejado — Vista lateral de detalle.	98
74	Resultados de cuantificación de biodeterioro — Resumen total por zona.	98
75	Desprendimiento en muro lateral derecho — Vista perspectiva 25°.	102
76	Desprendimiento en zona de transición lateral.	102
77	Desprendimiento en muro lateral izquierdo — Vista perspectiva 25°.	102
78	Desprendimiento en fachada frontal derecha.	103
79	Desprendimiento en muro lateral derecho.	103
80	Desprendimiento en muro lateral derecho — Continuación zona media.	103
81	Desprendimiento en zona frontal y lateral — Vista perspectiva de conjunto. . . .	104
82	Erosión en el muro lateral izquierdo	105
83	Erosión en el lateral izquierdo — Vista desde el acceso posterior.	105
84	Erosión en la fachada frontal y pilastra izquierda	106
85	Erosión en la fachada frontal derecha	106
86	Erosión en las consolas ornamentales	106
87	Erosión en la torre izquierda	107
88	Preparación del equipo UAV <i>Autel Robotics XT705</i> en la plaza adyacente a la Iglesia Santa Teresa	124
89	UAV <i>Autel Robotics XT705</i> y maletín de transporte frente a la fachada principal .	124
90	Ejecución del vuelo fotogramétrico — Vista frontal de la portada principal	125
91	Ejecución del vuelo fotogramétrico — Vista desde el costado derecho de la fachada	125
92	Ejecución del vuelo fotogramétrico — Captura del muro lateral izquierdo	126

93	Investigador con el UAV listo para iniciar el levantamiento – Vista general del área de trabajo	126
94	Daño antrópico por vandalismo (DA) Muro lateral izquierdo, Nivel 0 (basamento) Iglesia Santa Teresa de Ayacucho	127
95	Erosión superficial (ER) Muro lateral izquierdo y cornisa Iglesia Santa Teresa de Ayacucho	127
96	Desprendimiento de revestimiento (DE) Fachada frontal y portada principal Iglesia Santa Teresa de Ayacucho	128
97	Biodeterioro por vegetación (BI:VEGETAL) Cubierta lateral y borde de tejado Iglesia Santa Teresa de Ayacucho	128

LISTA DE CUADROS

1	Resumen de la unidad de análisis — Patologías superficiales identificadas en la Iglesia Santa Teresa de Ayacucho	8
2	Coherencia de la metodología adoptada con los estándares internacionales de evaluación no invasiva — Iglesia Santa Teresa, Ayacucho 2025	33
3	Resumen de la metodología de investigación	46
4	Herramientas de software utilizadas en la investigación	52
5	Especificaciones técnicas del sistema UAV <i>Autel Robotics XT705</i> empleado en el levantamiento fotogramétrico	54
6	Parámetros de filtrado y depuración de la nube de puntos densa — Iglesia Santa Teresa, Ayacucho 2025	60
7	Productos fotogramétricos generados — <i>Agisoft Metashape Professional v2.3.1</i> , Iglesia Santa Teresa de Ayacucho	64
8	Proceso de depuración del conjunto de imágenes fotogramétricas — Iglesia Santa Teresa, Ayacucho 2025	65
9	Parámetros técnicos del plan de vuelo y configuración de cámara — Levantamiento fotogramétrico UAV, Iglesia Santa Teresa de Ayacucho, 28 de abril de 2025	67
10	Evolución del procesamiento fotogramétrico — Comparativa de hardware y resultados	68
11	Comparación de medidas de campo, plano CAD y modelo BIM — Iglesia Santa Teresa de Ayacucho	82
12	Indicadores estadísticos de validación métrica — Modelo fotogramétrico Iglesia Santa Teresa de Ayacucho	83
13	Coefficientes de calibración interna — Cámara XT705 (f = 10.57 mm), Iglesia Santa Teresa, Ayacucho 2025	86
14	Firmas colorimétricas de referencia para la identificación de patologías sobre el ortomosaico RGB — Iglesia Santa Teresa, Ayacucho 2025	88
15	Cuantificación de daño antrópico por subtipo — Nivel 0, Iglesia Santa Teresa de Ayacucho	91
16	Cuantificación de biodeterioro por zona — Iglesia Santa Teresa de Ayacucho	92
17	Criterios técnicos de severidad para biodeterioro	99
18	Criterios técnicos de severidad para desprendimiento	100
19	Cuantificación de desprendimiento por zona — Iglesia Santa Teresa de Ayacucho	101
20	Criterios técnicos de severidad para erosión superficial	107
21	Cuantificación de erosión superficial por zona — Iglesia Santa Teresa de Ayacucho	108
22	Resumen comparativo de patologías — Iglesia Santa Teresa de Ayacucho	109
23	Matriz de consistencia	129
24	Matriz de operacionalización de variables	130

GLOSARIO

AGL	Above Ground Level, altura de vuelo medida desde la superficie del terreno hasta la aeronave, expresada en metros.
Biodeterioro	Degradación de materiales constructivos provocada por organismos biológicos como líquenes, musgos u hongos.
Calibración	Determinación de los parámetros internos del sensor fotográfico, incluyendo distancia focal y coeficientes de distorsión.
Densificación	Proceso de incremento de puntos tridimensionales reconstruidos, generando una nube densa a partir de mapas de profundidad.
Depth map	Mapa de profundidad que almacena la distancia entre la cámara y cada punto visible de la escena para cada imagen.
Gemelo digital	Réplica tridimensional de un objeto físico generada mediante técnicas fotogramétricas, con dimensiones y geometría reales.
Georreferenciación	Asignación de coordenadas geográficas a un modelo u ortofoto, vinculándolo a un sistema de referencia espacial.
Malla 3D	Superficie poligonal compuesta por vértices, aristas y caras triangulares que representa la geometría de un objeto reconstruido.
Nube de puntos	Conjunto de puntos con coordenadas (X, Y, Z) y atributos de color que representan la superficie de un objeto.
Ortomosaico	Imagen georreferenciada y corregida geométricamente, libre de distorsiones por perspectiva y relieve.
Patología	Deterioro o lesión que afecta a un elemento constructivo, clasificada según su origen en física, mecánica, química o biológica.
Reproyección	Proyección de un punto 3D sobre las imágenes originales; su error mide la discrepancia en píxeles entre la posición estimada y observada.
Solapamiento	Porcentaje de área común entre fotografías consecutivas, diferenciado en longitudinal y transversal respecto a la línea de vuelo.
Texturizado	Proyección de la información cromática de las fotografías sobre la malla 3D para generar un modelo fotorrealista.
Tie point	Punto de paso identificado automáticamente en múltiples imágenes, utilizado para calcular la orientación relativa de las cámaras.
Valor patrimonial	Significación histórica, artística o cultural de un bien inmueble que justifica su protección, conservación y estudio.
Vértice	Punto tridimensional que forma parte de la malla poligonal del modelo, definido por sus coordenadas espaciales.
Zona UTM	División del sistema de proyección Universal Transverse Mercator; el área de estudio corresponde al huso 18 Sur.

ACRÓNIMOS

DEM	Digital Elevation Model, modelo digital que representa la elevación de la superficie mediante una grilla de valores altimétricos.
DGAC	Dirección General de Aeronáutica Civil, entidad del Estado peruano que regula las operaciones con aeronaves no tripuladas.
GCP	Ground Control Point, punto con coordenadas conocidas medido en campo para georreferenciar el modelo fotogramétrico.
GNSS	Global Navigation Satellite System, sistema de constelaciones satelitales empleado para determinar posiciones geográficas.
GSD	Ground Sample Distance, dimensión real del terreno que representa cada píxel de la imagen capturada por el sensor.
HBIM	Historic Building Information Modeling, metodología BIM aplicada al registro y gestión de edificaciones patrimoniales.
ICP	Independent Check Point, punto de verificación independiente empleado para evaluar la precisión del modelo generado.
MAE	Mean Absolute Error, indicador que cuantifica el promedio de las diferencias absolutas entre valores medidos y estimados.
MVS	Multi-View Stereo, técnica que genera nubes densas de puntos 3D a partir de imágenes con posiciones de cámara conocidas.
RMSE	Root Mean Square Error, raíz del promedio de los errores al cuadrado entre valores de referencia y valores estimados.
RTK	Real-Time Kinematic, técnica GNSS diferencial en tiempo real que alcanza precisión centimétrica en posicionamiento.
SfM	Structure from Motion, técnica que reconstruye geometría 3D y posiciones de cámara a partir de fotografías con solapamiento.
SIFT	Scale-Invariant Feature Transform, algoritmo de detección de puntos característicos invariantes a escala y rotación.
UAV	Unmanned Aerial Vehicle, aeronave no tripulada operada remotamente para la adquisición de imágenes aéreas.
UNSCH	Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, institución donde se desarrolla la presente investigación.
UNESCO	United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, organismo de protección del patrimonio cultural mundial.
UTM	Universal Transverse Mercator, sistema de proyección cartográfica que divide la Tierra en 60 husos de coordenadas planas.
WGS 84	World Geodetic System 1984, datum geodésico global utilizado como referencia por los receptores de navegación satelital.

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área de la zona afectada por una patología constructiva, expresada en metros cuadrados (m^2).
C_x, C_y	Coordenadas del punto principal del sensor en píxeles, determinadas durante la calibración de la cámara.
d	Discrepancia entre la medición obtenida en campo y la medición extraída del modelo fotogramétrico 3D.
e	Error de reproyección, distancia en píxeles entre la posición observada y la posición estimada de un punto.
f	Distancia focal del sensor expresada en milímetros o en píxeles, parámetro principal de la calibración.
F	Distancia focal equivalente en píxeles, obtenida del proceso de autocalibración en Agisoft Metashape.
h	Altura de vuelo sobre el nivel del terreno (AGL), expresada en metros.
K_1, K_2, K_3	Coefficientes de distorsión radial del sensor, determinados durante la calibración de la cámara.
L	Longitud de una fisura o grieta medida sobre el modelo 3D, expresada en milímetros o centímetros.
n	Número total de observaciones o mediciones utilizadas en el cálculo de indicadores estadísticos.
\bar{d}	Media aritmética de las diferencias entre mediciones de campo y mediciones del modelo fotogramétrico (sesgo).
P_1, P_2	Coefficientes de distorsión tangencial del sensor, obtenidos en el proceso de autocalibración.
r	Coefficiente de correlación de Pearson entre mediciones de campo y mediciones del modelo 3D.
σ	Desviación estándar de las discrepancias entre valores de referencia y valores estimados del modelo.
$\sigma_X, \sigma_Y, \sigma_Z$	Errores de posicionamiento de las cámaras en cada eje coordenado, expresados en metros.
w	Apertura de una fisura medida perpendicularmente a su dirección principal, expresada en milímetros.
X, Y, Z	Coordenadas tridimensionales de un punto en el sistema de referencia UTM zona 18S, en metros.
RMSE	$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_{ref,i} - x_{est,i})^2}$, raíz del error cuadrático medio.
MAE	$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_{ref,i} - x_{est,i} $, error absoluto medio.
GSD	$GSD = \frac{h \times p_s}{f}$, donde p_s es el tamaño del píxel del sensor y f la distancia focal.
p_s	Tamaño físico del píxel del sensor de imagen, expresado en micrómetros (μm).
ρ_c	Coefficiente de concordancia de Lin, indicador que evalúa simultáneamente precisión y exactitud entre dos métodos de medición.
$IC_{95\%}$	Intervalo de confianza al 95 %, rango dentro del cual se espera que se encuentre el valor verdadero del parámetro estimado.

TESIS

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.0.1. A nivel mundial

El patrimonio cultural edificado constituye un registro material irremplazable de la historia de las civilizaciones; su pérdida, ya sea por abandono, catástrofe natural o intervención inadecuada, es irreversible. La magnitud de la amenaza que enfrenta este acervo ha sido cuantificada recientemente por Z. Chen et al. (2025), quienes mediante un marco analítico de peligro-vulnerabilidad-exposición, demostraron que el 80 % de los sitios del Patrimonio Cultural Mundial ya experimenta estrés térmico e hídrico perjudicial, y que cerca del 19 % está amenazado en más de un material constitutivo clave piedra y madera. Bonazza y Sardella (2023) señalan, además, que la cuantificación objetiva del daño producido por estos mecanismos continúa siendo metodológicamente deficiente en la mayoría de los países en desarrollo, donde prevalece la inspección visual subjetiva frente a protocolos instrumentales reproducibles. Coletti et al. (2024), en una revisión del estado del arte de las funciones de daño cuantitativas para el patrimonio pétreo, confirman que los mecanismos de cristalización de sales, estrés térmico, biodeterioro y recesión superficial constituyen las vías de degradación dominantes bajo escenarios climáticos futuros, con tasas de avance que superan ampliamente las proyecciones anteriores al año 2020.

El biodeterioro merece una atención específica dentro del conjunto de mecanismos de deterioro del patrimonio edificado, dada su prevalencia en climas tropicales y subtropicales. Ortega-Morales et al. (2019), en la primera metaanálisis de deterioro microbiano en 32 monumentos de piedra de Argentina, Belice, Brasil, Camboya, Laos y México, evidenciaron que la colonización por cianobacterias —condicionada principalmente por la humedad relativa y la temperatura promueve la formación de costras de yeso y desencadena procesos de descamación catastrófica y pérdida irreversible de material. Este mecanismo es de alta relevancia para las iglesias coloniales de la sierra andina peruana, expuestas a ciclos estacionales de lluvia intensa y sequía prolongada. En el contexto latinoamericano, Ruiz-De la Cruz et al. (2025), en una metaanálisis que abarca 43 monumentos de piedra en 8 países de la región, identificaron 178 especies de organismos fototrófico-degradantes —Cyanobacteria, algas verdes, líquenes— cuya distribución y abundancia están estrechamente condicionadas por la temperatura superficial, la humedad relativa y la radiación solar incidente, con especial prevalencia en monumentos de piedra expuestos a ciclos húmedo-secos recurrentes, condición climática característica del altiplano andino.

Frente a este contexto, la fotogrametría aérea mediante vehículos aéreos no tripulados (UAV) combinada con algoritmos de *Structure from Motion* (SfM) se ha consolidado en la última década como la metodología no destructiva, cuantitativa y reproducible más accesible para la documentación y el diagnóstico del patrimonio edificado. Pepe et al. (2022), en una revisión de las plataformas UAV y el enfoque SfM-MVS para

relevamiento tridimensional en patrimonio cultural, destacan la versatilidad de estas técnicas para adaptarse a geometrías arquitectónicas complejas, incluyendo fachadas de gran altura, elementos ornamentales de difícil acceso y superficies irregulares. De Fino et al. (2023), en una revisión de alcance basada en el protocolo PRISMA que analizó **117 publicaciones** del período 2013–2023, demostraron que los modelos fotogramétricos permiten el mapeo de patologías —fisuras, erosión, colonización biológica, pérdida de material, eflorescencias— con precisión milimétrica a partir de ortoimágenes calibradas y nubes de puntos densas. Tysic et al. (2023) validaron esta combinación para la evaluación de la degradación de la Iglesia San Adalberto en Gdańsk, Polonia (siglo XIV), generando modelos tridimensionales integrales que combinan información colorimétrica RGB con propiedades de reflectancia láser para la identificación sistemática de zonas deterioradas. En el ámbito de la integración con HBIM, Martínez-Carricondo et al. (2021) demostraron que la fotogrametría UAV procesada con Agisoft Metashape alcanza una **precisión de ± 0.05 m**, suficiente para modelar con fidelidad la geometría compleja del patrimonio arquitectónico. Para el caso específico del mapeo de fisuras estructurales, Yaşar Yiğit y Uysal (2024) proponen la combinación de fotogrametría UAV con modelos de gemelo digital, logrando la detección automática de fisuras en fachadas de edificios patrimoniales con resolución subcentimétrica. No obstante, la adopción de estas metodologías en América Latina sigue siendo incipiente y fragmentaria, con escasos antecedentes documentados en el contexto andino, lo que configura una brecha técnica cuya superación resulta urgente ante el ritmo acelerado de deterioro del patrimonio edificado en la región.

1.0.2. A nivel país

En el Perú, el patrimonio religioso colonial representa uno de los conjuntos monumentales más extensos y significativos de América Latina. El Ministerio de Cultura tiene registradas aproximadamente 800 iglesias declaradas Patrimonio Cultural de la Nación (PCN), de las cuales 762 corresponden a época colonial (Ministerio de Cultura del Perú, 2024). Sin embargo, este vasto acervo patrimonial carece de un sistema de diagnóstico técnico-científico sistemático que permita evaluar cuantitativamente su estado de conservación y priorizar intervenciones de manera objetiva. La Ley N.º 28296, Ley General del Patrimonio Cultural de la Nación, establece en su artículo IV que la protección, restauración, investigación y conservación del patrimonio cultural son de interés social y necesidad pública, y en su artículo 7.2 obliga a los propietarios —incluidas las instituciones de la Iglesia Católica y congregaciones religiosas, conforme a la Tercera Disposición Transitoria— a registrar, proteger y conservar adecuadamente los bienes patrimoniales bajo su custodia (Ley N.º 28296, Ley General del Patrimonio Cultural de la Nación, 2004).

Las causas de esta crisis tienen raíces profundas en la deficiencia institucional y la ausencia de metodologías de diagnóstico sistemáticas. Aguilar et al. (2019), en su evaluación de la vulnerabilidad sísmica de la iglesia colonial Virgen de la Asunción de Sacsamarca, en la región Ayacucho, señalaron que una gran parte del patrimonio peruano corresponde a iglesias andinas coloniales que son económica y culturalmente esenciales

para el desarrollo de numerosas comunidades, pero que estas estructuras presentan alta vulnerabilidad ante las demandas sísmicas peruanas y carecen de estudios científicos y técnicos adecuados para orientar su conservación.

Consecuencia directa de esta brecha es que la degradación se detecta únicamente cuando alcanza un estado avanzado —manifestándose como desprendimiento, fisuración estructural o colapso y no durante las etapas tempranas en que la intervención preventiva resulta técnica y económicamente viable. El diagnóstico tradicional basado en inspección visual directa, predominante en el Perú, adolece de limitaciones ampliamente documentadas: Incapacidad para cuantificar con precisión la severidad de las patologías, subjetividad e inconsistencia entre inspectores, imposibilidad de acceder a zonas elevadas sin andamiaje, y altos costos en tiempo y mano de obra especializada que restringen la frecuencia y cobertura de las inspecciones (Pereira et al., 2021; Tejedor et al., 2022). Estas limitaciones son especialmente problemáticas en las fachadas de piedra tallada de los templos coloniales peruanos, donde patologías complejas erosión alveolar, descamación, colonización biológica, eflorescencias salinas requieren cuantificación precisa para orientar intervenciones de conservación. Zeballos-Velarde et al. (2020) confirmaron en el Centro Histórico de Arequipa —sitio Patrimonio Mundial de la UNESCO— que los métodos fotogramétricos de bajo costo producen resultados confiables para la documentación patrimonial incluso con recursos económicos limitados, demostrando la viabilidad de estas técnicas para el contexto peruano; sin embargo, su aplicación sistemática al mapeo de patologías en iglesias coloniales sigue siendo prácticamente inexistente en el territorio nacional.

1.0.3. A nivel regional

En el departamento de Ayacucho, la problemática del deterioro del patrimonio edificado concentra y amplifica todos los factores identificados a nivel mundial y nacional, configurando un escenario de riesgo particularmente crítico. El Centro Histórico de Ayacucho (Huamanga) alberga uno de los conjuntos de arquitectura colonial religiosa más singulares del continente americano. Ayacucho, conocida históricamente como la Ciudad de las 33 Iglesias, concentra 64 templos coloniales declarados PCN (Ministerio de Cultura del Perú, 2024), que constituyen el núcleo identitario y devocional de una ciudad de más de 105 000 habitantes. No obstante, la conservación de este patrimonio dista de ser adecuada: Según datos del SUNARP, de las 33 iglesias históricas de la ciudad solo 11 cuentan con inscripción formal en el Registro de Predios (Agencia Andina, 2025), evidenciando una precariedad administrativa que dificulta la asignación de responsabilidades y recursos para su conservación. El Instituto Nacional de Defensa Civil (INDECI) advirtió, en noviembre de 2025, que al menos 40 casonas e iglesias coloniales del Centro Histórico se encuentran en riesgo inminente de colapso debido al deterioro estructural avanzado y al abandono prolongado (Jornada, 2025).

La gravedad de esta situación quedó trágicamente evidenciada el 30 de octubre de 2025, cuando una sección de la cornisa de la fachada de la Iglesia Compañía de Jesús —templo

jesuita del siglo XVII ubicado en el jirón 28 de Julio, a escasos metros de la Plaza Mayor de Huamanga— se desplomó súbitamente sobre un grupo de personas que transitaban por la vía pública. El incidente ocasiono la muerte de una mujer, de 45 años de edad, quien protegió con su cuerpo a su hijo de un año en el momento del impacto, además de dejar tres personas heridas de diversa gravedad (El Popular, 2025). Las investigaciones preliminares de la Fiscalía Provincial Penal Corporativa de Huamanga y las declaraciones del Director Regional de Cultura, Germán Martinelli, revelaron que la causa subyacente del desprendimiento fue la combinación de lluvias intensas recientes con intervenciones previas inadecuadas que emplearon cemento Portland sobre la mampostería de piedra original —un material incompatible que, al impedir la transpiración natural de la piedra, acelera los mecanismos de degradación interna—, situación agravada por tres años de trámites burocráticos sin resolución ante el Ministerio de Cultura para la restauración de la fachada (Infobae Perú, 2025).

Un hallazgo de particular relevancia para la presente investigación emerge del análisis de este incidente: El colapso de la cornisa de la Iglesia Compañía de Jesús no fue un evento súbito e imprevisible, sino la consecuencia acumulada de un deterioro superficial progresivo —biodeterioro, erosión de juntas, infiltración de humedad, fisuración asociada a intervenciones con materiales incompatibles— que no fue detectado ni cuantificado oportunamente mediante ningún protocolo técnico de diagnóstico. Este dato es contundente: La ausencia de metodologías cuantitativas para el monitoreo del estado de conservación de las fachadas está directamente asociada a la ocurrencia de tragedias evitables. El colapso ocurrió además en el jirón 28 de Julio, la misma arteria vial donde se ubica la Iglesia y Monasterio de Santa Teresa —templo de la orden de las Carmelitas Descalzas consagrado el 15 de octubre de 1703 por el obispo Diego Ladrón de Guevara—, cuyas fachadas presentan signos visibles de deterioro superficial —pátinas biológicas, erosión diferencial, fisuras, desprendimientos localizados— que a la fecha no han sido documentados ni cuantificados mediante técnica instrumental alguna.

La convergencia de un patrimonio en deterioro progresivo, la insuficiencia presupuestaria del Estado para su conservación, la ausencia de protocolos cuantitativos de diagnóstico, la demostrada inviabilidad de la inspección visual convencional en fachadas de gran altura y complejidad ornamental, y la evidencia histórica reciente de consecuencias fatales ante la omisión del diagnóstico técnico oportuno, fundamenta la necesidad imperiosa de aplicar la fotogrametría UAV basada en *Structure from Motion* (SfM) para identificar, clasificar y cuantificar las patologías superficiales presentes en las fachadas de la Iglesia Santa Teresa de Ayacucho, generando un diagnóstico técnico reproducible que contribuya a la gestión preventiva del patrimonio cultural edificado del Centro Histórico de Huamanga.

1.1. Delimitación del problema

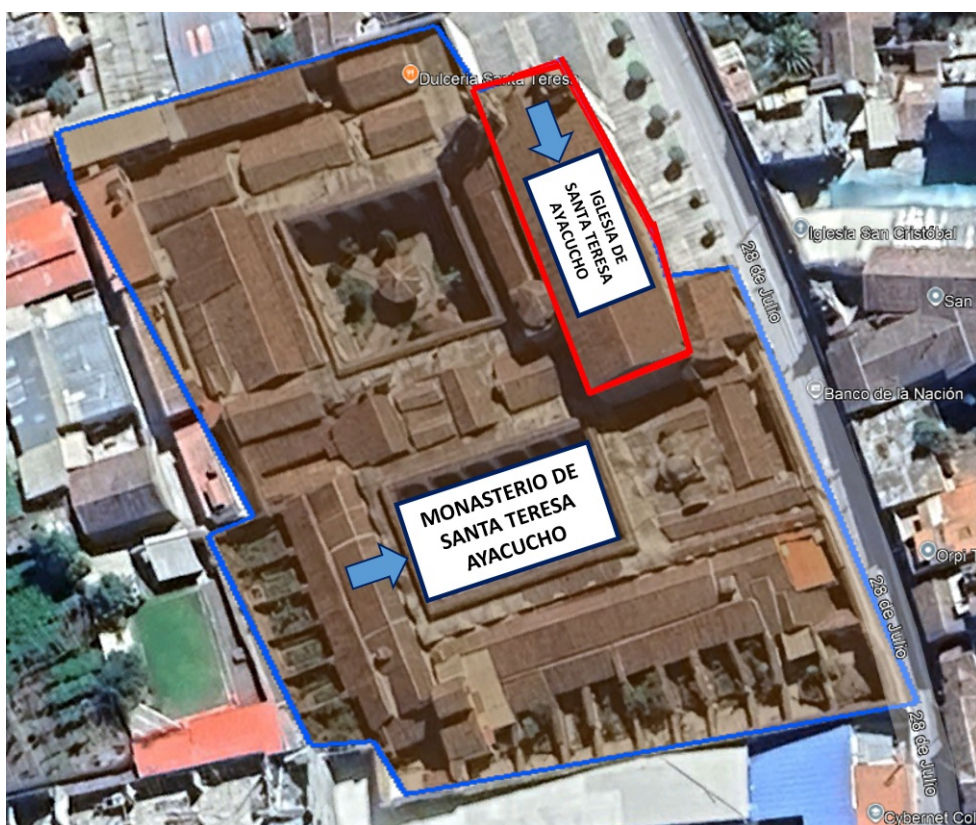
1.1.1. Espacial (geográfica)

El área de investigación se encuentra localizada en el Centro Histórico de la ciudad de Ayacucho, distrito de Ayacucho, provincia de Huamanga, departamento de Ayacucho, ubicado en la sierra sur-central del Perú.

La delimitación espacial del estudio corresponde al Monasterio de Santa Teresa de Ayacucho, conjunto arquitectónico conventual de la Orden de las Carmelitas Descalzas, emplazado en el jirón 28 de Julio del Centro Histórico de Ayacucho, declarado Patrimonio Cultural de la Nación por el Ministerio de Cultura del Perú. El conjunto monástico comprende la iglesia, el claustro, las dependencias conventuales y los espacios exteriores asociados que conforman la unidad patrimonial en su totalidad.

El área de estudio específica de la presente investigación corresponde a la **Iglesia Santa Teresa de Ayacucho**, edificación patrimonial de estilo barroco mestizo del siglo XVII que constituye el elemento arquitectónico principal del conjunto monástico. La delimitación del área de estudio a la iglesia excluyendo el claustro y las dependencias conventuales de acceso restringido responde a la posibilidad de acceso físico para el levantamiento fotogramétrico UAV en su totalidad de fachadas, torres y cubierta desde el espacio público exterior.

Figura 1
Iglesia Santa Teresa de Ayacucho



Nota. Imagen propia adaptado de Google Earth.

El ámbito espacial comprende los siguientes elementos arquitectónicos:

- **Fachada frontal:** Fachada principal de estilo barroco mestizo con portada ornamentada, pilastras, entablamento, frontón, medallones y hornacinas con imágenes escultóricas, flanqueada por dos torres campanario.
- **Torres campanario:** Dos torres de planta cuadrada con cuerpos superpuestos, cornisas, vanos de campanas y remates de cúpula, que constituyen los elementos verticales más expuestos a la acción de agentes atmosféricos y biológicos.
- **Muros laterales:** Muros de piedra de sillar en los flancos norte y sur de la nave principal, de gran longitud y con elementos ornamentales en cornisas y contrafuertes.
- **Cubierta:** Tejado de teja artesanal sobre la nave principal y cubierta de las torres, zonas de mayor concentración de biodeterioro por exposición directa a precipitaciones y colonización biológica.

La selección de esta edificación se fundamenta en los siguientes criterios técnicos y patrimoniales:

- a) **Valor patrimonial reconocido:** La Iglesia Santa Teresa de Ayacucho es un bien inmueble integrante del patrimonio cultural de la Nación, declarado y protegido por el Ministerio de Cultura del Perú, cuya conservación es de interés público prioritario.
- b) **Diversidad representativa de patologías:** La edificación presenta simultáneamente biodeterioro, desprendimiento, erosión y daño antrópico cuatro de las cinco tipologías de patologías estudiadas, lo que la convierte en un caso de estudio idóneo para la validación de la metodología propuesta.
- c) **Geometría tridimensional compleja:** La presencia de torres, portada en relieve, cornisas, pilastras y cubierta de teja implica una envolvente de alta complejidad geométrica que permite evaluar la capacidad de la metodología UAV-SfM para el mapeo de edificaciones patrimoniales de geometría irregular.
- d) **Accesibilidad para levantamiento UAV:** La ubicación de la iglesia en el jirón 28 de Julio, con espacio público suficiente en el perímetro, permite el desarrollo del vuelo fotogramétrico UAV con cobertura completa de todas las fachadas y la cubierta sin restricciones físicas insalvables.

La georreferenciación del área de estudio se realizó en el sistema de coordenadas **WGS 84 / UTM zona 18S + EGM2008** (EPSG:32718), con coordenadas aproximadas del centroide del bloque fotogramétrico: Latitud $-13,1677^\circ$, Longitud $-74,2277^\circ$.

1.1.2. Temporal

El horizonte temporal del estudio abarca un período de **once meses**, desde **abril de 2025** hasta **marzo de 2026**, intervalo en el cual se realizaron el levantamiento fotogramétrico UAV, el procesamiento fotogramétrico iterativo del bloque de imágenes y el mapeo, cuantificación y análisis de las patologías superficiales de la Iglesia Santa Teresa de Ayacucho.

Este período temporal comprende las siguientes etapas:

- **Abril 2025:** Planificación y ejecución del levantamiento fotogramétrico UAV con el *Autel Robotics XT705*. Captura de 1,189 imágenes el 28 de abril de 2025 (09:56 a.m.) con trayectorias combinadas de nadir y oblicuas, a una distancia media cámara-superficie de 7.68 m y GSD de 2.46 mm/píx. Obtención de los metadatos EXIF y registros GPS de las posiciones de cámara.
- **Mayo – Junio 2025:** Primer y segundo procesamiento fotogramétrico exploratorio en *Agisoft Metashape Professional v2.1.3* (hardware: Intel i5-7200U + GeForce 940MX + 7.87 GB RAM), con el objetivo de verificar la viabilidad del bloque fotogramétrico y ajustar los parámetros de procesamiento. Generación de los primeros reportes de alineación y detección de la necesidad de hardware de mayor capacidad para el procesamiento definitivo.
- **Julio – Noviembre 2025:** Consolidación del marco teórico, revisión bibliográfica especializada en fotogrametría patrimonial y patología de edificaciones, y elaboración del diseño metodológico de la investigación.
- **Diciembre 2025 – Febrero 2026:** Procesamiento fotogramétrico definitivo en *Agisoft Metashape Professional v2.3.1* (hardware: AMD Ryzen 9 9950X3D + RTX 5080 + 61.64 GB RAM). Generación de la nube de puntos densa (274,990,458 puntos), modelo de teselas (GSD = 2.46 mm/píx), MDE (6.46 mm/píx) y ortomosaico (3.23 mm/píx). Digitalización de los 266 polígonos de patologías sobre el modelo tridimensional georreferenciado.
- **Marzo 2026:** Cuantificación geoespacial de áreas afectadas mediante scripts Python. Clasificación por niveles de severidad. Análisis estadístico descriptivo de resultados. Validación métrica del modelo fotogramétrico. Elaboración del informe final de tesis y correcciones conforme a las observaciones del asesor.

1.1.3. Temática y unidad de análisis

- **Temática:** La temática de esta investigación se circunscribe al campo de la ingeniería civil con enfoque en diagnóstico y conservación del patrimonio edificado, mediante la aplicación de técnicas de fotogrametría con vehículos aéreos no tripulados (UAV) y reconstrucción tridimensional por *Structure from Motion* (SfM). El estudio se centra en el desarrollo de una metodología de mapeo y cuantificación de patologías superficiales en edificaciones patrimoniales, empleando el procesamiento fotogramétrico en *Agisoft Metashape Professional v2.3.1* para la generación de modelos tridimensionales de alta resolución (GSD = 2.46 mm/píx) sobre los cuales se identifican, delimitan y cuantifican las patologías presentes en la envolvente de la Iglesia Santa Teresa de Ayacucho. La investigación integra conocimientos de fotogrametría digital, patología de edificaciones, sistemas de información geoespacial y criterios técnicos de conservación patrimonial, orientados a generar un diagnóstico cuantitativo reproducible del estado de conservación superficial de una edificación de valor patrimonial declarada por el Ministerio de Cultura del Perú.

- **Unidad de análisis:** La unidad de análisis de esta investigación está constituida por las **patologías superficiales** presentes en la envolvente de la Iglesia Santa Teresa de Ayacucho, identificadas y delimitadas como polígonos georreferenciados sobre el modelo fotogramétrico tridimensional. Se digitalizaron **266 polígonos** distribuidos en cinco tipologías de patología, organizadas en las siguientes categorías:

- i) **Biodeterioro (BI_):** Deterioro biológico causado por la colonización de organismos vivos — líquenes, musgos, algas, hongos y vegetación prominente — sobre las superficies de la edificación. Constituye la patología de mayor extensión con 157.69 m² afectados (99.46 % del total), distribuidos en 111 polígonos sobre 13 zonas de la envolvente. Severidad global: **muy severo**.
- ii) **Desprendimiento (DE_):** Pérdida parcial o total del revestimiento superficial — enlucido, mortero o piedra de sillar — que deja expuesta la estructura subyacente. Se identificaron 96 polígonos sobre 8 zonas con un área total de 0.7309 m². Severidad global: **moderado**.
- iii) **Erosión (ER_):** Desgaste superficial progresivo del material pétreo o de revestimiento por acción de agentes atmosféricos, mecánicos o químicos, que reduce el relieve y la definición de los elementos ornamentales. Se identificaron 55 polígonos sobre 8 zonas con un área total de 0.0976 m². Severidad global: **moderado**.
- iv) **Daño antrópico (DA_):** Deterioro causado por la intervención humana no controlada, incluyendo grafitis e inscripciones sobre las superficies de la edificación. Se identificaron 4 polígonos con un área total de 0.0015 m². Severidad global: **leve**.

Cuadro 1

Resumen de la unidad de análisis — Patologías superficiales identificadas en la Iglesia Santa Teresa de Ayacucho

Patología	Código	Nº polígonos	Área (m ²)	Severidad
Biodeterioro	BI_	111	157.6865	Muy severo
Desprendimiento	DE_	96	0.7309	Moderado
Erosión	ER_	55	0.0976	Moderado
Daño antrópico	DA_	4	0.0015	Leve
Fisuras	FI_	—	—	No identificadas
Total	—	266	158.5165	Muy severo

Nota. Elaboración propia, con base en el mapeo fotogramétrico realizado en *Agisoft Metashape Professional v2.3.1*.

1.2. Formulación del problema

1.2.1. Problema general

¿En qué medida la evaluación fotogramétrica con drones permite identificar los daños estructurales de la Iglesia Santa Teresa de la ciudad de Ayacucho?

1.2.2. Problemas específicos

1. ¿Cuáles son las dimensiones y características de los diversos daños que afectan a la estructura de la Iglesia Santa Teresa en la ciudad de Ayacucho?
2. ¿Cuál es el nivel de precisión de la fotogrametría con UAV (drones) en la evaluación de daños en el monumento histórico Iglesia Santa Teresa en la ciudad de Ayacucho?

1.3. Justificación e importancia

- **Conveniencia:** La presente investigación responde a una necesidad concreta de la gestión del patrimonio edificado ayacuchano, dado que la Iglesia Santa Teresa de Ayacucho exponente representativo de la arquitectura barroca mestiza del siglo XVII presenta patologías superficiales visibles que requieren un diagnóstico técnico cuantificado como paso previo a cualquier intervención de conservación o restauración. El desarrollo de una metodología de mapeo fotogramétrico mediante UAV y *Structure from Motion* (SfM) resulta viable gracias a la disponibilidad de plataformas UAV de uso civil, software fotogramétrico especializado de licencia académica (*Agisoft Metashape Professional*) y hardware de procesamiento de alto rendimiento, permitiendo su implementación sin requerir infraestructura de campo invasiva ni intervención sobre la edificación patrimonial.

La selección de la Iglesia Santa Teresa como área de estudio posibilita la obtención de un modelo fotogramétrico tridimensional de alta resolución (GSD = 2.46 mm/píx) sobre el cual se identifican, delimitan y cuantifican las cinco tipologías de patologías presentes en su envolvente.

- **Relevancia social:** El estudio confronta una problemática de elevado impacto cultural y social en Ayacucho, ciudad donde el Centro Histórico integrado por 33 iglesias coloniales y numerosos inmuebles de valor patrimonial enfrenta un deterioro progresivo por factores ambientales, biológicos y antrópicos que no siempre reciben atención técnica oportuna por falta de diagnósticos cuantificados y georreferenciados. La ausencia de herramientas de diagnóstico no destructivo de precisión evidencia la urgencia de incorporar metodologías fotogramétricas modernas en la gestión del patrimonio edificado ayacuchano.

La metodología propuesta contribuirá de manera significativa a la conservación preventiva del patrimonio cultural mediante la identificación objetiva y la cuantificación métrica de las patologías presentes, proporcionando información técnica reproducible para la toma de decisiones. Los beneficiarios directos comprenden al Ministerio de Cultura del Perú, la Dirección Desconcentrada de Cultura

de Ayacucho, las comunidades religiosas custodias del patrimonio, los investigadores especializados en conservación patrimonial, y la ciudadanía ayacuchana en general, cuyo legado histórico y cultural está representado en estas edificaciones.

- **Aplicaciones prácticas:** La metodología desarrollada ofrece aplicabilidad directa en la gestión técnica del patrimonio edificado ayacuchano. El modelo fotogramétrico tridimensional georreferenciado generado sobre la Iglesia Santa Teresa con 266 polígonos de patologías cuantificadas sobre 158.52 m² de área afectada constituye un instrumento técnico concreto que permite localizar con precisión cada zona de deterioro, cuantificar su extensión en m² y establecer prioridades de intervención según el nivel de severidad determinado.

Los productos generados nube de puntos densa, modelo de teselas, MDE y ortomosaico georreferenciados, mapas temáticos de distribución de patologías y tablas comparativas de severidad facilitarán la elaboración de expedientes técnicos de restauración, el seguimiento de la evolución del deterioro en futuras campañas de monitoreo, y la planificación de presupuestos de intervención basados en áreas reales. La metodología posee potencial de replicabilidad en las otras 32 iglesias coloniales del Centro Histórico de Ayacucho, proyectando su alcance hacia un sistema integral de monitoreo del patrimonio edificado urbano.

- **Unidad metodológica:** La investigación aporta un marco metodológico innovador que articula técnicas de fotogrametría UAV, reconstrucción tridimensional por *Structure from Motion* (SfM), digitalización de polígonos de patologías sobre modelos tridimensionales georreferenciados y cuantificación geoespacial automatizada mediante scripts Python, configurando un protocolo estandarizado, reproducible y no destructivo para el diagnóstico del estado de conservación superficial de edificaciones patrimoniales.
- **Valor teórico:** Desde el plano teórico, esta investigación contribuye a la expansión del conocimiento en la convergencia entre fotogrametría digital, patología de edificaciones y conservación del patrimonio cultural edificado. El desarrollo de una metodología de mapeo UAV-SfM aplicada específicamente al diagnóstico de patologías superficiales en arquitectura barroca mestiza ayacuchana aporta evidencia original sobre la aplicabilidad de la fotogrametría de alta resolución en edificaciones de geometría tridimensional compleja en contextos de patrimonio urbano de ciudades intermedias del Perú. Adicionalmente, la investigación contribuye al desarrollo de marcos conceptuales sobre la implementación de tecnologías de documentación digital en el patrimonio edificado con recursos accesibles, demostrando cómo la integración de UAV de uso civil, software fotogramétrico especializado y metodologías de cuantificación geoespacial puede generar diagnósticos técnicos precisos, objetivos y reproducibles para la conservación preventiva de edificaciones patrimoniales en países en vías de desarrollo.

1.4. Limitaciones de la investigación

Si bien la presente investigación emplea metodologías fotogramétricas avanzadas para el mapeo y cuantificación de patologías superficiales en la Iglesia Santa Teresa de Ayacucho, es pertinente reconocer las siguientes limitaciones inherentes al desarrollo del estudio:

- **Acceso restringido al claustro y dependencias conventuales:** La naturaleza conventual clausurada del Monasterio de Santa Teresa impide el acceso físico al claustro interior y a las dependencias conventuales, limitando el levantamiento fotogramétrico UAV a las fachadas y cubierta visibles desde el espacio público exterior. Las patologías presentes en las superficies interiores del conjunto monástico no han sido documentadas en el presente estudio.
- **Limitaciones del instrumento de recolección:** El UAV *Autel Robotics XT705* empleado presenta restricciones en la estabilización óptica ante vientos superiores a 8 m/s y limitaciones en la autonomía de batería (\approx 38 minutos de vuelo por batería), lo que condicionó la planificación del levantamiento a condiciones de viento favorables y requirió la gestión de múltiples baterías para completar la cobertura total de la envolvente de la edificación.
- **Limitaciones en la digitalización de patologías:** La delimitación de los polígonos de patologías sobre el modelo tridimensional, aunque apoyada en la alta resolución del modelo fotogramétrico, está sujeta a criterios de interpretación visual del investigador, particularmente en zonas de transición entre tipologías de deterioro coexistentes. Las posibles inconsistencias en los criterios de delimitación entre polígonos adyacentes pueden introducir una variabilidad estimada en las áreas calculadas que debe ser considerada en la interpretación de los resultados.
- **Representatividad temporal:** El levantamiento fotogramétrico se efectuó en una única fecha correspondiente al período de transición entre la temporada de lluvias y la temporada seca en Ayacucho, condición que podría no ser representativa del estado máximo de biodeterioro (temporada húmeda) ni del estado de mayor exposición a erosión eólica (temporada seca).

1.5. Objetivos de la investigación

1.5.1. Objetivo general

Identificar los daños estructurales de la Iglesia Santa Teresa de la ciudad de Ayacucho a partir de la evaluación fotogramétrica con drones.

1.5.2. Objetivos específicos

1. Determinar la dimensión de los diversos daños que afectan a la estructura de la iglesia San Teresa en la ciudad de Ayacucho.
2. Determinar la precisión de la fotogrametría con UAV (drones) para la evaluación de daños al monumento histórico iglesia Santa Teresa en la ciudad de Ayacucho.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes

2.1.1. Investigaciones internacionales

A continuación, se exponen las diferentes investigaciones internacionales que detallan cómo los métodos no invasivos —fotogrametría UAV, reconstrucción SfM-MVS, escáner láser terrestre, termografía infrarroja y ensayos no destructivos— han sido aplicados en estudios orientados a la detección, mapeo y cuantificación de patologías en bienes patrimoniales edificados, así como su integración con modelos de información de edificios históricos (HBIM), gemelos digitales y algoritmos de inteligencia artificial para el diagnóstico técnico del estado de conservación.

Merzhiievska et al. (2026) describieron un modelo educativo innovador para la preservación del patrimonio arquitectónico de Ucrania en contexto bélico, fundamentado en el uso de fotogrametría, escáner láser y modelado 3D para la documentación remota y la evaluación de daños en monumentos amenazados por el conflicto armado ruso-ucraniano. El estudio subraya la necesidad del monitoreo continuo, la documentación digital y la sostenibilidad tecnológica para proteger el patrimonio cultural irremplazable ante amenazas contemporáneas de origen geopolítico y bélico.

F. Chen et al. (2026) sintetizaron el estado del arte de la teledetección aplicada a la conservación del patrimonio cultural mediante un análisis bibliométrico sistemático de publicaciones arbitradas de la Web of Science (1900–2024), identificando los métodos, plataformas sensoriales y aplicaciones más relevantes que incluyen radar de apertura sintética, sensores ópticos, escáner láser y vehículos UAV. Los resultados proponen un marco teórico integrador de datos multiespaciotemporales y señalan la cartografía de riesgo de peligros y la evaluación de sostenibilidad como direcciones prioritarias para la investigación futura en la gestión y monitoreo del patrimonio edificado.

Colace et al. (2026) propusieron un marco metodológico computacional para la creación de gemelos digitales en la conservación del patrimonio arquitectónico, integrando modelado semántico mediante HBIM, recolección de datos en tiempo real a través de dispositivos IoT y técnicas de aprendizaje automático para el análisis de tendencias de deterioro. La metodología fue validada en el Puente Leproso, un puente romano en Benevento, Italia, demostrando que la colaboración entre HBIM, IoT e inteligencia artificial facilita la transición de una gestión reactiva hacia una conservación preventiva e inteligente del patrimonio edificado.

Cudzik et al. (2025) evaluaron la integración de la fabricación digital con técnicas tradicionales de conservación en la restauración de una balastrada barroca de la iglesia de Tuczno, Polonia, combinando fotogrametría terrestre de corto alcance (TSRP) con fresado CNC para la replicación precisa de elementos decorativos faltantes. Los resultados evidencian que las herramientas digitales complementan eficazmente los métodos

artesanales convencionales, mejorando la precisión, eficiencia y fidelidad histórica en los procesos de restauración patrimonial.

Park et al. (2025) desarrollaron una metodología automatizada de detección de daños estructurales en edificios patrimoniales de los siglos XIX–XX mediante el algoritmo de aprendizaje automático R-C-C combinado con escaneo láser 3D terrestre, aplicado a seis edificaciones construidas con ladrillo rojo, piedra caliza y terracota. Los resultados confirman que la visibilidad óptima de fisuras alcanzó el 74,28 % en muros de ladrillo y el 82,56 % en columnas de terracota, evidenciando que el enfoque de ensayos no destructivos (NDT) basado en rugosidad superficial y nube de puntos permite una evaluación precisa del estado estructural sin contacto físico con el elemento histórico.

Colace et al. (2025) revisaron los principales desafíos y avances de la inteligencia artificial aplicada a la protección del patrimonio cultural, clasificando las aplicaciones de aprendizaje automático y aprendizaje profundo según el tipo de bien patrimonial, los datos empleados y los objetivos de conservación, incluyendo el análisis de artefactos, estrategias de restauración y mantenimiento predictivo. El estudio concluye que la integración multidisciplinaria de herramientas de IA con técnicas tradicionales de conservación es indispensable para una gestión ética, eficiente y sostenible del patrimonio edificado.

Yao et al. (2025) implementaron un levantamiento digital colaborativo aire-tierra combinando fotografía oblicua UAV (DJI Mavic 3E, solapamiento vertical 90 %) y escaneo láser 3D terrestre (FARO Focus Premium, error ± 1 mm) para la conservación del sitio histórico Shaoxing Lvfu, China, generando una nube de puntos de alta densidad y un mapa de proyección ortográfica a escala 1:100. Los resultados verificaron desviaciones de verticalidad significativas en la estructura y confirmaron la utilidad del paradigma «adquisición–integración–procesamiento–aplicación» para la protección digital de bienes patrimoniales.

Bourgeois et al. (2025) exploraron el desarrollo y aplicación de elementos impresos en 3D con sensores integrados para la conservación del Monasterio de Batalha, Sitio Patrimonio Mundial de la UNESCO, evaluando técnicas de extrusión y *binder jetting* con materiales de cal hidráulica natural (NHL) y resinas poliméricas para la reproducción de detalles arquitectónicos de alta complejidad. Los hallazgos evidencian que la combinación de fotogrametría, modelado digital y fabricación aditiva permite replicar con precisión elementos dañados del patrimonio edificado mientras se monitorea en tiempo real el estado de salud estructural de las edificaciones históricas.

Nowogońska y Drobiec (2025) analizaron la efectividad de métodos de ensayo no destructivos (NDT) y semidestructivos para el diagnóstico de elementos de madera estructural en una iglesia del siglo XV en Sieroty, Polonia, empleando tomografía ultrasónica, martillo de madera y medición de humedad sobre elementos de la armadura de cubierta. Los resultados demuestran que el tomógrafo ultrasónico ofrece los mejores resultados para la evaluación cualitativa de la madera histórica, y que el uso simultáneo de varios métodos de diagnóstico no invasivo resulta indispensable para caracterizar

adecuadamente el estado de conservación de estructuras de madera en edificios patrimoniales.

Mishra y Lourenço (2024) sintetizaron una revisión del estado del arte sobre la inspección visual asistida por inteligencia artificial para estructuras del patrimonio cultural, analizando el potencial de técnicas de aprendizaje profundo y visión por computador aplicadas a imágenes digitales para la detección y cuantificación de defectos como meteorización, pérdida de mortero, fisuración, erosión, biodeterioro y vandalismo en sitios patrimoniales. La revisión señala que, si bien existen estudios sobre detección de daños en estructuras de hormigón y puentes mediante inteligencia artificial, son escasas las investigaciones que han cuantificado defectos en estructuras patrimoniales mediante el paradigma del aprendizaje profundo, constituyendo una brecha metodológica relevante. Los autores concluyen que la inspección digital asistida por inteligencia artificial incrementa la confianza en la evaluación del daño y que la integración de UAV con redes neuronales convolucionales representa la dirección más prometedora para la documentación no invasiva del patrimonio edificado.

Penjor et al. (2024) examinaron el papel del modelado de información de edificios patrimoniales (HBIM) en la conservación del patrimonio cultural a través de una revisión sistemática de 59 estudios del período 2013–2023, identificando los principales desafíos técnicos de su adopción, incluyendo limitaciones en la adquisición de datos, necesidad de habilidades especializadas y dificultades en el modelado de detalles históricos complejos. El estudio concluye que un enfoque colaborativo e interdisciplinario que combine escáner láser, fotogrametría y HBIM resulta indispensable para la preservación sostenible del patrimonio edificado.

Cuadros-Rojas et al. (2024) desarrollaron una metodología de bajo costo basada en fotogrametría SfM terrestre para asistir la evaluación estructural de la iglesia de San Juan Bautista en el templo inca de Huaytará, Perú, estructura con materiales mixtos de adobe, piedra y ladrillo, obteniendo un modelo geométrico con un error inferior al 2 % respecto a mediciones de referencia. El estudio constituye un antecedente directo de la aplicabilidad de la fotogrametría SfM en el diagnóstico de edificaciones históricas de tierra y piedra en el contexto andino peruano.

Sacco et al. (2024) investigaron la detección preliminar de daños en bóvedas de mampostería de dos iglesias históricas mediante análisis de deformación geométrica sobre nubes de puntos 3D obtenidas por escáner láser terrestre y fotogrametría SfM, comparando geometrías de referencia derivadas del levantamiento con primitivas geométricas ajustadas. Los mapas de desviación generados permitieron identificar patrones de deformación vinculados a mecanismos de daño documentados en la literatura, demostrando que el análisis no invasivo de nubes de puntos constituye una herramienta eficaz para el diagnóstico estructural preliminar de bóvedas patrimoniales.

Moyano et al. (2024) evaluaron la efectividad de algoritmos de aprendizaje automático (Random Forest) y redes neuronales convolucionales profundas (PointNet) para la

clasificación y segmentación automática de nubes de puntos de edificios históricos en entornos HBIM, comparando su desempeño con software comercial de geomática utilizado por topógrafos. Los resultados destacan el elevado potencial de los enfoques de inteligencia artificial para la caracterización geométrica precisa de elementos arquitectónicos históricos, reduciendo los tiempos de modelado y mejorando la calidad de los modelos BIM para la conservación patrimonial.

Gomes y Tomé (2023) integraron escáner láser terrestre (TLS), fotogrametría digital aérea (ADP) y termografía infrarroja (IRT) acoplados a vehículos UAV para la digitalización, inspección y mapeo de deterioro del Castillo Moro de Sintra, Portugal, obteniendo nubes de puntos densas y mapas de degradación superficial de alta resolución. Los resultados demuestran el elevado potencial de la combinación de estas técnicas no invasivas para acelerar la documentación del estado de conservación y apoyar proyectos de restauración de estructuras históricas.

Fiorillo et al. (2023) presentaron una metodología ágil para la cartografía automatizada de daños en cubiertas de edificios históricos en zonas sísmicas mediante fotogrametría UAV y clasificación supervisada por aprendizaje automático, validada en un edificio histórico con diversas tipologías de daño. El ortomosaico de cubierta generado permitió documentar intervenciones pasadas y el estado de deterioro actual, con resultados prometedores en velocidad y cobertura respecto a los métodos de inspección convencionales.

Kong y Hucks (2023) formularon un *framework* de gemelo digital para el monitoreo de deterioraciones estructurales en edificios históricos, integrando tecnologías fotogramétricas y algoritmos de procesamiento de nube de puntos para generar modelos virtuales de la estructura en diferentes instancias temporales de inspección. La metodología fue validada en un puente histórico de arco de piedra, detectando múltiples deterioraciones estructurales simuladas y demostrando la viabilidad del enfoque para la gestión proactiva de la conservación patrimonial.

Liu y Chen (2023) sintetizaron un enfoque de conservación digital de edificios históricos chinos mediante la reconstrucción 3D a partir de información recopilada con drones, empleando simulación numérica del modelo virtual para investigar estrategias de restauración sin intervención física directa. El estudio concluye que las tecnologías digitales de precisión tridimensional ofrecen ventajas sustanciales sobre los métodos tradicionales en términos de eficiencia, reproducibilidad y prevención de daños secundarios en la intervención sobre el patrimonio edificado.

Muradov et al. (2022) propusieron un sistema de evaluación no destructiva de humedad en muros de edificios patrimoniales mediante espectroscopía de microondas y fotogrametría de corto alcance georreferenciada, validado en el Palacio de Juan III Sobieski en Wilanów, Polonia. Los resultados evidencian que el sistema de microondas penetra a mayor profundidad que los medidores de pines convencionales, proporcionando información más completa sobre el contenido de humedad en materiales históricos y constituyendo una herramienta no invasiva de alta utilidad para el diagnóstico de patologías de humedad.

2.1.2. Investigaciones nacionales

En el contexto de la investigación tecnológica peruana orientada a la conservación del patrimonio edificado, múltiples estudios han explorado la aplicación de métodos no invasivos —fotogrametría UAV, escáner láser terrestre y ensayos no destructivos— para la documentación, diagnóstico y gestión de bienes patrimoniales históricos. Estos antecedentes conforman el sustento científico nacional que respalda la aplicación de metodologías de levantamiento digital y evaluación patológica para afrontar las problemáticas vigentes de deterioro y conservación del patrimonio edificado peruano.

Vizcaíno Hernández (2024) investigaron el deterioro del patrimonio edificado a causa de patologías acumulativas de humedad en elementos constructivos de mampostería histórica. Los resultados confirman que es viable reproducir el deterioro de eflorescencias en laboratorio a escala real, evidenciando una correlación positiva entre la concentración y los ciclos de secado, y que la fotogrametría constituye una herramienta eficaz para la documentación no invasiva de patologías de humedad en el patrimonio edificado.

Cárdenas Mamani y Ccaso Huanacuni (2024) realizaron un análisis comparativo entre el levantamiento topográfico mediante vehículo aéreo no tripulado (UAV) y el sistema de posicionamiento global diferencial (DGPS) en la Asociación de Granjas Peregrinos de Jonas, distrito de Calana, Tacna, empleando fotogrametría con puntos de fotocontrol y procesamiento de imágenes para la obtención de superficies y cálculo de volúmenes de movimiento de tierras. Los resultados demuestran que el levantamiento con UAV no presenta variación técnica significativa respecto al DGPS en terrenos sin interferencias, y que ofrece ventajas en costo y seguridad operativa, validando la fotogrametría UAV como metodología confiable para levantamientos topográficos de precisión en el contexto peruano.

Fernández Muñoz (2024) propusieron la aplicación de fotogrametría con drones integrada a la metodología BIM mediante el software Istram para el diseño geométrico de la carretera Pindicucho–Puma Marca en el distrito de Limabamba, ejecutando 10 vuelos sobre una ruta de 3 km y procesando las imágenes para la obtención de planos topográficos y ortofoto. Los resultados evidencian que el levantamiento fotogramétrico con drones demanda solo el 14,3 % del tiempo del método tradicional y que la integración con la metodología BIM reduce el tiempo total de diseño geométrico en un 48,3 %, validando la fotogrametría UAV como herramienta de alta eficiencia para levantamientos topográficos de precisión en el contexto nacional peruano.

Pérez Julca (2024) ejecutaron un estudio patológico del edificio de la Universidad Nacional de Cajamarca, sede Cajabamba, mediante fichas de evaluación patológica, inspección visual detallada y el ensayo no destructivo de esclerometría para verificar la resistencia del concreto en elementos estructurales. Los resultados identificaron grietas (32,4 %) y desprendimientos (17,6 %) de carácter mecánico, fisuras (20,6 %) mecánicas y físicas, eflorescencias (23,5 %) de carácter químico y manchas (5,9 %) biológicas, afectando principalmente muros (38 %), losas (23 %) y vigas (21 %), lo que demuestra la utilidad

de la inspección visual sistemática y los ensayos no destructivos para la clasificación y cuantificación de patologías en edificaciones con deterioro avanzado.

Ataucusi Choquecahua (2024) abordaron la restauración arquitectónica del Arco del Triunfo en el Centro Histórico de la Ciudad de Ayacucho empleando fotogrametría mediante vehículos aéreos no tripulados y el modelo HBIM para la reconstrucción virtual 3D del monumento histórico, digitalizando los detalles arquitectónicos del bien patrimonial y generando una base de datos geométrica para la gestión de proyectos de conservación y restauración. Los resultados demuestran que la combinación de fotogrametría y modelado HBIM facilita el análisis y la administración de la restauración arquitectónica digital de monumentos históricos ayacuchanos, constituyendo un antecedente local directo de la aplicabilidad de métodos no invasivos en el diagnóstico del patrimonio edificado de Ayacucho.

Palomino Arango (2022) evaluaron los daños estructurales del Puente Sutoqchaca de la Alameda Marqués de Valdelirios de Ayacucho mediante fotogrametría con drone, estableciendo seis puntos de control para la georreferenciación de las imágenes, con un traslape del 70 %, y complementando el levantamiento con inspección visual en campo. Los resultados identificaron diversos daños estructurales en el puente colonial y confirmaron que el levantamiento fotogramétrico con drones resulta muy eficaz para el monitoreo de monumentos históricos de geometría compleja e inaccesible, alcanzando discrepancias de 7 a 8 mm en los datos obtenidos, lo que valida la metodología como herramienta no invasiva para el diagnóstico técnico del patrimonio edificado ayacuchano.

2.2. Bases teóricas

2.2.1. Detección y análisis de daños:

2.2.1.1 Definición y clasificación del patrimonio cultural edificado

El patrimonio cultural edificado comprende el conjunto de construcciones, conjuntos urbanos y sitios que poseen valor excepcional desde el punto de vista histórico, artístico, científico, estético, etnológico o antropológico, y cuya preservación resulta indispensable para la transmisión de la memoria colectiva a las generaciones futuras. Jokilehto (1999) precisa que la noción de patrimonio arquitectónico no se limita a los monumentos individuales de reconocida excelencia, sino que abarca también los conjuntos y los entornos en los que dichas edificaciones adquieren pleno significado cultural. Esta concepción amplia reconoce que el valor patrimonial es una construcción social y temporal, sujeta a procesos de identificación, evaluación y protección institucionalizados.

La clasificación del patrimonio edificado admite múltiples criterios. Desde la perspectiva tipológica, se distinguen los monumentos aislados catedrales, iglesias, palacios, fortalezas, edificios civiles y residenciales de relevancia histórica, los conjuntos urbanos centros históricos, barrios tradicionales, aldeas y los sitios, entendidos como obras combinadas del hombre y la naturaleza que poseen valor universal excepcional. Desde la perspectiva material, el patrimonio edificado puede clasificarse según su sistema constructivo en obra de piedra, obra de adobe y tapia, obra de ladrillo cocido con mortero de cal o de yeso, y construcciones mixtas, categoría esta última que caracteriza a gran parte de la arquitectura colonial latinoamericana (Doehne & Price, 2010).

Figura 2

Clasificación del patrimonio cultural edificado-evaluación de estructuras históricas compuestas de adobe, piedra y mampostería de ladrillo.



Nota. Adaptado de Cuadros-Rojas et al. (2024).

2.2.1.2 Marco normativo internacional

El marco normativo internacional del patrimonio edificado se articula principalmente a través de la Carta de Venecia de 1964, documento fundacional adoptado por el II Congreso Internacional de Arquitectos y Técnicos de Monumentos Históricos y que define los principios de conservación y restauración vigentes hasta la actualidad.

La Carta establece que la conservación de un monumento implica la de su entorno a escala pertinente, y que en ningún caso podrán ser permitidas las reconstrucciones hipotéticas. Jokilehto (1999) sitúa este documento en el contexto de la evolución del pensamiento conservacionista europeo, destacando su carácter de consenso internacional y su influencia directa sobre la legislación patrimonial de la mayoría de los países signatarios.

El Consejo Internacional de Monumentos y Sitios (ICOMOS) ha desarrollado desde 1965 un conjunto de cartas, declaraciones y documentos de orientación que complementan y actualizan los principios de la Carta de Venecia.

Entre estos, la Carta de Cracovia del año 2000 introduce el concepto de proyecto de restauración como proceso dinámico y participativo, mientras que los Principios de La Valeta de 2011 abordan específicamente la salvaguarda de los centros históricos urbanos. Más recientemente, Coletti et al. (2024) subrayan que el marco normativo internacional ha evolucionado hacia la incorporación de herramientas digitales de documentación y análisis como componentes legítimos y necesarios de cualquier proceso de gestión patrimonial contemporáneo.

2.2.1.3 Marco normativo nacional

En el ámbito peruano, el patrimonio cultural de la Nación se rige por la Ley N.º 28296, Ley General del Patrimonio Cultural de la Nación (2004), que establece las políticas nacionales de defensa, protección, promoción, propiedad y régimen legal del patrimonio cultural peruano. Esta norma define como bien integrante del patrimonio cultural de la Nación a toda manifestación del quehacer humano que por su importancia, valor y significado paleontológico, arqueológico, arquitectónico, histórico, artístico, militar, social, antropológico, tradicional, religioso, etnológico, científico, tecnológico o intelectual, sea declarado como tal o sobre el que exista la presunción legal de serlo. La administración y supervisión de los bienes integrantes del patrimonio cultural de la Nación corresponde al Ministerio de Cultura, conforme al Decreto Legislativo N° 1047.

En este contexto normativo, la Congreso de la República del Perú (2024), promulgada el 19 de julio de 2024 y publicada en el Diario Oficial El Peruano, declara de interés nacional la restauración, protección, conservación, puesta en valor y gestión de seis bienes inmuebles patrimoniales ubicados en cinco departamentos del país y la Provincia Constitucional del Callao: la Fortaleza del Real Felipe del Callao, la Casona del Glorioso Colegio Nacional San Carlos en Puno, la Iglesia y Convento de San Francisco en Cajamarca, el Templo de San Sebastián de Curasco en Apurímac, la Casa Hacienda de Unanue en Lima y la Casa

Hacienda de Ciro Alegría en La Libertad. La norma establece un marco de coordinación intergubernamental en el que los gobiernos locales y regionales, en articulación con el Ministerio de Cultura y el Ministerio de Comercio Exterior y Turismo, priorizarán las acciones de conservación de acuerdo con sus competencias. Esta ley evidencia el reconocimiento expreso del Estado peruano sobre el deterioro progresivo del patrimonio edificado nacional y la necesidad de implementar intervenciones técnicas sistemáticas para su preservación, contexto en el que la aplicación de métodos no invasivos de diagnóstico adquiere especial relevancia.

Figura 3

Ley N° 32094 declara de interés nacional la restauración de seis monumentos históricos



Nota. Adaptado de Congreso de la República del Perú (2024).

2.2.1.4 Arquitectura barroca mestiza ayacuchana

La arquitectura religiosa del Centro Histórico de Ayacucho constituye una expresión singular del barroco mestizo andino, estilo que surge en el siglo XVII como resultado de la apropiación y reinterpretación de los modelos europeos por parte de los artífices locales. Zeballos-Velarde et al. (2020) señalan que las iglesias coloniales de Ayacucho comparten características constructivas comunes: Estructura portante de sillería de piedra andesita, muros de adobe en los paños secundarios, portadas ornamentales talladas en piedra con profusa decoración de motivos fitomorfos, zoomorfos y antropomorfos, torres campanario de planta cuadrada o poligonal, y cubiertas de teja artesanal sobre estructura de madera. Esta combinación de sistemas constructivos y materiales de diferente comportamiento mecánico e higrotérmico genera condiciones específicas de vulnerabilidad frente a los agentes de deterioro ambiental y sísmico.

Figura 4
Iglesias coloniales de Ayacucho .



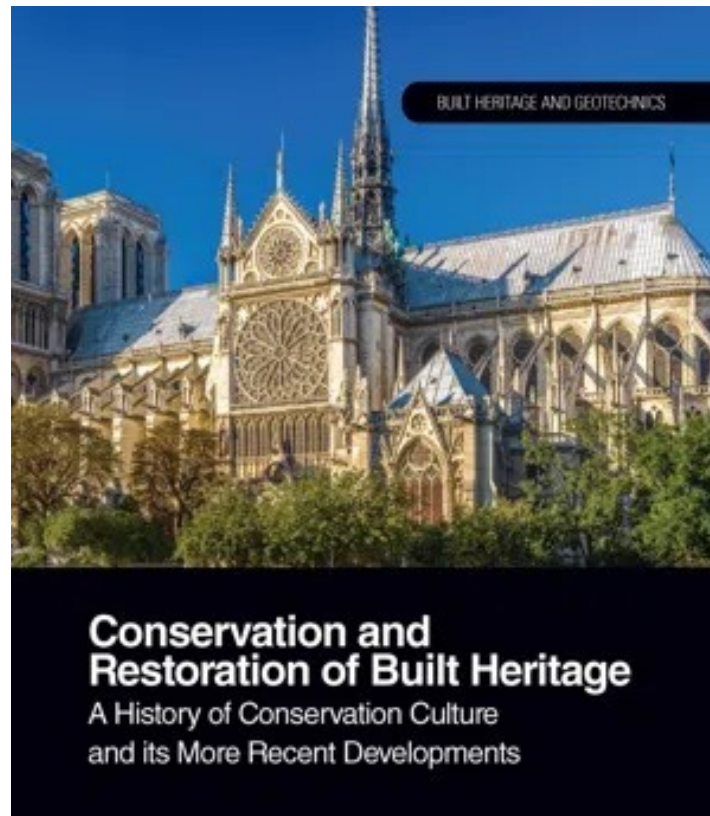
Nota. Adaptado de Veronika's Adventure (2023).

2.2.2. Conservación y restauración del patrimonio edificado

2.2.2.1 Principios de conservación preventiva

La conservación preventiva constituye el conjunto de acciones orientadas a evitar o retardar el deterioro futuro del bien patrimonial, actuando sobre las causas del daño antes de que este se manifieste de forma irreversible. A diferencia de la restauración, que interviene sobre daños ya producidos, la conservación preventiva adopta una lógica proactiva que privilegia el monitoreo continuo del estado del bien, el control de los factores ambientales de deterioro y el mantenimiento periódico de los elementos constructivos. Doehne y Price (2010) enfatizan que la conservación preventiva resulta invariablemente más eficiente en términos económicos y técnicos que la restauración reactiva, dado que las intervenciones tempranas sobre procesos de deterioro incipientes son de menor complejidad, menor costo y menor riesgo de alteración de la autenticidad del bien.

Bonazza y Sardella (2023) precisan que la conservación preventiva del patrimonio edificado en el contexto del cambio climático requiere la incorporación de metodologías de diagnóstico cuantitativo que permitan estimar con precisión la tasa de deterioro en función de las variables ambientales. En este marco, las técnicas de documentación geométrica de alta precisión —incluyendo la fotogrametría UAV y el escáner láser terrestre— adquieren relevancia como instrumentos de monitoreo que permiten detectar variaciones dimensionales imperceptibles a la inspección visual directa.

Figura 5*Manual de principios de conservación preventiva*

Nota. Adaptado de D'Agostino (2021).

2.2.2.2 Diagnóstico técnico como herramienta de conservación

El diagnóstico técnico del estado de conservación de un bien patrimonial constituye la fase previa e indispensable a cualquier intervención de conservación o restauración. Su objetivo es determinar de manera sistemática y objetiva la naturaleza, extensión, distribución y causas de los daños presentes, proporcionando la información necesaria para la toma de decisiones sobre las prioridades y modalidades de intervención. Coletti et al. (2024) distinguen tres niveles de diagnóstico según su profundidad y los instrumentos empleados: el diagnóstico visual preliminar, basado en la inspección directa y la documentación fotográfica; el diagnóstico técnico instrumental, que incorpora técnicas analíticas no destructivas o microdestructivas para la caracterización de materiales y la detección de anomalías subsuperficiales; y el diagnóstico integral, que integra los resultados de ambos niveles con análisis estructurales, históricos y ambientales para formular un juicio comprensivo sobre el estado del bien.

2.2.2.3 Principio de mínima intervención

El principio de mínima intervención establece que cualquier actuación sobre un bien patrimonial debe limitarse estrictamente a lo necesario para detener el proceso de deterioro y garantizar la conservación del bien, evitando toda adición o transformación que no sea imprescindible. Este principio, enunciado en la Carta de Venecia y desarrollado

extensamente en la doctrina conservacionista posterior, implica la preferencia por los tratamientos reversibles sobre los irreversibles, por las intervenciones puntuales sobre las generales, y por la consolidación sobre la sustitución. Jokilehto (1999) subraya que el principio de mínima intervención no debe interpretarse como inacción, sino como rigor metodológico: toda intervención debe estar precedida de un diagnóstico técnico exhaustivo que la justifique y delimite su alcance con precisión.

2.2.3. Patologías en edificaciones históricas

2.2.3.1 Definición y clasificación general de patologías

En el ámbito de la conservación del patrimonio edificado, el término patología designa el conjunto de alteraciones, deterioros y daños que afectan a los materiales constitutivos, los sistemas constructivos y los elementos formales de una edificación, comprometiendo su integridad material, su legibilidad y su valor cultural. Doehne y Price (2010) establecen que las patologías en edificaciones históricas de piedra pueden clasificarse según su origen en tres grandes grupos: físicas —incluye erosión, fractura, disgregación y desprendimiento—, químicas —incluye solubilización, oxidación, carbonatación y formación de sales solubles— y biológicas —incluye biodeterioro por organismos fotosintéticos, heterótrofos y animales. Esta clasificación tripartita es coherente con la adoptada por la norma italiana UNI 11182:2006, que constituye el referente terminológico más utilizado en la literatura científica internacional sobre conservación del patrimonio construido.

Coletti et al. (2024) amplían esta clasificación incorporando una cuarta categoría: las patologías de origen antrópico, que comprenden las alteraciones producidas por acciones humanas directas sobre el bien, incluyendo intervenciones inadecuadas de restauración, grafiti y vandalismo, contaminación atmosférica urbana e industrial, y modificaciones arquitectónicas sin criterio patrimonial.

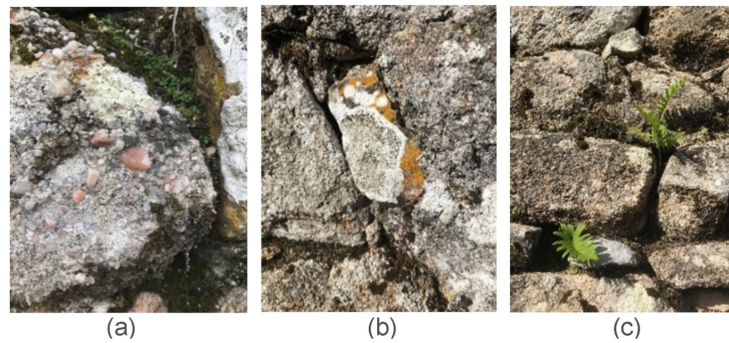
2.2.3.2 Biodeterioro biológico

El biodeterioro designa el conjunto de alteraciones físicas, químicas y estéticas producidas en los materiales pétreos y de revestimiento por la actividad de organismos vivos, incluyendo microorganismos —bacterias, cianobacterias, hongos, algas—, líquenes, briófitos y plantas vasculares. Ruiz-De la Cruz et al. (2025) documentan que el biodeterioro constituye uno de los factores de deterioro más extendidos en el patrimonio arquitectónico latinoamericano, identificando 178 especies fototróficas en 43 monumentos de la región.

Los factores ambientales que favorecen la colonización biológica incluyen la humedad relativa elevada, la disponibilidad de agua en estado líquido sobre la superficie, la orientación norte o sombría, la rugosidad superficial y la composición química del sustrato. Bonazza y Sardella (2023) señalan que el cambio climático está modificando los patrones de distribución espacial de los organismos deteriorantes en el patrimonio edificado europeo y latinoamericano, con expansión de especies termófilas hacia latitudes superiores y extensión de los períodos de actividad biológica como consecuencia del incremento de las temperaturas medias.

Figura 6

Colonización biológica (musgo) y formación de cristales (a); colonización biológica (líquenes y hongos) (b); colonización biológica (vegetación) y manchas de humedad (c)



Nota. Adaptado de Gomes & Tomé (2023)

2.2.3.3 Erosión superficial

La erosión superficial en edificaciones históricas se manifiesta como la pérdida progresiva de material de las capas superficiales expuestas a los agentes ambientales, resultando en la reducción del espesor, el embotamiento del relieve ornamental y la pérdida de la textura original. Los mecanismos de erosión en materiales pétreos comprenden la abrasión eólica por partículas en suspensión, la disolución química por agua de lluvia ácida, los ciclos de cristalización-disolución de sales solubles en los poros, y los ciclos de hielo-deshielo en climas fríos. Doehne y Price (2010) identifican la cristalización de sales como el mecanismo físico-químico más destructivo para los materiales porosos del patrimonio edificado, dado que las presiones generadas durante la cristalización en los poros pueden superar la resistencia a tracción del material y producir disgregación, exfoliación y descamación. En los revestimientos de mortero y estuco, la erosión superficial se manifiesta adicionalmente como pérdida de la capa de pintura y descohesión del material de acabado.

2.2.3.4 Fisuras y grietas

Las fisuras y grietas constituyen discontinuidades que afectan la integridad del material pétreo o del revestimiento, comprometiendo potencialmente la capacidad portante de los elementos estructurales. La distinción terminológica entre fisura y grieta se establece convencionalmente en función de su anchura: Las fisuras presentan aberturas inferiores a 0,2 mm, mientras que las grietas superan ese umbral. Yaşar Yiğit y Uysal (2024) señalan que la detección y caracterización dimensional de las fisuras mediante fotogrametría UAV y tecnología de gemelo digital permite obtener mediciones de longitud y apertura con precisión milimétrica, superando las limitaciones de los métodos de inspección visual directa en zonas de difícil acceso como las torres campanario y las cornisas superiores.

Desde el punto de vista de sus causas, las grietas en edificaciones históricas pueden clasificarse en: Activas cuando el proceso que las genera permanece en curso y pasivas o estabilizadas cuando la causa ha cesado o se ha estabilizado. Las causas más frecuentes incluyen los asentamientos diferenciales de la cimentación, los movimientos sísmicos, las

deformaciones térmicas por gradientes de temperatura, la expansión diferencial por humedecimiento y secado, y la pérdida de cohesión del mortero de junta en obra de sillería.

2.2.3.5 Humedad

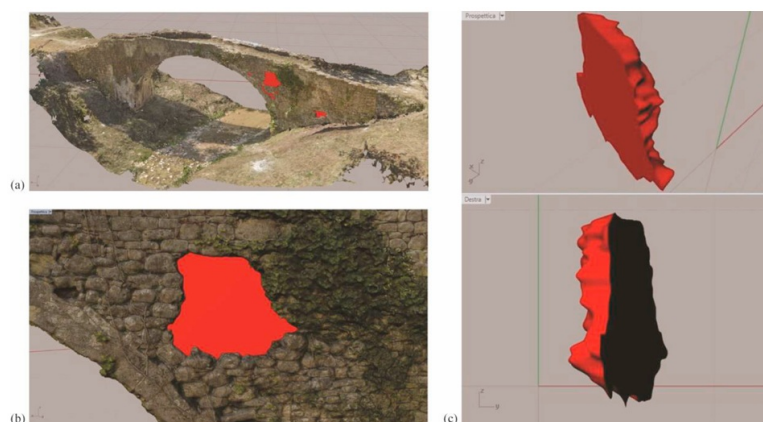
La humedad constituye uno de los agentes de deterioro de mayor incidencia en el patrimonio edificado, actuando tanto como mecanismo de daño directo ciclos de mojado y secado, expansión volumétrica, solubilización de componentes como como vector que facilita y acelera otros procesos de deterioro, en particular el biodeterioro y la cristalización de sales. Doehne y Price (2010) distinguen los siguientes mecanismos de penetración de agua en las edificaciones históricas: humedad de capilaridad ascendente por contacto con el terreno, filtración por cubierta o por discontinuidades en el revestimiento exterior, condensación superficial o intersticial por gradiente de temperatura, y humedad de obra retenida en materiales insuficientemente curados. En las iglesias coloniales de Ayacucho, la humedad de capilaridad ascendente constituye una patología particularmente extendida dada la ausencia de barreras impermeables en la cimentación original y el contacto directo de los muros de adobe con el suelo.

2.2.3.6 Desprendimiento de revestimientos

El desprendimiento designa la separación parcial o total de una capa de material respecto al sustrato sobre el que fue aplicada, manifestándose en estadios progresivos que van desde el abombamiento y la microfisuración de la capa de acabado hasta la caída de fragmentos. Gaspar y de Brito (2005) identifican los mecanismos causales del desprendimiento en revestimientos exteriores de edificaciones en los siguientes grupos: Incompatibilidad física entre el revestimiento y el soporte diferente módulo de elasticidad, coeficiente de dilatación térmica o porosidad, pérdida de adherencia por deterioro de la interfaz acción de sales solubles, ciclos de mojado y secado, movimientos sísmicos e incompatibilidad química entre los materiales del revestimiento y el soporte.

Figura 7

Desprendimiento en puente de mampostería.



Nota. Adaptado de Cavalagli et al. (2020)

2.2.3.7 Daño antrópico

El daño antrópico comprende todas las alteraciones producidas sobre el bien patrimonial por acciones humanas directas, intencionales o no intencionales. En el ámbito de las fachadas de edificaciones históricas, las manifestaciones más frecuentes de daño antrópico incluyen: Grafiti y pintadas sobre la superficie de los paramentos, instalación no autorizada de elementos publicitarios, cableado y canalizaciones, modificaciones arquitectónicas sin criterio patrimonial, e impactos mecánicos por vehículos o actividades en el espacio público adyacente. Coletti et al. (2024) señalan que el daño antrópico presenta una distribución espacial característica, concentrándose preferentemente en las zonas de la fachada accesibles desde el nivel de la acera y en los sectores adyacentes a accesos y zonas de tránsito intenso.

2.2.4. Criterios de severidad del daño

2.2.4.1 Sistemas de clasificación por niveles de severidad

La clasificación del estado de conservación por niveles de severidad constituye una herramienta fundamental del diagnóstico técnico patrimonial, pues permite traducir las observaciones cualitativas de la inspección visual en una escala cuantificable que facilita la comparación entre zonas, la comunicación entre profesionales y la priorización de intervenciones. Gaspar y de Brito (2005) proponen un sistema de clasificación en cinco niveles para fachadas de edificaciones de 1 (sin defectos significativos) a 5 (defectos muy severos)— basado en el porcentaje de superficie afectada y el tipo de defecto predominante, sistema que ha sido ampliamente adoptado en la literatura científica sobre diagnóstico de patologías en edificaciones.

Para el patrimonio edificado histórico, la literatura especializada reciente propone sistemas de clasificación que incorporan no solo la extensión del daño sino también su profundidad y su potencial de progresión. Yaşar Yiğit y Uysal (2024) emplean una clasificación de cuatro niveles —leve, moderado, severo y muy severo— aplicada a la detección automática de fisuras en patrimonio edificado mediante fotogrametría UAV. Esta clasificación resulta compatible con los criterios técnicos desarrollados en el presente estudio y con la estructura de resultados adoptada para el análisis de las patologías de la Iglesia Santa Teresa.

2.2.4.2 Criterios técnicos de clasificación

Los criterios técnicos para la asignación del nivel de severidad a cada patología identificada se establecen en función de tres parámetros principales: La extensión del daño medida como porcentaje de la superficie de la zona o del elemento constructivo afectado, la profundidad de la alteración que determina si el daño afecta exclusivamente a la capa de acabado superficial o compromete el material de soporte y la localización estructural del daño que valora la incidencia del deterioro sobre elementos portantes o sobre la estanqueidad del cerramiento.

En la presente investigación, la clasificación por niveles de severidad se aplica a las

seis tipologías de patología identificadas y se establece con base en el área afectada (m^2) calculada mediante la digitalización de polígonos sobre el modelo fotogramétrico tridimensional, conforme a los umbrales técnicos definidos en el marco metodológico. (Zeballos-Velarde et al., 2020).

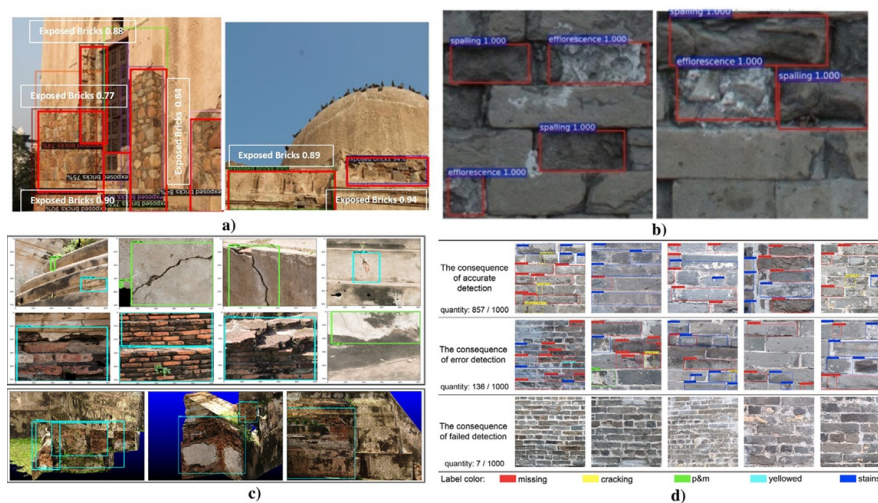
2.2.5. Cuantificación de superficies afectadas

2.2.5.1 Métodos de cuantificación de daños en patrimonio

La cuantificación objetiva de las superficies afectadas por patologías constituye uno de los requisitos metodológicos fundamentales del diagnóstico técnico patrimonial contemporáneo. Los métodos tradicionalmente empleados estimación visual por cuadrícula, medición directa con cinta métrica o taquímetro presentan limitaciones significativas en términos de precisión, reproducibilidad y seguridad del operador en zonas de difícil acceso. Pepe et al. (2022) revisan los métodos no invasivos disponibles para la documentación y cuantificación de daños en edificaciones patrimoniales, concluyendo que la fotogrametría UAV-SfM representa la solución de mayor equilibrio entre precisión métrica, cobertura espacial y costo operacional para edificaciones de geometría compleja.

Figura 8

Sistemas de inspección visual por defectos superficiales utilizando inteligencia artificial



Nota. Adaptado de Mishra & Lourenço (2024)

2.2.5.2 Digitalización de polígonos sobre modelos tridimensionales

La digitalización de polígonos sobre el modelo fotogramétrico tridimensional constituye el procedimiento empleado en la presente investigación para la delimitación y cuantificación de cada patología identificada. Este procedimiento consiste en la definición manual de los contornos de cada zona afectada mediante la superposición de polígonos sobre el modelo de teselas en el software Agisoft Metashape Professional, asignando a cada polígono un identificador de tipo de patología y calculando automáticamente su área georreferenciada en el sistema de coordenadas WGS 84 / UTM zona 18S + EGM2008. Yaşar Yiğit y Uysal (2024) demuestran que la integración de la digitalización manual de patologías con los modelos

de gemelo digital obtenidos por fotogrametría UAV permite alcanzar precisiones métricas en la estimación de áreas afectadas comparables a las obtenidas por métodos de contacto directo, con la ventaja adicional de la trazabilidad espacial completa de cada polígono digitalizado.

2.2.5.3 Cálculo automatizado de áreas georreferenciadas

El cálculo del área de cada polígono digitalizado se realiza mediante rutinas Python ejecutadas en la consola de Agisoft Metashape Professional, que extraen y procesan las coordenadas UTM de los vértices de cada polígono en el sistema de referencia WGS 84 / UTM zona 18S + EGM2008 para determinar el área afectada por tipología, por zona y el total general. Zeballos-Velarde et al. (2020) destacan que la georreferenciación de los resultados en un sistema de coordenadas métricas constituye una condición indispensable para la validez científica de las mediciones de área en modelos fotogramétricos, dado que los sistemas de coordenadas proyectadas como UTM preservan las proporciones de área en la zona de trabajo con distorsiones inferiores al 0,1%.

2.2.6. Diagnóstico técnico patrimonial

2.2.6.1 Definición y alcance del diagnóstico técnico

El diagnóstico técnico patrimonial se define como el proceso sistemático de recopilación, análisis e interpretación de la información relativa al estado de conservación de un bien patrimonial, con el objetivo de identificar las causas del deterioro, cuantificar su extensión y distribución, evaluar su gravedad y formular recomendaciones fundamentadas para la intervención. Coletti et al. (2024) precisan que el diagnóstico técnico contemporáneo del patrimonio edificado se caracteriza por la integración de múltiples fuentes de información—análisis histórico y documental, inspección visual, ensayos analíticos, modelado digital—y por la adopción de métricas cuantitativas que permitan sustentar las decisiones de intervención sobre bases objetivas y reproducibles.

2.2.6.2 Mapas temáticos de patologías

Los mapas temáticos de patologías constituyen la representación cartográfica del diagnóstico sobre la envolvente de la edificación, en los que cada tipo de daño se representa mediante una simbología de color estandarizada sobre el ortomosaico o el modelo tridimensional del bien. Yaşar Yiğit y Uysal (2024) señalan que la generación de cartografía temática de patologías sobre el modelo de gemelo digital obtenido por fotogrametría UAV constituye uno de los productos de mayor utilidad para la gestión patrimonial, pues permite visualizar de manera intuitiva la distribución espacial del deterioro, identificar patrones de concentración y superposición de patologías, y comunicar el estado de conservación a técnicos y decisores con diferentes niveles de especialización. En la presente investigación, los mapas temáticos de patologías se generan mediante la visualización de los polígonos digitalizados en el modelo de teselas tridimensional de Agisoft Metashape Professional.

2.3. Marco conceptual

2.3.1. Métodos no invasivos

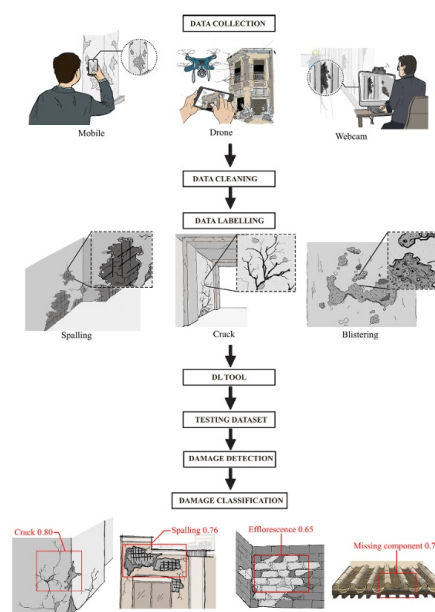
2.3.1.1 Definición y alcance de los métodos no invasivos

Los métodos no invasivos en el diagnóstico del patrimonio edificado se definen como el conjunto de técnicas de adquisición y análisis de información que permiten caracterizar el estado de conservación de un bien sin establecer contacto físico directo con su superficie ni extraer muestras de sus materiales constitutivos. De Fino et al. (2023), en su revisión sistemática de 117 publicaciones sobre evaluación del estado de conservación de edificaciones patrimoniales mediante fotogrametría, precisan que la condición de no invasividad es determinante en el contexto patrimonial, dado que cualquier contacto con superficies históricas conlleva el riesgo de introducir daños irreversibles en materiales cuya reposición auténtica es imposible.

La exigencia de no invasividad se articula con el principio de mínima intervención enunciado en la Carta de Venecia y con las disposiciones de la Ley N.º 28296, Ley General del Patrimonio Cultural de la Nación (2004), que establece que los bienes del patrimonio cultural de la Nación deben ser protegidos frente a cualquier acción que pueda alterar su autenticidad o integridad. En consecuencia, las técnicas de diagnóstico empleadas en edificaciones patrimoniales deben garantizar que el proceso de adquisición de datos no constituya en sí mismo una fuente de deterioro adicional. Zeballos-Velarde et al. (2020) señalan que en el contexto del patrimonio colonial peruano, esta exigencia adquiere especial relevancia dado el estado de fragilidad de los revestimientos y la sensibilidad de los morteros históricos de cal a cualquier tipo de perturbación mecánica.

Figura 9

Métodos no invasivos para el diagnóstico del patrimonio edificado



Nota. Adaptado de Mishra & Lourenço (2024)

2.3.1.2 Clasificación de los métodos no invasivos aplicados al patrimonio

La literatura científica contemporánea clasifica los métodos no invasivos empleados en el diagnóstico patrimonial en tres grandes grupos según su principio físico y su producto principal. El primer grupo comprende las técnicas de documentación geométrica tridimensional, entre las que destacan la fotogrametría con vehículos aéreos no tripulados (UAV) y el escáner láser terrestre (TLS). El segundo grupo abarca las técnicas de inspección espectral y termográfica, incluyendo la termografía infrarroja, la reflectografía y los ensayos con radar de penetración del suelo (GPR). El tercer grupo engloba las técnicas de inspección visual sistemática asistida por tecnología, que combinan la observación directa con herramientas de registro fotográfico georreferenciado. Pepe et al. (2022) concluyen que la fotogrametría UAV-SfM ocupa una posición privilegiada entre estos métodos en razón de su capacidad para generar productos métricos de alta resolución sobre grandes superficies en tiempos de adquisición reducidos y con costos operacionales accesibles, lo que la convierte en la técnica de mayor potencial de transferencia a contextos institucionales con recursos limitados.

2.3.1.3 Protocolos estandarizados para la evaluación no invasiva de edificaciones patrimoniales

La aplicación de métodos no invasivos en el diagnóstico del patrimonio edificado no constituye una práctica discrecional, sino que se enmarca en un conjunto de normas y protocolos internacionales desarrollados por organismos de estandarización de reconocida autoridad técnica. Estos instrumentos normativos establecen los procedimientos, criterios de calidad, terminología y requisitos mínimos que garantizan la validez científica, la reproducibilidad y la comparabilidad de los resultados obtenidos mediante técnicas de evaluación no destructiva (END) aplicadas a edificaciones históricas. A continuación se describen los marcos normativos de mayor relevancia para la presente investigación.

A. Normas ASTM International

ASTM International es el organismo de normalización técnica más influyente en el ámbito de los ensayos no destructivos a nivel mundial. La norma **ASTM E1316** — *Standard Terminology for Nondestructive Examinations* — establece la terminología estándar para todos los métodos de ensayo no destructivo, proporcionando las definiciones precisas de los términos empleados en la inspección de materiales y edificaciones sin causar daño al elemento inspeccionado (ASTM International, 2023). Esta norma es el fundamento conceptual que legitima el uso del término *no invasivo* en el título y las variables de la presente investigación, en tanto define con precisión técnica la distinción entre métodos destructivos, semidestructivos y no destructivos en el contexto de la evaluación de edificaciones.

La norma **ASTM E2583** establece los procedimientos para la medición de humedad en sistemas de cerramiento mediante sondas capacitivas e infrarrojo, aplicable a la detección de patologías de humedad en muros de mampostería histórica. La norma **ASTM E2299**

regula los métodos de inspección visual para la evaluación del estado de revestimientos y superficies exteriores de edificaciones, definiendo los criterios de clasificación de defectos por extensión, profundidad y localización, principios coherentes con los criterios de severidad adoptados en la presente investigación para la clasificación de los 266 polígonos digitalizados.

La norma **ASTM E57** regula los formatos de intercambio de datos tridimensionales para sistemas de escáner láser y fotogrametría, garantizando la interoperabilidad entre plataformas de adquisición y procesamiento de nubes de puntos. Esta norma es relevante para la presente investigación en tanto establece los requisitos de precisión y trazabilidad de los modelos tridimensionales generados mediante UAV-SfM para fines de diagnóstico técnico de edificaciones patrimoniales, validando el uso del modelo fotogramétrico de la Iglesia Santa Teresa como soporte métrico para la cuantificación de patologías (ASTM International, 2019).

B. Normas ACI (American Concrete Institute)

El American Concrete Institute ha publicado guías de práctica ampliamente adoptadas para la evaluación no destructiva de estructuras de concreto y mampostería. El reporte **ACI 228.2R** — *Report on Nondestructive Test Methods for Evaluation of Concrete in Structures* — describe y evalúa comparativamente los métodos no destructivos aplicables a la evaluación de estructuras existentes, incluyendo termografía infrarroja, radar de penetración del suelo (GPR), esclerometría, ultrasonido y fotogrametría digital (American Concrete Institute, 2022). Este reporte reconoce explícitamente la fotogrametría digital como método de evaluación no destructiva aceptado para la documentación de daños superficiales en edificaciones de mampostería, validando su aplicación en el diagnóstico de las patologías de la Iglesia Santa Teresa de Ayacucho.

La guía **ACI 364.1R** — *Guide for Assessment of Concrete Structures before Rehabilitation* — establece los procedimientos para la inspección visual sistemática de edificaciones existentes previa a cualquier intervención de rehabilitación, definiendo los criterios de selección de métodos de evaluación según el tipo de patología, su extensión y su localización estructural. Este marco es directamente coherente con la metodología de inspección visual sistemática georreferenciada (Variable X3) aplicada en la presente investigación, que clasifica las patologías según criterios de extensión en m², profundidad y localización estructural en los 266 polígonos digitalizados (American Concrete Institute, 2019).

La norma **ACI 318** establece los requisitos para edificaciones de concreto reforzado e incluye disposiciones sobre métodos de evaluación no destructiva aceptables para la verificación de la resistencia de elementos existentes, aplicable a los elementos estructurales de ladrillo y mortero de la Iglesia Santa Teresa.

C. Normas ISO

La Organización Internacional de Normalización ha desarrollado normas específicas de gran relevancia para la evaluación no invasiva del patrimonio edificado. La norma **ISO 13822:2010** — *Bases for Design of Structures: Assessment of Existing Structures* — constituye el marco normativo internacional de mayor relevancia para la presente investigación, en tanto establece los principios y procedimientos para la evaluación de estructuras existentes incluyendo, de forma explícita, las **estructuras patrimoniales** mediante las consideraciones adicionales del Anexo I (International Organization for Standardization, 2010). La norma especifica que la evaluación de una estructura existente debe iniciarse ante evidencias de deterioro estructural por acciones dependientes del tiempo — como la erosión, el biodeterioro y la humedad documentados en la presente investigación — y que los métodos de investigación empleados deben garantizar la mínima perturbación de la estructura evaluada, principio coincidente con el enfoque no invasivo adoptado.

La norma **ISO 19157:2023** — *Geographic Information: Data Quality* — establece los principios de calidad para datos geoespaciales, definiendo los indicadores de completitud, consistencia lógica y exactitud posicional que deben cumplir los productos derivados de levantamientos fotogramétricos (International Organization for Standardization, 2023). La resolución GSD de **2.46 mm/píx** del ortomosaico generado supera ampliamente los requisitos mínimos de exactitud posicional de esta norma para la cartografía de patologías superficiales a escala de detalle, validando la calidad métrica del modelo fotogramétrico.

La norma **ISO 19107** regula el esquema espacial para información geográfica, estableciendo los requisitos de representación geométrica de objetos espaciales que fundamentan la digitalización de los 266 polígonos georreferenciados sobre el modelo fotogramétrico en el sistema WGS 84 / UTM zona 18S + EGM2008.

D. Norma UNI 11182:2006

En el ámbito europeo, la norma italiana **UNI 11182:2006** — *Beni culturali: Materiali lapidei naturali ed artificiali: Descrizione della forma di alterazione* — ha alcanzado reconocimiento internacional como referente técnico para la descripción y clasificación de las alteraciones macroscópicas de la piedra natural y los materiales de construcción históricos (Ente Nazionale Italiano di Unificazione, 2006). Esta norma establece la terminología estándar para designar las formas de deterioro en bienes patrimoniales construidos con materiales lapídeos, incluyendo los términos técnicos que corresponden a las seis tipologías de patología identificadas en la presente investigación: disgregación y descamación (erosión), distacco (desprendimiento), colonizzazione biologica (biodeterioro), umidità di risalita (humedad), fratturazione (fisuras) y manomissione antropica (daño antrópico). La adopción de esta nomenclatura garantiza la comparabilidad internacional de los resultados del diagnóstico con los estándares de la literatura científica sobre conservación del patrimonio edificado.

E. Coherencia metodológica con los estándares internacionales

La metodología de la presente investigación satisface los requisitos de los cinco marcos normativos descritos, según se sintetiza en el Cuadro 2:

Cuadro 2

Coherencia de la metodología adoptada con los estándares internacionales de evaluación no invasiva – Iglesia Santa Teresa, Ayacucho 2025

Norma	Requisito clave	Cumplimiento en la investigación
ASTM E1316	Terminología END estandarizada	Nomenclatura DE_, ER_, BI_, HU_, DA_, FI_ coherente con la definición de método no destructivo
ASTM E57	Trazabilidad del modelo 3D	Nube de puntos 274 990 458 pts en sistema WGS 84 / UTM 18S, formato compatible
ACI 228.2R	Fotogrametría como método NDT aceptado	Levantamiento UAV-SfM reconocido como método no destructivo válido para mampostería
ACI 364.1R	Inspección visual sistemática previa a rehabilitación	Variable X3: clasificación por extensión m ² , profundidad y localización estructural
ISO 13822	Evaluación no invasiva de estructuras patrimoniales	Metodología no invasiva aplicada a bien patrimonial con mínima perturbación
ISO 19157	Exactitud posicional GSD	GSD 2.46 mm/píx supera los requisitos mínimos de calidad geoespacial
UNI 11182:2006	Nomenclatura internacional de patologías	Términos adoptados coherentes con la clasificación macroscópica italiana

Nota. Elaboración propia, con base en los marcos normativos citados.

2.3.2. Fotogrametría con vehículos aéreos no tripulados

2.3.2.1 Definición y características del sistema UAV

Un vehículo aéreo no tripulado (UAV, por sus siglas en inglés *Unmanned Aerial Vehicle*) se define como una aeronave sin piloto a bordo, controlada de manera remota o de forma autónoma mediante sistemas de navegación preprogramados, capaz de operar en modos estabilizados de vuelo estacionario o de trayectoria prefijada. En el contexto de la fotogrametría aplicada al patrimonio edificado, los UAV de ala rotatoria o multicopteros constituyen la plataforma de mayor versatilidad operacional, dado que permiten vuelos a baja altitud con velocidad reducida y ángulo de inclinación variable, lo que facilita la captura de imágenes oblicuas de las fachadas verticales de los monumentos históricos. Yaşar Yiğit y Uysal (2024) señalan que la capacidad de los UAV multicopteros para mantener posiciones estacionarias estables y ajustar dinámicamente su trayectoria durante el vuelo los convierte en la plataforma óptima para la documentación fotogramétrica de edificios patrimoniales con geometrías complejas, coronamientos ornamentados y elementos de

difícil acceso mediante métodos convencionales.

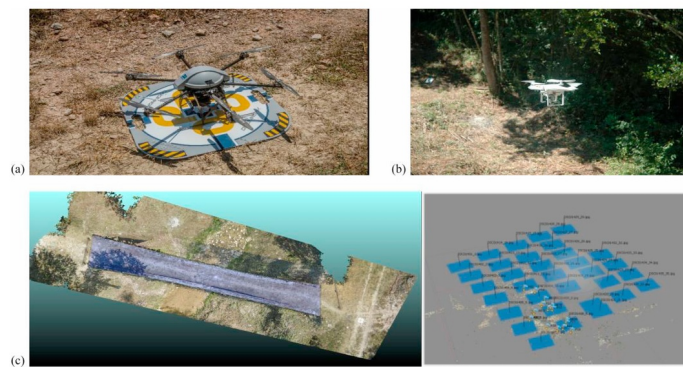
2.3.2.2 Parámetros fundamentales del vuelo fotogramétrico

El diseño del plan de vuelo fotogramétrico constituye una fase crítica que determina directamente la resolución espacial y la completitud geométrica del modelo resultante. Los parámetros fundamentales del vuelo son la distancia de vuelo al objeto, el solapamiento longitudinal y transversal entre imágenes consecutivas, y la distancia de muestreo en tierra o GSD (*Ground Sampling Distance*).

El **GSD** expresa la distancia física en el terreno u objeto que corresponde a un píxel en la imagen capturada, constituyendo el indicador más directo de la resolución espacial del vuelo. Su valor depende del tamaño del sensor de la cámara, la longitud focal del objetivo, el número de píxeles del sensor y la distancia cámara-superficie durante la captura. Matemáticamente se calcula como $GSD = (H \times p_w) / (f \times i_w)$, donde H es la distancia de vuelo al objeto (m), p_w es el tamaño del píxel del sensor (mm), f es la longitud focal (mm) e i_w es el ancho de la imagen en píxeles (Pepe et al., 2022). En la presente investigación, el vuelo fotogramétrico de la Iglesia Santa Teresa se ejecutó con el UAV Autel Robotics XT705, obteniendo un GSD de 2,46 mm/píx a una distancia media de 7,68 m de la superficie de la fachada, lo que garantiza la resolución suficiente para la identificación y delimitación de patologías de dimensiones centimétricas.

Figura 10

Vuelo fotogramétrico del UAV SkyRobotic



Nota. Adaptado de Cavalagli et al. (2020)

El **solapamiento longitudinal** (*endlap*) y el **solapamiento transversal** (*sidelap*) definen el porcentaje de área común entre imágenes adyacentes en la dirección del vuelo y en la dirección perpendicular, respectivamente. Valores superiores al 80 % de solapamiento longitudinal y al 60 % de solapamiento transversal se consideran el estándar mínimo para fotogrametría de fachadas y superficies verticales, dado que la complejidad geométrica de los elementos arquitectónicos genera zonas de oclusión que requieren mayor redundancia de imágenes para una reconstrucción completa (Tysiąg et al., 2023).

2.3.2.3 Plan de vuelo para edificaciones patrimoniales

El plan de vuelo para la documentación fotogramétrica de edificaciones patrimoniales presenta requerimientos específicos que lo diferencian de los planes de vuelo estándar para cartografía topográfica. La orientación predominantemente vertical de las superficies de interés —fachadas, torres, portadas— demanda la incorporación de pasadas oblicuas con el eje óptico de la cámara inclinado entre 45° y 90° respecto a la horizontal, además de las pasadas cenitales convencionales. De Fino et al. (2023) precisan que la combinación de pasadas cenitales y oblicuas, denominada en la literatura anglosajona *double-grid* o configuración cruzada, resulta imprescindible para la correcta reconstrucción tridimensional de las superficies verticales con ornamentación en relieve, tales como las portadas barrocas de las iglesias coloniales ayacuchanas. El plan de vuelo debe contemplar también la limitación de altitud operacional establecida por la Dirección General de Aeronáutica Civil (DGAC) del Ministerio de Transportes y Comunicaciones del Perú, que regula las condiciones de operación de los sistemas UAV en el espacio aéreo nacional.

2.3.3. Fotogrametría computacional SfM-MVS

2.3.3.1 Fundamentos del algoritmo Structure from Motion

La fotogrametría computacional basada en el algoritmo *Structure from Motion* (SfM) constituye la técnica de reconstrucción tridimensional a partir de imágenes que ha transformado de manera radical la práctica de la documentación geométrica del patrimonio durante la última década. El principio fundamental del algoritmo SfM consiste en la reconstrucción simultánea y automática de la geometría de la escena y de la posición y orientación de la cámara en cada imagen, a partir de la identificación de puntos homólogos —denominados *keypoints*— en el conjunto de imágenes de entrada, sin necesidad de conocer a priori la posición de la cámara ni las coordenadas de puntos de control en el objeto. Westoby et al. (2012) presentaron la primera sistematización del flujo de trabajo SfM aplicado a la documentación de objetos geomorfológicos, estableciendo el marco conceptual que posteriormente fue adaptado y extendido al ámbito patrimonial. El proceso de detección de puntos homólogos emplea el descriptor SIFT (*Scale-Invariant Feature Transform*), que identifica características invariantes a los cambios de escala, rotación e iluminación entre imágenes adquiridas desde posiciones y ángulos diferentes.

La etapa de ajuste en bloque (*bundle adjustment*) aplica un proceso de mínimos cuadrados iterativo para optimizar simultáneamente las posiciones de las cámaras y las coordenadas tridimensionales de los puntos homólogos, generando como resultado una nube de puntos dispersa (*sparse point cloud*) georreferenciada en el sistema de coordenadas de referencia del proyecto (Westoby et al., 2012). Esta nube dispersa constituye la base sobre la que se ejecuta la etapa de reconstrucción densa mediante el algoritmo *Multi-View Stereo* (MVS).

2.3.3.2 Reconstrucción densa mediante Multi-View Stereo

El algoritmo *Multi-View Stereo* (MVS) realiza la densificación de la nube de puntos mediante la correlación de píxeles en imágenes múltiples, generando una nube de

puntos densa con densidades del orden de cientos de puntos por centímetro cuadrado en aplicaciones de documentación patrimonial de close-range. El proceso opera sobre los mapas de profundidad (*depth maps*) generados individualmente para cada imagen, que son posteriormente combinados para obtener la nube de puntos densa final. Martínez-Carricondo et al. (2021) demuestran que la integración del flujo de trabajo UAV-SfM-MVS con modelos de información del edificio (HBIM) permite obtener precisiones métricas del orden de $\pm 0,05$ m en la documentación de edificaciones patrimoniales, precisión suficiente para los fines del diagnóstico técnico de patologías en las condiciones de la presente investigación.

2.3.3.3 Productos generados: Nube de puntos, modelo 3D, DEM y ortomosaico

El flujo de procesamiento SfM-MVS implementado en la presente investigación mediante Agisoft Metashape Professional v2.3.1 genera cuatro productos primarios de carácter métrico. La nube de puntos densa constituye la representación tridimensional más detallada del objeto, con cada punto codificado en coordenadas UTM 18S + EGM2008 y valor de color RGB. En el caso de la Iglesia Santa Teresa, la nube de puntos densa comprende 274 990 458 puntos. El modelo tridimensional poligonal es la malla de triángulos generada por triangulación de la nube de puntos densa; para la presente investigación, el modelo comprende 27 801 942 caras texturizadas con las imágenes originales del vuelo. El modelo de elevación digital (DEM) constituye la representación ráster de la superficie tridimensional proyectada en el plano horizontal, con una resolución de 6,46 mm/píx. Finalmente, el ortomosaico es la imagen proyectada ortogonalmente sobre el plano de referencia, libre de las distorsiones perspectivas de las imágenes originales, con una resolución de 3,23 mm/píx en la presente investigación (Agisoft LLC, 2023).

Figura 11

Construcción de la maqueta fotogramétrica de la iglesia de San Juan Bautista-templo Inca de Huaytará



Nota. Adaptado de Cuadros-Rojas et al. (2024)

2.3.3.4 Agisoft Metashape Professional como plataforma de procesamiento

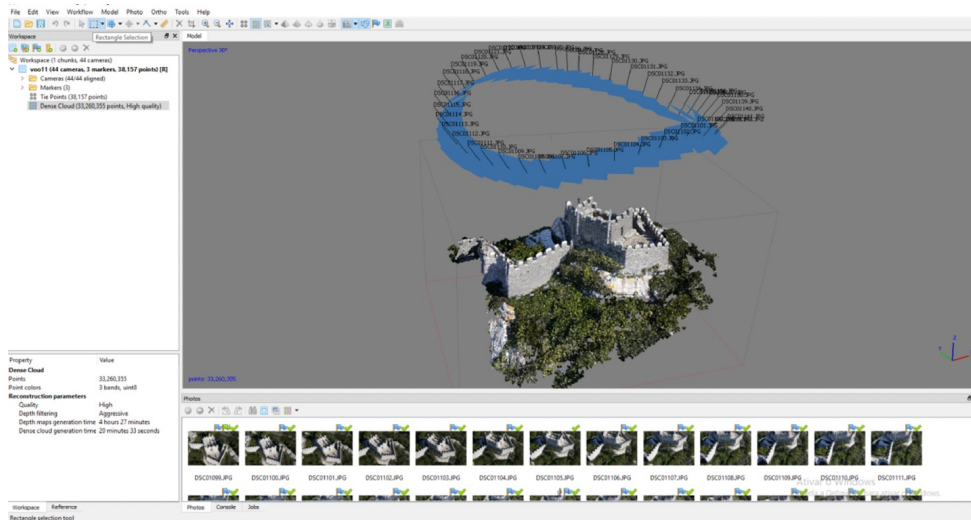
Agisoft Metashape Professional es el software de fotogrametría computacional empleado en la presente investigación para la totalidad del flujo de procesamiento SfM-MVS, desde la alineación de imágenes hasta la generación del modelo de teselas tridimensional sobre el que se realiza la digitalización de patologías.

El software integra en una sola plataforma las etapas de alineación de cámaras, generación de nube de puntos densa, construcción del modelo de malla, texturizado, generación de DEM, generación de ortomosaico y exportación de productos en los sistemas de referencia de coordenadas requeridos. De Fino et al. (2023) identifican a Agisoft Metashape como el software de referencia más frecuentemente empleado en los estudios científicos de documentación fotogramétrica del patrimonio edificado publicados en el período 2015-2022, con una proporción de adopción superior al 60 % del total de publicaciones revisadas.

La interfaz de programación Python de Metashape Professional permite la automatización de rutinas de procesamiento y la extracción de datos geométricos de los polígonos digitalizados, funcionalidad empleada en la presente investigación para el cálculo automatizado de las áreas afectadas por cada tipología de patología.

Figura 12

Entorno de Agisoft Metashape. Fotogrametría aérea: Nube de puntos-Caso práctico del Castillo de los Moros en Sintra



Nota. Adaptado de Gomes & Tomé (2023)

2.3.4. Precisión y validación métrica del modelo fotogramétrico

2.3.4.1 Puntos de control en tierra: GCP y puntos de verificación

La validación métrica del modelo fotogramétrico UAV-SfM requiere la incorporación de puntos de control en tierra (*Ground Control Points*, GCP) con coordenadas conocidas en el sistema de referencia de coordenadas del proyecto, que son utilizados durante el ajuste en bloque para vincular el modelo a dicho sistema de referencia. Los puntos de verificación independientes (*Check Points*, CP o ICP) no participan en el ajuste y son empleados exclusivamente para la evaluación a posteriori de la precisión del modelo resultante. Agüera-Vega et al. (2017) determinaron mediante 160 proyectos fotogramétricos sistemáticos que la precisión planimétrica óptima —definida como el mínimo RMSE planimétrico— se alcanza con 15 GCP distribuidos homogéneamente en el área de estudio, obteniendo valores de $RMSE_{x,y} = 4,6$ cm y $RMSE_z = 5,8$ cm. Estos valores de referencia son coherentes con los rangos de precisión de 1 a 3 cm documentados en la literatura para vuelos UAV a baja altitud con GSD inferior a 5 mm/píx, rangos con los que el presente estudio establece su comparación en la sección de discusión de resultados.

2.3.4.2 Error cuadrático medio: RMSE

El error cuadrático medio (*Root Mean Square Error*, RMSE) constituye el indicador estadístico estándar para la cuantificación de la precisión métrica de los modelos fotogramétricos. Se calcula como la raíz cuadrada de la media de los cuadrados de las diferencias entre las coordenadas conocidas de los puntos de verificación y las coordenadas obtenidas del modelo, para cada componente espacial (X, Y, Z) de manera independiente y para la componente combinada tridimensional. La expresión general es $RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (v_i - \hat{v}_i)^2}$, donde v_i son los valores medidos en campo y \hat{v}_i los valores obtenidos del modelo fotogramétrico (Agüera-Vega et al., 2017). En la presente

investigación, el RMSE del modelo de la Iglesia Santa Teresa se determina a partir de las diferencias entre las coordenadas en el sistema WGS 84 / UTM zona 18S + EGM2008 de los puntos de verificación y las coordenadas correspondientes en el modelo procesado con Agisoft Metashape Professional, constituyendo el indicador principal de la precisión métrica del método aplicado.

2.3.4.3 Sistema de referencia de coordenadas: WGS 84 / UTM 18S + EGM2008

El sistema de referencia de coordenadas adoptado en la presente investigación es WGS 84 / UTM zona 18S (EPSG::32718) para las coordenadas planimétricas, combinado con el modelo geoidal EGM2008 (EPSG::3855) para la componente altimétrica, configurando el sistema de referencia compuesto EPSG::32718+3855. El sistema de proyección UTM (*Universal Transverse Mercator*) divide la superficie terrestre en 60 husos longitudinales de 6° de amplitud; la ciudad de Ayacucho se ubica en el huso 18S del hemisferio sur, cuyo meridiano central se sitúa a 75° de longitud oeste. La adopción de este sistema de coordenadas métricas garantiza que las mediciones de distancia y área calculadas sobre el modelo fotogramétrico presenten distorsiones inferiores al 0,1 % en la zona de trabajo, validando la exactitud de los cálculos de área afectada por patología expresados en metros cuadrados (Zeballos-Velarde et al., 2020). El modelo geoidal EGM2008 (*Earth Gravitational Model 2008*) proporciona la referencia altimétrica vinculada al nivel medio del mar, compatible con los levantamientos topográficos y planimétricos oficiales del Instituto Geográfico Nacional del Perú.

2.3.5. Inspección visual sistemática georreferenciada

2.3.5.1 Definición y fundamentos de la inspección visual sistemática

La inspección visual sistemática georreferenciada constituye un método de diagnóstico que combina la observación directa de las superficies del bien patrimonial con el registro fotográfico de estaciones predefinidas, georreferenciadas mediante dispositivos de posicionamiento global, con el propósito de documentar de manera metódica y reproducible las patologías identificadas en toda la envolvente del edificio. A diferencia de la inspección visual no estructurada, la inspección sistemática establece una planificación previa de las estaciones fotográficas que garantiza la cobertura total de las superficies de interés, la reproducibilidad del recorrido de inspección en campañas sucesivas y la trazabilidad espacial de cada observación (De Fino et al., 2023).

Zeballos-Velarde et al. (2020) destacan que la georreferenciación de las estaciones fotográficas mediante aplicaciones de campo con posicionamiento GPS integrado —como GPS Map Camera y herramientas equivalentes— permite vincular cada imagen de detalle a una posición específica sobre la planta del edificio, facilitando la posterior localización de las patologías identificadas sobre el modelo fotogramétrico tridimensional. Este proceso de correlación entre las observaciones de campo y el modelo métrico constituye el fundamento metodológico de la inspección visual sistemática implementada en la presente investigación como dimensión complementaria a la fotogrametría UAV.

2.3.5.2 Estaciones fotográficas y cobertura del recorrido

Las estaciones fotográficas son los puntos del recorrido de inspección desde los que se realizan las capturas fotográficas de detalle de las superficies del bien. Su número, distribución espacial y densidad se determinan en función de la extensión y complejidad de la envolvente del edificio, de la accesibilidad de las distintas zonas de fachada y del nivel de detalle de la documentación requerida. La cobertura del recorrido de inspección se mide como la longitud total del trayecto recorrido en metros lineales, debiendo garantizar que todas las zonas definidas en la sección de operacionalización sean inspeccionadas desde distancias y ángulos suficientes para la identificación de las patologías de interés.

La precisión del posicionamiento GPS de las estaciones fotográficas, expresada como el error planimétrico en metros ($\pm m$), determina la exactitud con la que cada observación puede ser localizada sobre el modelo fotogramétrico. Yaşar Yiğit y Uysal (2024) señalan que la integración de la inspección visual georreferenciada con el modelo de gemelo digital obtenido por fotogrametría UAV constituye una práctica emergente en la gestión del patrimonio edificado, que permite aprovechar las ventajas de la percepción visual directa del inspector —capacidad de identificar patologías por su textura, color y contexto constructivo— con la precisión métrica y la trazabilidad espacial del modelo fotogramétrico.

2.3.5.3 Complementariedad de la inspección visual y la fotogrametría UAV

La inspección visual sistemática georreferenciada desempeña un papel complementario esencial respecto a la fotogrametría UAV en el proceso de diagnóstico técnico del patrimonio edificado. Mientras la fotogrametría UAV proporciona una cobertura espacial completa de la fachada con alta resolución métrica y permite la cuantificación automatizada de las superficies afectadas, la inspección visual aporta la capacidad de caracterización cualitativa de las patologías —tipología, mecanismo, estado de actividad— que no puede ser obtenida exclusivamente a partir del análisis del modelo fotogramétrico. Zeballos-Velarde et al. (2020) evidencian en su estudio del patrimonio colonial peruano que la combinación de ambas aproximaciones permite superar las limitaciones individuales de cada método, dado que la fotogrametría puede no detectar patologías de carácter eminentemente superficial con escasa expresión tridimensional —como ciertos tipos de biodeterioro o de carbonatación—, mientras que la inspección visual no puede proveer las mediciones de área y las coordenadas métricas necesarias para la cuantificación objetiva del daño.

3. MARCO METODOLÓGICO

3.1. Método

La presente investigación adopta un método **deductivo**, dado que su estructura metodológica parte de principios teóricos generales consolidados sobre fotogrametría con vehículos aéreos no tripulados (UAV), reconstrucción tridimensional por *Structure from Motion* (SfM) y patología de edificaciones patrimoniales, para derivar aplicaciones específicas en el contexto particular de la Iglesia Santa Teresa de Ayacucho. El marco teórico preestablecido comprende los principios científicos validados sobre procesamiento fotogramétrico, criterios internacionales de clasificación de patologías superficiales y métodos de cuantificación geoespacial de daños en edificaciones de valor patrimonial, constituyendo las premisas generales desde las cuales se formulan los procedimientos de identificación, mapeo y cuantificación de las patologías presentes en la envolvente de la edificación. La investigación procede **deductivamente** al tomar estos fundamentos teóricos y aplicarlos sistemáticamente al problema específico de diagnóstico del estado de conservación superficial de la Iglesia Santa Teresa, patrimonio cultural de la ciudad de Ayacucho.

3.2. Orientación

La investigación se clasifica como de orientación **aplicada**, porque desarrolla una solución metodológica concreta para resolver el problema específico del diagnóstico no destructivo del estado de conservación de una edificación patrimonial. El estudio trasciende el ámbito exclusivamente teórico al generar un modelo fotogramétrico tridimensional de alta resolución (GSD = 2.46 mm/píx) y un mapeo cuantificado de las patologías superficiales biodeterioro, desprendimiento, erosión, daño antrópico y fisuras sobre la totalidad de la envolvente de la Iglesia Santa Teresa de Ayacucho, proporcionando herramientas técnicas directamente aplicables en la planificación de intervenciones de conservación y restauración del patrimonio edificado. La orientación **aplicada** se confirma por el impacto práctico de sus resultados: La identificación, localización georreferenciada y cuantificación métrica de 266 polígonos de patologías sobre 158.52 m² de área afectada, cuyos resultados constituyen insumos directos para la toma de decisiones por parte de los organismos competentes en la gestión del patrimonio cultural Ministerio de Cultura, Dirección Desconcentrada de Cultura de Ayacucho y entidades de conservación del Centro Histórico.

3.3. Enfoque

La investigación adopta un enfoque **cuantitativo**, porque se fundamenta en la recolección y análisis de datos numéricos medibles para caracterizar objetivamente el estado de conservación superficial de la Iglesia Santa Teresa de Ayacucho. El estudio utiliza variables cuantificables área afectada por cada tipología de patología expresada en metros cuadrados (m²), porcentaje de afectación respecto al área total de la envolvente, número de

polígonos digitalizados y nivel de severidad determinado mediante criterios de extensión cuantitativa que son procesadas mediante herramientas de fotogrametría digital y sistemas de información geoespacial. La cuantificación se realiza a través del modelo fotogramétrico tridimensional generado en *Agisoft Metashape Professional v2.3.1* a partir de 1,189 imágenes capturadas con el UAV *Autel Robotics XT705*, permitiendo establecer con rigor métrico la distribución espacial, extensión y severidad de cada patología identificada.

3.4. Instrumento de recolección de datos

La presente investigación adopta un enfoque **prolectivo** debido a que , los datos se recopilan directamente mediante sistemas de monitoreo, implementados específicamente para el estudio, sin depender de datos preexistentes o fuentes secundarias. Este enfoque **prolectivo** se manifiesta en el diseño e implementación de un sistema propio de captura de datos en tiempo real que registra información específica sobre el funcionamiento del modelo CNN, incluyendo métricas de detección vehicular, clasificación de objetos, tiempos de respuesta y variables de seguridad vial generadas directamente por los instrumentos instalados en las avenidas Arenales y Cusco. La naturaleza **prolectivo** del instrumento garantiza que los datos recolectados sean específicos para los objetivos de la investigación, permitiendo un control directo sobre la calidad, precisión y relevancia de la información obtenida, y asegurando que las mediciones respondan exactamente a las variables operacionalizadas en el estudio para validar las hipótesis planteadas sobre la efectividad del modelo inteligente adaptativo.

3.5. Tipo o alcance de la investigación

La presente investigación adopta un alcance **explicativo**, dado que su propósito no se limita a identificar y cuantificar las patologías superficiales presentes en la envolvente de la Iglesia Santa Teresa de Ayacucho, sino que busca explicar las condiciones técnicas, metodológicas y métricas que determinan la viabilidad y precisión de la fotogrametría UAV-SfM como herramienta de diagnóstico del patrimonio cultural edificado. El estudio trasciende la mera descripción del estado de conservación de la edificación, estableciendo relaciones entre las variables del proceso fotogramétrico — resolución GSD, tasa de alineación, densidad de la nube de puntos y error métrico (RMSE) — y la capacidad del método para detectar, clasificar y georreferenciar patologías superficiales con precisión verificable.

El alcance **explicativo** se fundamenta en que la investigación responde no solo a interrogantes del tipo ¿qué patologías existen?, ¿dónde se localizan? y ¿cuánta área afectan?, sino también a interrogantes del tipo ¿bajo qué condiciones técnicas la fotogrametría UAV-SfM permite obtener un modelo con precisión métrica suficiente para el diagnóstico patrimonial?, ¿qué factores determinan la discrepancia entre las medidas del modelo y las medidas de campo?, y ¿por qué la integración UAV-SfM-BIM constituye una metodología más robusta que la inspección visual convencional para la cuantificación de patologías en edificaciones de valor patrimonial? La respuesta

fundamentada a estas interrogantes, sustentada en indicadores estadísticos (RMSE, MAE, r , d , análisis de Bland–Altman) y en la comparación con la literatura especializada, confiere a la investigación un carácter explicativo que va más allá del diagnóstico descriptivo convencional. Este nivel de alcance es el apropiado para validar científicamente una metodología de documentación técnica en el contexto del patrimonio cultural edificado ayacuchano, aportando evidencia cuantificada sobre su precisión, limitaciones y potencial de replicabilidad en otros bienes del Centro Histórico de Ayacucho, lo que resulta de utilidad directa para los organismos competentes en materia de conservación: el Ministerio de Cultura y la Dirección Desconcentrada de Cultura de Ayacucho.

3.6. Nivel de investigación

La presente investigación adopta un nivel **aplicativo**, dado que está dirigida fundamentalmente hacia la solución práctica del problema específico del diagnóstico no destructivo del estado de conservación superficial de la Iglesia Santa Teresa de Ayacucho, mediante la aplicación directa de conocimientos teóricos consolidados en fotogrametría con vehículos aéreos no tripulados (UAV), reconstrucción tridimensional por *Structure from Motion* (SfM) y patología de edificaciones, transformándolos en resultados técnicos concretos que abordan directamente las necesidades de documentación y diagnóstico del patrimonio edificado ayacuchano.

La investigación trasciende el ámbito puramente teórico al generar productos fotogramétricos de alta resolución — nube de puntos densa de 274,990,458 puntos, modelo de teselas con GSD de 2.46 mm/píx, MDE y ortomosaico georreferenciados — y un mapeo cuantificado de 266 polígonos de patologías sobre 158.52 m² de área afectada, distribuidos en cuatro tipologías de deterioro con sus respectivos niveles de severidad. Estos resultados constituyen herramientas técnicas directamente aplicables en la planificación de intervenciones de conservación, que pueden ser implementadas, validadas y replicadas en otras edificaciones patrimoniales del Centro Histórico de Ayacucho y del patrimonio edificado del Perú.

El nivel **aplicativo** se distingue del nivel básico o fundamental en que su criterio de validación no es únicamente la contribución al conocimiento científico general, sino la utilidad práctica de sus resultados para resolver un problema técnico concreto: determinar con rigor métrico qué patologías afectan a la Iglesia Santa Teresa, en qué magnitud y con qué grado de severidad, proporcionando así el diagnóstico cuantitativo reproducible que requiere toda intervención de restauración patrimonial técnicamente fundamentada.

3.7. Diseño de investigación

3.7.1. Propósito de la investigación

La investigación se fundamenta en un propósito **no experimental-observacional**, porque el diseño metodológico no involucra la manipulación controlada de variables independientes ni la inducción artificial de condiciones de deterioro sobre la edificación, sino que se centra

en la observación, registro fotogramétrico y cuantificación de las patologías superficiales presentes en la Iglesia Santa Teresa de Ayacucho en su estado natural de conservación. Este enfoque **no experimental** se caracteriza por el registro de las variables de estudio — tipología, distribución espacial, extensión y severidad de las patologías — tal como se manifiestan espontáneamente en la envolvente de la edificación, sin intervenciones que modifiquen, induzcan o alteren artificialmente el estado de deterioro existente.

El carácter **observacional** del diseño se confirma por el rol del investigador como documentador externo que registra y cuantifica las condiciones existentes mediante técnicas de fotogrametría UAV y *Structure from Motion* (SfM), sin ejercer ningún tipo de intervención sobre el objeto de estudio. Este diseño es el más apropiado para el diagnóstico no destructivo del patrimonio edificado, donde cualquier alteración del estado original de la edificación comprometería tanto la integridad del bien cultural como la validez del diagnóstico obtenido.

3.7.2. Número de mediciones

La investigación adopta un diseño **transversal**, porque la recolección de datos se realizó en un período temporal único y delimitado — el 28 de abril de 2025 —, capturando mediante 1,189 imágenes fotogramétricas el estado de conservación superficial completo de la Iglesia Santa Teresa de Ayacucho en ese momento específico. Este enfoque **transversal** se caracteriza por utilizar el mismo conjunto de datos — el modelo fotogramétrico tridimensional generado a partir del levantamiento UAV — para múltiples propósitos: identificación de patologías, cuantificación de áreas afectadas, clasificación de severidad y generación de mapas temáticos de distribución, sin requerir mediciones repetidas ni seguimiento longitudinal de la evolución del deterioro.

La naturaleza **transversal** del estudio permite obtener un diagnóstico representativo del estado de conservación de la edificación en el instante del levantamiento fotogramétrico, proporcionando datos suficientes para identificar, localizar y cuantificar las 266 patologías mapeadas sobre los 158.52 m² de área afectada. Este diseño es apropiado para el objetivo de la investigación, que es generar un diagnóstico técnico del estado actual de conservación como punto de partida para la planificación de intervenciones de restauración, sin pretender documentar la dinámica temporal del deterioro.

3.7.3. Cronología de las observaciones

La investigación adopta un enfoque **retrospectivo**, porque los datos que constituyen la base empírica del estudio — las 1,189 imágenes capturadas con el UAV *Autel Robotics XT705* el 28 de abril de 2025 — fueron recolectados con anterioridad al análisis, procesamiento fotogramétrico y mapeo de patologías realizados entre los meses de junio de 2025 y marzo de 2026. El investigador analiza datos ya existentes, generados durante el levantamiento fotogramétrico realizado en una fecha previa, para derivar de ellos el diagnóstico del estado de conservación de la edificación patrimonial.

El carácter **retrospectivo** se manifiesta en la secuencia temporal del estudio: primero

se ejecutó el levantamiento UAV y la captura de imágenes (abril 2025), posteriormente se realizó el procesamiento fotogramétrico en *Agisoft Metashape Professional v2.3.1* para generar el modelo tridimensional (junio 2025 – marzo 2026), y finalmente se llevó a cabo la digitalización y cuantificación de las patologías sobre el modelo generado (marzo 2026). Esta cronología **retrospectiva** es característica de los estudios de diagnóstico patrimonial basados en fotogrametría, donde el levantamiento de campo precede necesariamente al análisis e interpretación de los datos obtenidos.

3.8. Población y muestra

3.8.1. Población

La población de estudio está constituida por las **33 iglesias coloniales** ubicadas en el Centro Histórico de la ciudad de Ayacucho, declarado Patrimonio Cultural de la Nación. Estas edificaciones comparten características arquitectónicas comunes propias del estilo barroco mestizo ayacuchano — construcción en piedra de sillar y adobe, portadas ornamentadas, torres campanario y cubiertas de teja artesanal — y se encuentran expuestas a condiciones similares de deterioro por factores ambientales, biológicos y antrópicos característicos del entorno urbano histórico de la ciudad. La población abarca la totalidad de las iglesias coloniales del Centro Histórico de Ayacucho susceptibles de presentar patologías superficiales cuantificables mediante técnicas de fotogrametría UAV y *Structure from Motion* (SfM).

3.8.2. Muestra

La muestra de estudio corresponde a la **Iglesia Santa Teresa de Ayacucho**, seleccionada mediante un criterio de muestreo **no probabilístico intencional**, en función de los siguientes criterios técnicos y patrimoniales:

- **Valor patrimonial:** La Iglesia Santa Teresa constituye uno de los exponentes más representativos de la arquitectura barroca mestiza ayacuchana del siglo XVII, con alto valor histórico, artístico y cultural reconocido por el Ministerio de Cultura del Perú.
- **Estado de conservación:** La edificación presenta una diversidad representativa de patologías superficiales — biodeterioro, desprendimiento, erosión y daño antrópico — que la convierte en un caso de estudio idóneo para la aplicación y validación de la metodología fotogramétrica UAV propuesta.
- **Accesibilidad:** La ubicación de la iglesia en el jirón 28 de Julio del Centro Histórico de Ayacucho permite el acceso para el levantamiento fotogramétrico UAV en su totalidad de fachadas, torres y cubierta, sin restricciones físicas que impidan la captura de la envolvente completa.
- **Geometría compleja:** La presencia de dos torres campanario, portada principal ornamentada, fachadas laterales de gran longitud y cubierta de teja, implica una envolvente tridimensional de alta complejidad geométrica que permite evaluar la capacidad de la metodología UAV-SfM para el mapeo de edificaciones patrimoniales de geometría irregular.

La selección de una única edificación como muestra responde a la naturaleza del estudio: el objetivo no es realizar comparaciones estadísticas entre edificaciones, sino desarrollar y validar una metodología de diagnóstico fotogramétrico de alta resolución aplicable a cada iglesia de manera individual, cuya primera implementación se realiza sobre la Iglesia Santa Teresa como caso piloto representativo del patrimonio edificado ayacuchano.

Cuadro 3: Resumen de la metodología de investigación

Aspecto metodológico	Descripción
Método	Deductivo
Orientación	Aplicada
Enfoque	Cuantitativo
Tipo/Alcance de investigación	Explicativo
Nivel de investigación	Aplicativo
Propósito de la investigación	No experimental-observacional
Número de mediciones	Transversal
Cronología de las observaciones	Retrospectivo
Estudio del diseño de investigación	Estudio de caso único
Población	33 iglesias coloniales del Centro Histórico de Ayacucho
Muestra	Iglesia Santa Teresa de Ayacucho
Tipo de muestreo	No probabilístico intencional
Instrumento de recolección	UAV <i>Autel Robotics XT705</i>
Software de procesamiento	<i>Agisoft Metashape Professional v2.3.1</i>

Fuente: Elaboración propia

3.9. Hipótesis

3.9.1. Hipótesis general

La evaluación fotogramétrica con drones es un método efectivo y preciso para identificar y analizar los daños estructurales en la Iglesia Santa Teresa de la ciudad de Ayacucho, superando la efectividad de los métodos tradicionales de inspección.

3.9.2. Hipótesis específicas

1. La evaluación fotogramétrica con drones permitirá identificar y medir con precisión las dimensiones de los diversos daños que afectan a la estructura de la Iglesia Santa Teresa en la ciudad de Ayacucho.
2. La fotogrametría con UAV (drones) proporciona un nivel de precisión superior a los

métodos convencionales de inspección visual en la evaluación de daños estructurales en la Iglesia Santa Teresa.

3.10. Operacionalización de variables

3.10.1. Variables

- **Variable independiente (X): Métodos no invasivos.** Conjunto de técnicas y procedimientos de registro, captura y procesamiento de información que permiten documentar, caracterizar y analizar el estado de un bien patrimonial sin establecer contacto físico ni causar alteración alguna sobre su superficie o estructura. Estas técnicas integran la teledetección mediante vehículos aéreos no tripulados (UAV), la reconstrucción tridimensional computacional y la documentación fotográfica sistemática georreferenciada, garantizando la integridad del bien durante todo el proceso de evaluación (Zeballos-Velarde et al., 2020).
- **Variable dependiente (Y): Detección y análisis de daños.** Proceso sistemático de identificación, clasificación, cuantificación y localización de las patologías y deterioros presentes en la envolvente de un bien patrimonial, mediante la interpretación de productos fotogramétricos de alta resolución. Comprende la tipificación de los daños conforme a criterios técnicos de conservación patrimonial, la medición de las superficies afectadas y la determinación de su distribución espacial sobre la edificación, con el fin de establecer un diagnóstico técnico objetivo que oriente las decisiones de intervención (Yaşar Yiğit & Uysal, 2024).

3.10.2. Dimensiones

Las dimensiones representan los componentes o aspectos específicos que conforman una variable compleja, permitiendo su análisis de manera más precisa y detallada (Hernández Sampieri et al., 2014).

3.10.2.1 Variable independiente (X): Métodos no invasivos

- **Dimensión X1: Fotogrametría UAV.** Técnica de obtención de información geométrica y radiométrica de la fachada patrimonial mediante la captura sistemática de imágenes aéreas con vehículo no tripulado (UAV), sin contacto físico con el bien. La calidad del registro queda determinada por parámetros de vuelo como la resolución espacial del suelo (GSD), el porcentaje de solapamiento entre imágenes y la cobertura total de la edificación (Yaşar Yiğit & Uysal, 2024).
- **Dimensión X2: Fotogrametría computacional SfM-MVS.** Procedimiento de reconstrucción digital tridimensional de la edificación patrimonial a partir de las imágenes capturadas, mediante los algoritmos Structure from Motion (SfM) y Multi-View Stereo (MVS). Genera productos métricos de alta precisión —nube de puntos densa, modelo tridimensional, modelo digital de elevación (DEM) y ortomosaico— que constituyen la base espacial para el análisis de daños (Westoby et al., 2012).

- **Dimensión X3: Inspección visual sistemática georreferenciada.** Método de documentación in situ del bien patrimonial mediante recorrido planificado por sectores, con registro fotográfico georreferenciado a nivel de suelo utilizando GPS Map Camera. Permite capturar detalles y evidencias visuales de patologías que el vuelo UAV no resuelve a escala de detalle, complementando el modelo fotogramétrico con coordenadas reales de cada punto de registro (Zeballos-Velarde et al., 2020).

3.10.2.2 Variable dependiente (Y): Detección y análisis de daños

- **Dimensión Y1: Clasificación de patologías.** Proceso de identificación y categorización sistemática de los tipos de deterioro presentes en la fachada patrimonial —biodeterioro, erosión, fisuras, humedad, desprendimiento y daño antrópico— conforme a criterios técnicos establecidos en conservación patrimonial. La clasificación se realiza mediante la interpretación visual del modelo tridimensional y del ortomosaico generados en Agisoft Metashape (Doehne & Price, 2010).
- **Dimensión Y2: Extensión del daño.** Medición métrica objetiva de la superficie afectada (m^2) correspondiente a cada tipología de daño por zona de la fachada, obtenida mediante la digitalización de polígonos sobre el modelo tridimensional en Agisoft Metashape y el cálculo automatizado de áreas georreferenciadas. Provee datos cuantitativos replicables sobre la magnitud real del deterioro en cada sector de la edificación (Zeballos-Velarde et al., 2020).
- **Dimensión Y3: Localización del daño.** Determinación de la distribución espacial de las patologías sobre la envolvente patrimonial, expresada en coordenadas métricas reales (UTM) y por sector de fachada. Permite identificar las zonas de mayor concentración de deterioro, jerarquizar las áreas críticas de intervención y generar cartografía temática de patologías como insumo para el diagnóstico técnico integral (Yaşar Yiğit & Uysal, 2024).

3.10.3. Indicadores

Los indicadores son elementos específicos y medibles que permiten cuantificar las dimensiones de las variables de estudio (Caballero Romero, 2014).

3.10.3.1 Indicadores de la variable independiente (X):

1. **Fotogrametría UAV (X1)**
 - Resolución espacial de imagen (GSD) [milímetros por píxel (mm/píx)]
 - Porcentaje de solapamiento longitudinal y transversal [Porcentaje (%)]
 - Número de imágenes capturadas [Unidad (und)]
2. **Fotogrametría computacional SfM-MVS (X2)**
 - Densidad de la nube de puntos densa [Puntos por metro cuadrado (pts/ m^2)]
 - Error de reproyección del modelo (RMSE) [Milímetros (mm)]
 - Resolución del ortomosaico generado [milímetros por píxel (mm/píx)]
3. **Inspección visual sistemática georreferenciada (X3)**

- Número de estaciones de registro fotográfico [Unidad (und)]
- Cobertura espacial del recorrido de inspección [Metros lineales (ml)]
- Precisión de georreferenciación GPS [Metros (\pm m)]

3.10.3.2 Indicadores de la variable dependiente (Y):

1. Clasificación de patologías (Y1)

- Número de tipos de patología identificados [Unidad (und)]
- Número de polígonos digitalizados por tipo de patología [Unidad (und)]
- Nivel de severidad por patología [Escala ordinal (leve / moderado / severo)]

2. Extensión del daño (Y2)

- Área afectada por tipo de patología [Metros cuadrados (m²)]
- Porcentaje de superficie afectada por zona de fachada [Porcentaje (%)]
- Longitud de fisuras registradas [Metros lineales (ml)]

3. Localización del daño (Y3)

- Número de zonas con presencia de patología [Unidad (und)]
- Distribución espacial por sector de fachada [Coordenadas UTM (m)]
- Concentración de daño por zona [Metros cuadrados por zona (m²/zona)]

En el Cuadro 24 se presenta la matriz de operacionalización de las variables identificadas, donde se detalla las variables, dimensiones, indicadores y sus respectivas unidades de medida. Esta matriz permite establecer la relación sistemática entre los constructos teóricos y los elementos empíricamente observables, facilitando la medición rigurosa de cada componente de los métodos no invasivos aplicados y del análisis de daños en el bien patrimonial.

3.11. Técnicas e instrumentos

3.11.1. Técnicas de investigación

La presente investigación emplea técnicas especializadas para la recopilación, procesamiento y análisis de datos orientadas al mapeo y cuantificación de patologías superficiales en la Iglesia Santa Teresa de Ayacucho mediante fotogrametría UAV y *Structure from Motion* (SfM). A continuación se detallan las técnicas utilizadas:

1. **Revisión bibliográfica y documental:** Recopilación y análisis crítico de literatura científica sobre fotogrametría con vehículos aéreos no tripulados (UAV), reconstrucción tridimensional por *Structure from Motion* (SfM), patología de edificaciones patrimoniales, criterios de clasificación y severidad de daños en construcciones históricas, y metodologías de diagnóstico no destructivo del patrimonio edificado. La revisión se apoya en fuentes indexadas en Scopus, Web of Science, Google Scholar, repositorios institucionales nacionales e internacionales, y normativas técnicas del Ministerio de Cultura del Perú aplicables a la conservación del patrimonio edificado.
2. **Levantamiento fotogramétrico UAV:** Técnica de captura sistemática de imágenes

mediante vehículo aéreo no tripulado (*Autel Robotics XT705*) con trayectorias combinadas de nadir y oblicuas alrededor del perímetro de la edificación, para registrar la totalidad de la envolvente tridimensional — fachadas, torres, cubierta y muros laterales — con solapamiento longitudinal de $\approx 99.6\%$ y resolución GSD de 2.46 mm/píx. El levantamiento se ejecutó el 28 de abril de 2025 con condiciones de iluminación natural favorable, capturando 1,189 imágenes a una distancia media cámara-superficie de 7.68 m.

3. **Procesamiento fotogramétrico SfM:** Procesamiento de las imágenes capturadas mediante el algoritmo *Structure from Motion* implementado en *Agisoft Metashape Professional v2.3.1*, para la generación de la nube de puntos densa (274,990,458 puntos), el modelo de teselas tridimensional (GSD = 2.46 mm/píx), el Modelo Digital de Elevaciones (MDE, resolución 6.46 mm/píx) y el ortomosaico georreferenciado (resolución 3.23 mm/píx), en el sistema de coordenadas WGS 84 / UTM zona 18S + EGM2008.
4. **Mapeo y digitalización de patologías:** Identificación, localización y delimitación de las patologías superficiales mediante la digitalización manual de polígonos sobre el modelo de teselas tridimensional georreferenciado en *Agisoft Metashape Professional v2.3.1*, siguiendo la nomenclatura establecida: BI_ biodeterioro, DE_ desprendimiento, ER_ erosión, DA_ daño antrópico y FI_ fisuras. Se digitalizaron 266 polígonos distribuidos en las cinco categorías de patologías.
5. **Cuantificación geoespacial de áreas afectadas:** Cálculo automático del área en metros cuadrados (m^2) de cada polígono de patología mediante scripts Python ejecutados en la consola de *Agisoft Metashape Professional*, que extraen y procesan las coordenadas de los vértices de cada polígono en el sistema de referencia UTM para determinar el área afectada por tipología, por zona y el área total.
6. **Clasificación por niveles de severidad:** Clasificación cuantitativa de las patologías identificadas en niveles de severidad — leve, moderado, severo y muy severo — mediante criterios de extensión del área afectada (m^2) específicos para cada tipología de patología, establecidos con base en los criterios técnicos desarrollados en el marco teórico de la investigación.
7. **Análisis estadístico descriptivo:** Procesamiento estadístico de los datos de área, distribución y severidad de las patologías identificadas mediante scripts Python, para la generación de tablas comparativas, porcentajes de afectación y jerarquías de intervención que sinteticen cuantitativamente el diagnóstico del estado de conservación de la edificación.

3.1.1.2. Instrumentos de investigación

Para la implementación de las técnicas mencionadas se utilizaron los siguientes instrumentos especializados:

- **Sistema UAV de captura fotogramétrica:**
 - **UAV Autel Robotics XT705:** Plataforma cuadricóptero con cámara integrada de

20 MP ($5,472 \times 3,648$ px), distancia focal 10.57 mm, apertura f/2.8, velocidad de obturación 1/2,500 s e ISO 100. Empleado para el levantamiento fotogramétrico de la totalidad de la envolvente de la Iglesia Santa Teresa de Ayacucho el 28 de abril de 2025.

- **Controladora y sistema de telemetría:** Sistema de control remoto del UAV con pantalla integrada para monitoreo en tiempo real de la trayectoria de vuelo, altitud, velocidad y estado de la batería durante el levantamiento fotogramétrico.
- **Maletín de transporte IP67:** Contenedor rígido de protección para el traslado y almacenamiento del UAV y sus accesorios al área de trabajo.
- **Software de procesamiento fotogramétrico:**
 - **Agisoft Metashape Professional v2.3.1:** Software especializado en fotogrametría SfM utilizado para la alineación de imágenes, generación de la nube de puntos densa, construcción del modelo de teselas, generación del MDE y ortomosaico, y digitalización de los 266 polígonos de patologías sobre el modelo tridimensional georreferenciado.
- **Estación de trabajo de alto rendimiento:**
 - **CPU:** AMD Ryzen 9 9950X3D (16 núcleos)
 - **RAM:** 61.64 GB
 - **GPU:** NVIDIA GeForce RTX 5080 (16 GB VRAM, 84 unidades de cómputo, CUDA 13000)Hardware empleado para el procesamiento fotogramétrico del bloque completo de 1,189 imágenes, con aceleración GPU para las etapas de generación de mapas de profundidad, nube de puntos densa y modelo de teselas.
- **Instrumentos de medición complementarios:**
 - **Cinta métrica:** Instrumento de medición directa empleado para la verificación de distancias conocidas en la fachada de la edificación, permitiendo la validación de las mediciones obtenidas sobre el modelo fotogramétrico tridimensional mediante comparación de distancias campo vs. modelo.

3.11.3. Herramientas de software utilizadas

Cuadro 4: Herramientas de software utilizadas en la investigación

Herramienta	Descripción
<i>Agisoft Metashape Professional v2.3.1</i>	Procesamiento fotogramétrico SfM, generación de nube de puntos densa, modelo de teselas, MDE, ortomosaico y digitalización de polígonos de patologías
Python 3.x	Scripting para extracción de metadatos EXIF, cálculo de áreas de polígonos, análisis estadístico descriptivo y automatización del procesamiento
LaTeX (Overleaf)	Preparación y redacción del informe final de tesis con tipografía científica
QGIS / SIG	Verificación geoespacial de la georreferenciación del modelo fotogramétrico en el sistema WGS 84 / UTM zona 18S
Microsoft Excel	Organización y validación de datos numéricos de áreas, porcentajes y severidad de patologías
SciPy / NumPy	Bibliotecas Python para cálculo numérico y análisis estadístico de los resultados de cuantificación

Fuente: Elaboración propia

3.12. Desarrollo de trabajo de tesis

3.12.1. Gestión de permisos y autorización de vuelo

El levantamiento fotogramétrico con vehículo aéreo no tripulado (UAV) sobre la Iglesia Santa Teresa de Ayacucho, requirió la gestión previa de autorizaciones ante las autoridades competentes del inmueble. Para ello, se presentó una solicitud formal ante el Monasterio de Madres Carmelitas Descalzas (Jr. 28 de Julio N° 630, Ayacucho), obteniendo la autorización de la Madre Priora Carmen Rosa mediante su firma y sello oficial con fecha 29 de noviembre de 2025, así como una solicitud previa ante el **Arzobispado de Ayacucho** con fecha 07 de abril de 2025, recibida con sello oficial de Mesa de Partes. Los documentos originales de ambas autorizaciones se adjuntan en la sección anexos de la presente investigación.

3.12.2. Levantamiento fotogramétrico con UAV

El levantamiento fotogramétrico de la Iglesia Santa Teresa de Ayacucho se realizó el **28 de abril de 2025**, en condiciones de iluminación natural favorable propias de la mañana, con cielo parcialmente nublado que garantizó una iluminación homogénea sobre las fachadas y cubierta de la edificación, reduciendo sombras pronunciadas que pudieran afectar la calidad de las imágenes fotogramétricas.

Equipo empleado

El sistema UAV utilizado fue el **Autel Robotics XT705** adecuada para levantamientos fotogramétricos de precisión en entornos urbanos y arquitectónicos. El equipo se transportó y protegió en un maletín rígido de protección, garantizando la integridad del sensor durante el traslado al área de trabajo.

Figura 13

Preparación del equipo UAV Revisión del Autel Robotics XT705 y sus accesorios, previo al inicio del levantamiento fotogramétrico. Plaza adyacente a la Iglesia Santa Teresa de Ayacucho.



Nota. Imagen propia.

Figura 14

UAV Autel Robotics XT705



Nota. Imagen propia.

El Cuadro 5 presenta las especificaciones técnicas del sistema UAV empleado en el levantamiento.

Cuadro 5

Especificaciones técnicas del sistema UAV Autel Robotics XT705 empleado en el levantamiento fotogramétrico

Especificación	Valor
Fabricante / Modelo	Autel Robotics XT705
Tipo de plataforma	Cuadrícóptero
Sensor de imagen	CMOS 20 MP
Resolución del sensor	5,472 × 3,648 px
Distancia focal	10.57 mm (29 mm equiv.)
Tamaño de píxel	2.4 × 2.4 μm
Apertura máxima	f/2.8
Formato de captura	JPG
Sistema de posicionamiento	GPS integrado
Software de firmware	V0.2.27.9

Nota. Elaboración propia, con base en los metadatos EXIF de las imágenes capturadas y las especificaciones técnicas del fabricante.

Área de estudio y reconocimiento previo

Previo al inicio del vuelo se realizó un reconocimiento visual del área de trabajo para identificar posibles obstáculos, zonas de acceso restringido y condiciones de seguridad operacional. La Iglesia Santa Teresa se ubica en el jirón 28 de Julio, en el Centro Histórico de Ayacucho, declarado Patrimonio Cultural de la Nación. El entorno inmediato incluye vías vehiculares, árboles de porte mediano y postes de alumbrado público, factores que se consideraron en la planificación de la trayectoria de vuelo.

Figura 15

Vista frontal de la Iglesia Santa Teresa de Ayacucho — Fachada principal de estilo barroco



Nota. Imagen propia.

Ejecución del vuelo fotogramétrico

El vuelo fotogramétrico se ejecutó, con trayectorias combinadas de nadir y oblicuas alrededor del perímetro de la edificación, con el objetivo de capturar la totalidad de la envolvente tridimensional —fachadas, torres, cubierta y muros laterales— con el máximo nivel de detalle posible.

Dado que la Iglesia Santa Teresa presenta una geometría tridimensional compleja, con elementos ornamentales en relieve, cornisas, pilastras, portadas y cúpulas de las torres, se optó por una estrategia de vuelo de baja altitud y alta densidad de imágenes, manteniendo una distancia media cámara-superficie de **7.68 m** y una velocidad de desplazamiento de 1–2 m/s, con velocidad de obturación de 1/2,500 s e ISO 100 para garantizar imágenes nítidas sin *motion blur*.

Figura 16

Ejecución del vuelo fotogramétrico — El operador controla el Autel Robotics XT705



Nota. Imagen propia.

Figura 17

Operador con controladora y UAV Autel XT705 posado frente a la portada principal de la Iglesia Santa Teresa



Nota. Imagen propia.

En total se capturaron **1,189 imágenes** a lo largo de toda la jornada de levantamiento, logrando un solapamiento longitudinal de $\approx 99.6\%$ entre imágenes consecutivas, lo que garantizó la generación de una nube de puntos densa de **274,990,458 puntos** y un modelo tridimensional de alta fidelidad geométrica con resolución GSD de **2.46 mm/píx**, suficiente

para la identificación y cuantificación de las patologías superficiales presentes en la envolvente de la edificación patrimonial.

3.12.3. Procesamiento fotogramétrico en *Agisoft Metashape Professional*

El procesamiento fotogramétrico de las 1,189 imágenes capturadas durante el levantamiento UAV se realizó en ***Agisoft Metashape Professional v2.3.1***, software de referencia internacional para fotogrametría de estructura por movimiento (*Structure from Motion*, SfM). El procesamiento se ejecutó en una estación de trabajo de alto rendimiento con procesador **AMD Ryzen 9 9950X3D**, **61.64 GB de RAM** y GPU **NVIDIA GeForce RTX 5080** con 16 GB de memoria de video, lo que permitió la aceleración por CUDA de las etapas más computacionalmente intensivas.

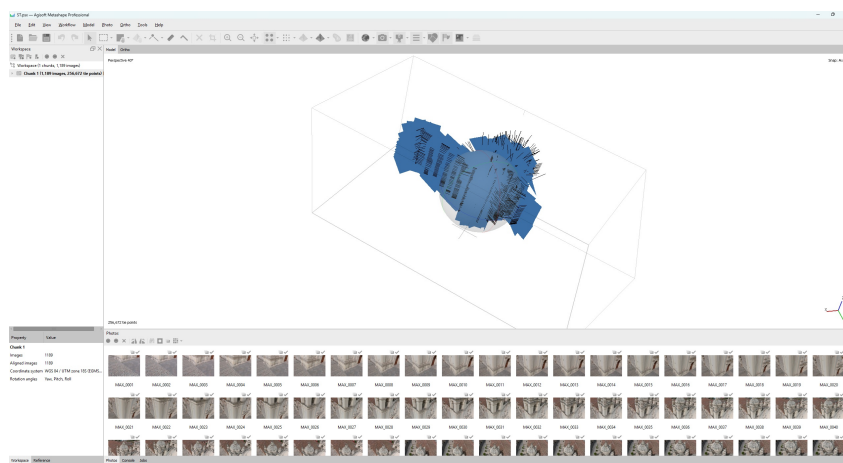
El flujo de trabajo (*workflow*) implementado comprendió las siguientes etapas secuenciales, conforme a la metodología SfM estándar para levantamientos fotogramétricos de edificaciones patrimoniales.

Alineación de imágenes y generación de nube de puntos dispersa

La primera etapa del procesamiento consistió en la **alineación de imágenes** mediante el algoritmo SfM, que detecta y empareja puntos de interés homólogos (*tie points*) entre imágenes contiguas para estimar la posición y orientación de cada cámara en el espacio tridimensional. Se configuraron los siguientes parámetros de alineación: Precisión máxima, 40,000 puntos clave por imagen, preselección genérica activada, emparejamiento guiado activado y exclusión de puntos de paso inmóviles.

Figura 18

Resultado de la alineación de imágenes en Agisoft Metashape Professional v2.3.1

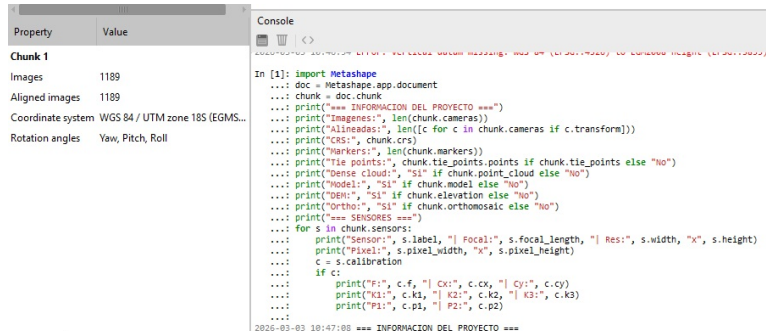


Nota. Imagen propia adaptado de *Agisoft Metashape Professional*.

La verificación de los parámetros de alineación y calibración del sensor se realizó mediante un script Python ejecutado directamente en la consola de *Metashape*, que extrajo automáticamente la información del proyecto, el sistema de referencia, los coeficientes de calibración interna y el estado de los productos fotogramétricos.

Figura 19

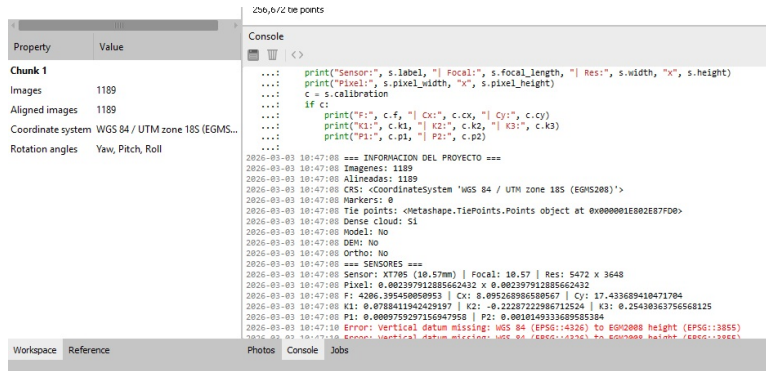
Script Python de verificación de parámetros del proyecto en la consola de Agisoft Metashape Professional



Nota. Imagen propia adaptado de Agisoft Metashape Professional.

Figura 20

Resultados de la verificación del proyecto fotogramétrico en consola — Se confirman: 1,189 imágenes alineadas, sistema de coordenadas WGS 84 / UTM zona 18S (EGMS208).



Nota. Imagen propia adaptado de Agisoft Metashape Professional.

3.12.3.1 Filtrado y depuración de la nube de puntos densa

La generación de la nube de puntos densa mediante el algoritmo MVS produce inevitablemente puntos espurios o de ruido originados por reflexiones especulares en superficies pulidas, oclusiones parciales entre pasadas de vuelo, vegetación adherida a la cubierta y artefactos radiométricos en zonas de transición luz-sombra. La presencia de este ruido en la nube sin depurar introduce errores en el cálculo de áreas de patologías al incluir puntos que no corresponden a la superficie real de la edificación. Para garantizar la validez métrica de los 266 polígonos digitalizados, se aplicó un proceso de depuración en dos etapas secuenciales antes de la generación del modelo de teselas.

A. Etapa 1 — Filtrado automático durante la densificación MVS

La primera etapa de depuración se ejecutó de forma automática durante la generación de la nube de puntos densa, configurando el **modo de filtrado agresivo** (*Aggressive filtering*) en la ventana *Build Dense Cloud* de Agisoft Metashape Professional v2.3.1. Este modo aplica internamente tres criterios de selección gradual sobre los puntos candidatos generados por el MVS:

- **Error de reproyección (*Reprojection Error*), umbral: 0.3 px:** Elimina los puntos cuya posición proyectada en las imágenes difiere más de 0.3 px de su posición observada, descartando puntos geoméricamente inconsistentes con el ajuste fotogramétrico.
- **Incertidumbre de reconstrucción (*Reconstruction Uncertainty*), umbral: 15:** Elimina los puntos con alta incertidumbre en su posición tridimensional, afectando principalmente las zonas de textura homogénea como los revoques de cal lisos sin patología visible, donde la correlación entre imágenes es baja.
- **Conteo mínimo de imágenes (*Image Count*), umbral: 3 imágenes:** Descarta los puntos visibles en menos de 3 cámaras simultáneamente, que son los más propensos a constituir artefactos o ruido por ausencia de redundancia en la triangulación.

El resultado de esta etapa fue una nube de puntos densa de **274 990 458 puntos** con atributos de color (3 bandas RGB, uint8), normal y confianza (rango 1–169), generada en **3 h 49 min** con un uso de memoria de **44.22 GB**, empleando 1188 mapas de profundidad procesados en la GPU **NVIDIA GeForce RTX 5080**.

B. Etapa 2 — Depuración manual de vegetación vascular en cubierta

La segunda etapa consistió en la eliminación manual de los puntos correspondientes a la **vegetación vascular** identificada en el tejado principal de la Iglesia Santa Teresa. Esta vegetación — arbustos y plantas de raíz con alturas de entre 0.15 y 0.45 m sobre la superficie de la teja — genera una nube de puntos flotante por encima del plano real de la cubierta, lo que introduciría un error sistemático en el cálculo del área de biodeterioro si no fuera eliminada previamente.

El procedimiento consistió en la selección manual de los puntos de vegetación mediante la herramienta *Free-Form Selection* de Metashape, operando sobre la vista cenital de la nube de puntos densa y comparando visualmente con el ortomosaico, donde la vegetación es claramente distinguible por su firma cromática verde intensa. Los puntos seleccionados fueron eliminados antes del cálculo de las áreas de los polígonos de biodeterioro, garantizando que las mediciones de área corresponden exclusivamente a la superficie de teja afectada por líquenes y musgos y no a la copa de la vegetación.

C. Resultado del proceso de depuración

El Cuadro 6 resume los parámetros del proceso de filtrado y depuración aplicado sobre la nube de puntos densa:

Cuadro 6

Parámetros de filtrado y depuración de la nube de puntos densa — Iglesia Santa Teresa, Ayacucho 2025

Parámetro	Valor
Calidad de mapas de profundidad	Alta
Modo de filtrado automático	Agresivo (<i>Aggressive</i>)
Número de mapas de profundidad procesados	1 188
Umbral error de reproyección	0.3 px
Umbral incertidumbre de reconstrucción	15
Umbral mínimo de imágenes por punto	3 imágenes
Total de puntos — nube depurada final	274 990 458 puntos
Atributos por punto	Color RGB, Normal, Confianza (1-169)
Tiempo de procesamiento	3 h 49 min
Memoria utilizada	44.22 GB
Depuración manual (vegetación vascular)	Aplicada sobre cubierta principal

Nota. Elaboración propia. Parámetros obtenidos del reporte de procesamiento de *Agisoft Metashape Professional v2.3.1*.

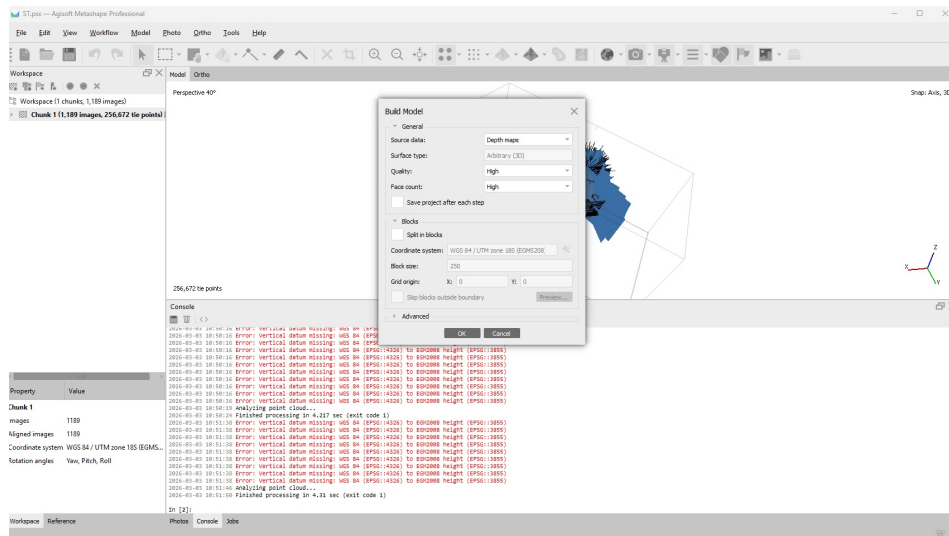
La nube de puntos depurada constituye la base geométrica sobre la cual se realizó la digitalización de los 266 polígonos de patologías, garantizando que todas las mediciones de área expresadas en m² corresponden a la superficie real de la envolvente de la Iglesia Santa Teresa y no a artefactos de ruido del procesamiento fotogramétrico.

Generación del modelo (*Tiled Model*)

Una vez completada la alineación de imágenes y la generación de la nube de puntos densa, se procedió a la construcción del **modelo de teselas** (*Tiled Model*), producto fotogramétrico que combina la geometría tridimensional con la textura fotográfica real de la edificación, constituyendo la base geométrica sobre la cual se realizó el mapeo y digitalización de las patologías superficiales.

La configuración del modelo se realizó mediante la ventana *Build Model* con los siguientes parámetros: Origen de datos mapas de profundidad (*Depth Maps*), tipo de superficie arbitrario 3D (*Arbitrary 3D*), calidad alta, conteo de caras medio, tamaño de tesela 256, sin filtro de efecto fantasma (*ghosting filter*), en el sistema de coordenadas WGS 84 / UTM zona 18S (EGMS208).

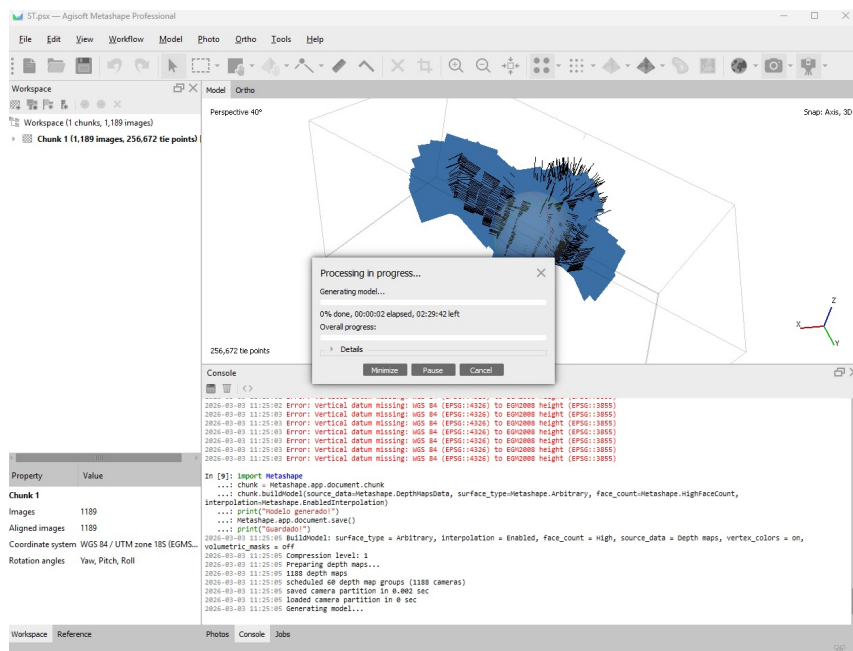
Figura 21
Configuración de parámetros en la ventana Build Model de Agisoft Metashape Professional.



Nota. Imagen propia adaptado de Agisoft Metashape Professional.

La generación del modelo fue ejecutada mediante script Python y acelerada por la GPU **NVIDIA GeForce RTX 5080**, procesando 1,188 mapas de profundidad en paralelo. Las Figuras 22 y 23 muestran el progreso del proceso de generación del modelo.

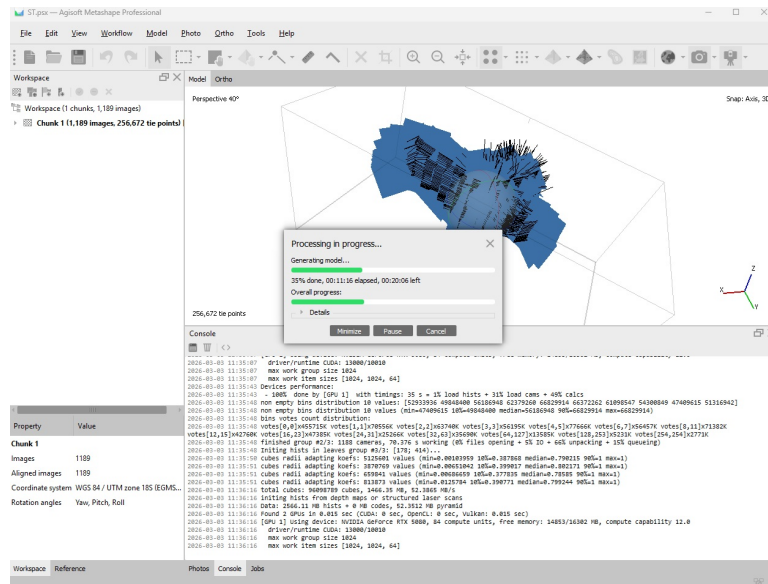
Figura 22
Inicio del proceso de generación del modelo — Processing in progress: Generating model al 0 % de avance.



Nota. Imagen propia adaptado de Agisoft Metashape Professional.

Figura 23

Avance al 35 % del proceso de generación del modelo – Tiempo transcurrido: 11 minutos 16 segundos.



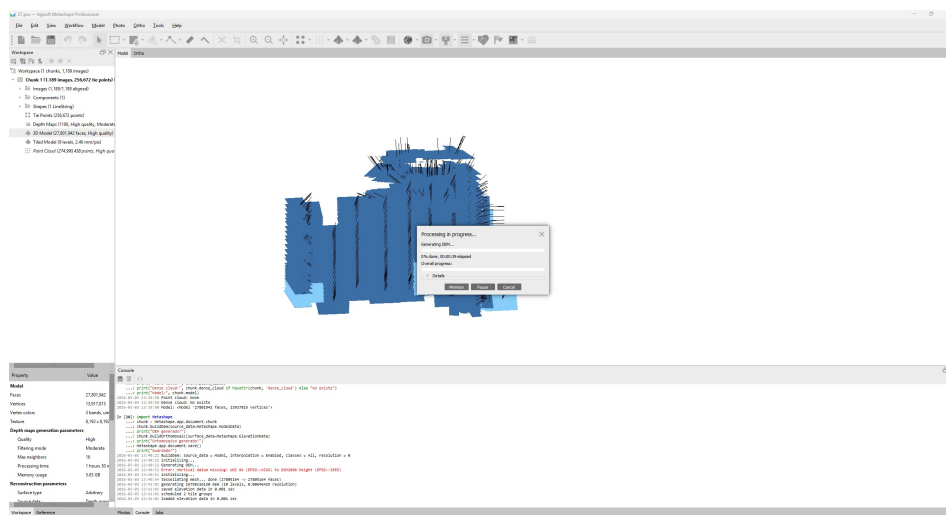
Nota. Imagen propia adaptado de Agisoft Metashape Professional.

Generación del MDE y el ortomosaico

Concluida la generación del modelo de teselas, se procedió a la construcción del **Modelo Digital de Elevaciones (MDE)** y del **ortomosaico** georreferenciado. Ambos productos se generan a partir de la nube de puntos densa, con interpolación habilitada y en el sistema de coordenadas WGS 84 / UTM zona 18S + EGM2008. El panel de *Workspace* muestra los productos generados: Depth Maps (1,188), Modelo 3D (27,801,942 caras), Tiled Model (9 niveles, 2.46 mm/píx), Nube de puntos (274,990,458 puntos), DEM (15,790 × 16,130 px, 6.46 mm/píx) y Ortomosaico (31,596 × 32,260 px, 3.23 mm/píx).

Figura 24

Generación del Modelo Digital de Elevaciones (MDE) en curso sobre el modelo parcial de la edificación en la vista 3D.



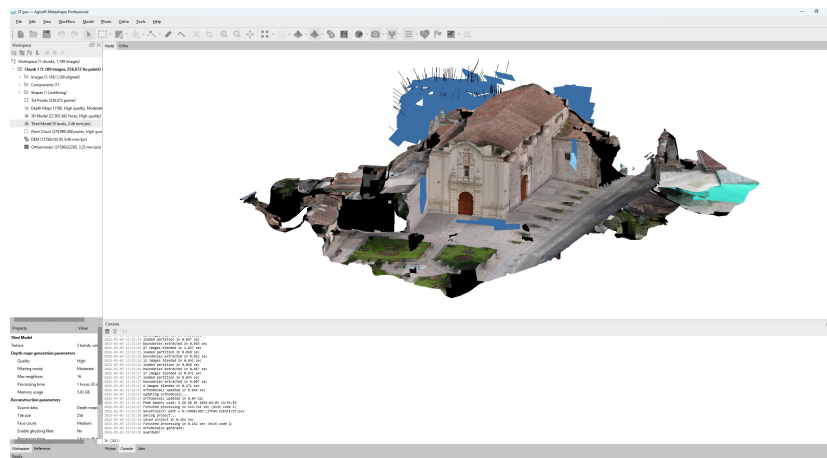
Nota. Imagen propia adaptado de Agisoft Metashape Professional.

Resultado final del modelo fotogramétrico

El modelo de teselas (*Tiled Model*) resultante constituye una representación tridimensional de alta fidelidad geométrica y fotorrealista de la Iglesia Santa Teresa de Ayacucho, con resolución GSD de **2.46 mm/píx** en 9 niveles de detalle (*Level of Detail, LoD*). El modelo permite la navegación e inspección interactiva de la totalidad de la envolvente de la edificación — fachadas, torres, cubierta, muros laterales y elementos ornamentales — con el nivel de detalle suficiente para la identificación y digitalización de las patologías superficiales.

Figura 25

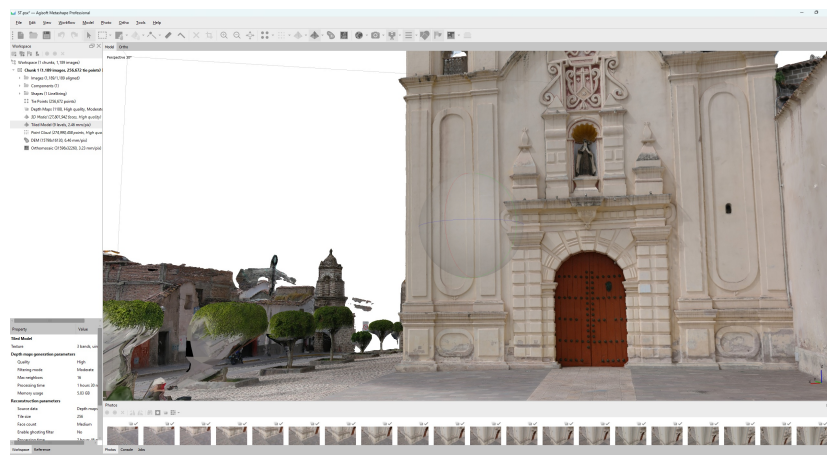
Vista general del modelo de teselas (*Tiled Model*) al término del procesamiento



Nota. Imagen propia adaptado de Agisoft Metashape Professional.

Figura 26

Detalle del modelo de teselas (*Tiled Model*) — Vista de la portada principal y fachada frontal de la Iglesia Santa Teresa de Ayacucho.



Nota. Imagen propia adaptado de Agisoft Metashape Professional.

El Cuadro 7 resume las características de todos los productos fotogramétricos generados en el procesamiento final.

Cuadro 7

Productos fotogramétricos generados – Agisoft Metashape Professional v2.3.1, Iglesia Santa Teresa de Ayacucho

Producto	Resolución / Cantidad	Dimensiones	Tiempo
Mapas de profundidad	Alta / Moderado	1,188 mapas	1 h 30 min
Nube de puntos densa	Alta / Agresivo	274,990,458 pts	3 h 49 min
Modelo 3D (<i>mesh</i>)	Alta	27,801,942 caras	2 h 46 min
Modelo de teselas	2.46 mm/píx	9 niveles LoD	2 h 46 min
MDE	6.46 mm/píx	15,790 × 16,130 px	1 min 21 s
Ortomosaico	3.23 mm/píx	31,596 × 32,260 px	10 min 33 s

Nota. Elaboración propia. Datos obtenidos del reporte de procesamiento de *Agisoft Metashape Professional v2.3.1*.

3.12.3.2 Criterios de selección y evaluación del solapamiento de imágenes

Durante la campaña de levantamiento fotogramétrico ejecutada el 28 de abril de 2025 sobre la Iglesia Santa Teresa de Ayacucho, se capturaron aproximadamente **3 000 fotogramas** distribuidos en cuatro configuraciones de vuelo: Pasadas cenitales (0°), pasadas oblicuas a 45° , pasadas oblicuas a 70° y pasadas oblicuas horizontales a 90° sobre las fachadas verticales (configuración *double-grid*). De este conjunto total, Agisoft Metashape Professional v2.3.1 procesó y alineó exitosamente **1 189 imágenes**, equivalente al 39.6 % del total capturado. La reducción del conjunto de imágenes no constituye una pérdida de información sino el resultado de un proceso de depuración técnica basado en cuatro criterios objetivos aplicados automáticamente por el software durante la fase de alineamiento:

3.12.3.3 Criterio 1 – Puntuación de calidad de imagen (*Image Quality Score*)

Metashape calcula automáticamente un índice de calidad para cada imagen en el rango $[0, 1]$, estimado a partir del nivel de nitidez, contraste y ausencia de desenfoque por movimiento (*motion blur*). Se estableció como umbral mínimo aceptable una puntuación de $Q \geq 0,5$, conforme a las recomendaciones del manual técnico del software (Agisoft LLC, 2023). Las imágenes con $Q < 0,5$ fueron excluidas del procesamiento por presentar desenfoque asociado a ráfagas de viento, variaciones de iluminación en zonas de sombra profunda bajo los aleros y al movimiento del UAV durante el giro entre pasadas. Este filtro es el de mayor impacto cuantitativo sobre la reducción del conjunto inicial.

3.12.3.4 Criterio 2 – Densidad de puntos homólogos (*Keypoints*)

El descriptor SIFT (*Scale-Invariant Feature Transform*) detecta y describe puntos de interés en cada imagen para el proceso de emparejamiento entre fotogramas. Las imágenes capturadas sobre superficies de textura homogénea — revoques de cal sin patologías,

zonas de cielo y suelo incluidas en el encuadre — presentaron una densidad de *keypoints* insuficiente para garantizar el emparejamiento con imágenes adyacentes, siendo excluidas del ajuste fotogramétrico en bloque (*bundle adjustment*). Este criterio afectó principalmente a imágenes de transición entre pasadas y a fotogramas con encuadres parciales de las torres campanario.

3.12.3.5 Criterio 3 — Solapamiento efectivo y redundancia de cobertura

El solapamiento promedio del conjunto de imágenes alineadas fue de **99.6 %**, valor que excede ampliamente el mínimo recomendado del 80 % para fotogrametría de fachadas verticales (Tysiąg et al., 2023). Un solapamiento superior al 95 % genera redundancia de información que incrementa el tiempo de procesamiento sin mejorar la calidad métrica del modelo. En consecuencia, el módulo de alineamiento de Metashape pondera automáticamente la contribución de cada imagen al ajuste en bloque, reduciendo la influencia de fotogramas con contenido visual prácticamente idéntico al de imágenes adyacentes. El resultado es un conjunto depurado que mantiene la máxima cobertura espacial con la mínima redundancia necesaria para la robustez del ajuste.

3.12.3.6 Criterio 4 — Error de reproyección por imagen

Durante el ajuste en bloque, Metashape calcula el error de reproyección individual de cada cámara como la distancia media en píxeles entre la posición observada y la posición proyectada de los *keypoints* compartidos. Las cámaras con error de reproyección individual superior a **1 px** fueron excluidas del ajuste final para garantizar la integridad geométrica del modelo, conforme al criterio estándar reportado en la literatura para levantamientos UAV-SfM en patrimonio edificado (Pepe et al., 2022). El error de reproyección global del conjunto de 1189 imágenes alineadas resultó en **0.42 px**, valor que confirma la solidez del ajuste fotogramétrico.

3.12.3.7 Resumen del proceso de depuración

El Cuadro 8 sintetiza el resultado del proceso de depuración aplicado sobre el conjunto total de imágenes capturadas:

Cuadro 8

Proceso de depuración del conjunto de imágenes fotogramétricas — Iglesia Santa Teresa, Ayacucho 2025

Etapa	N° imágenes	% del total
Total capturado en campo	≈3 000	100.0 %
Excluidas por $Q < 0,5$ (motion blur, subexposición)	≈1200	≈40.0 %
Excluidas por <i>keypoints</i> insuficientes	≈400	≈13.3 %
Excluidas por redundancia / reproyección alta	≈211	≈7.0 %
Imágenes alineadas exitosamente	1 189	39.6 %

Nota. Elaboración propia. Procesamiento: Agisoft Metashape Professional v2.3.1.

El conjunto final de 1189 imágenes alineadas generó **256 672 puntos homólogos** (*tie points*) con un error de reproyección global de **0.42 px**, confirmando que la depuración automática producida por Metashape preservó únicamente las imágenes que contribuyen de manera efectiva a la robustez geométrica del modelo fotogramétrico, sin sacrificar cobertura espacial sobre ninguna zona de la envolvente de la Iglesia Santa Teresa.

3.12.4. Plan de vuelo y parámetros de captura

El levantamiento fotogramétrico de la Iglesia Santa Teresa de Ayacucho fue realizado, en condiciones de iluminación natural favorable propias de la mañana. Se empleó el UAV **Autel Robotics XT705** equipado con una cámara de **20 megapíxeles** (5472×3648 px) y distancia focal de 10.57 mm (equivalente a 29 mm en formato 35 mm). El plan de vuelo fue diseñado para obtener cobertura fotogramétrica completa de la envolvente tridimensional de la edificación fachadas, torres, cubierta y muros laterales mediante trayectorias combinadas de nadir y oblicuas alrededor del perímetro del inmueble. La Figura 27 muestra el ortomosaico generado con el área de cobertura total del levantamiento.

Figura 27

Ortomosaico cenital del área de levantamiento

REPORTE DE P FO

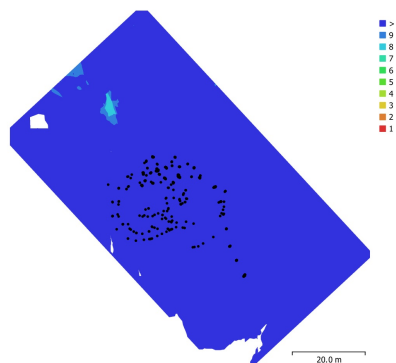
Processing Report
07 June 2025



Nota. Imagen propia adaptado de Agisoft Metashape Professional.

Figura 28

Distribución de posiciones de cámara y mapa de solapamiento de imágenes.



Nota. Imagen propia adaptado de Agisoft Metashape Professional.

Cuadro 9

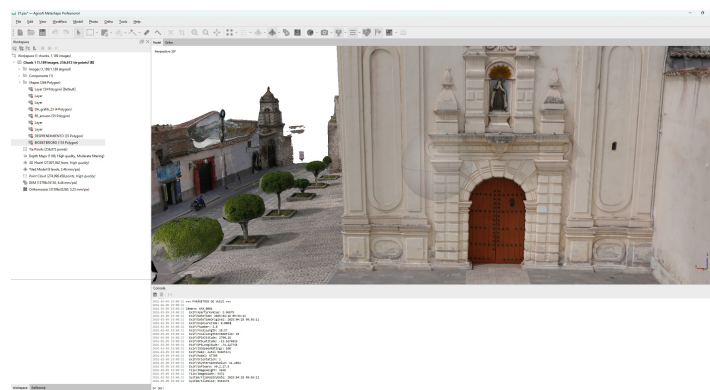
Parámetros técnicos del plan de vuelo y configuración de cámara — Levantamiento fotogramétrico UAV, Iglesia Santa Teresa de Ayacucho, 28 de abril de 2025

Parámetro	Valor
UAV / Plataforma	Autel Robotics XT705
Fecha y hora de vuelo	28 abril 2025 — 09:56 a.m.
Distancia media cámara-superficie	7.68 m
Altitud GPS absoluta	2,790.18 m.s.n.m.
Tipo de trayectoria	Nadir + oblicuas perimetrales
Solapamiento longitudinal	≈ 99.6 %
Distancia media entre estaciones	0.224 m
Número de imágenes	1,189
Área cubierta	4,778 m ²
Resolución en terreno (GSD)	2.46 mm/píx
Distancia focal	10.57 mm (29 mm equiv.)
Apertura de diafragma	f/2.8
Velocidad de obturación	1/2,500 s
Sensibilidad ISO	100
Resolución del sensor	5,472 × 3,648 px (20 MP)
Tamaño de píxel	2.4 × 2.4 μm
Formato de archivo	JPG

Nota. Elaboración propia. Parámetros de vuelo obtenidos de los metadatos EXIF de las imágenes procesadas en *Agisoft Metashape Professional v2.3.1*.

Figura 29

Interfaz de Agisoft Metashape Professional v2.3.1 durante el procesamiento final.



Nota. Imagen propia adaptado de *Agisoft Metashape Professional*.

El flujo de procesamiento comprendió las siguientes etapas, ejecutadas en el orden indicado:

1. **Alineación de imágenes** — Precisión máxima, 40,000 puntos clave por imagen, con preselección genérica y emparejamiento guiado. Resultado: 1,189/1,189 imágenes alineadas (100 %), 256,672 puntos de enlace, 1,775,423 proyecciones.
2. **Generación de mapas de profundidad** — Calidad alta, filtrado moderado, máximo 16 redundancias. 1,188 mapas generados. Tiempo: 1 hora 30 minutos.
3. **Generación de nube de puntos densa** — 274,990,458 puntos con color RGB y normales. Tiempo: 3 horas 49 minutos.
4. **Generación del modelo de teselas (Tiled Model)** — Calidad alta, tamaño de tesela 256, número de caras medio. Tiempo: 2 horas 46 minutos.
5. **Generación del MDE** — Resolución 6.46 mm/píx, tamaño 15,798 × 16,130 px. Tiempo: 1 min 21 s.
6. **Generación del ortomosaico** — Resolución 3.23 mm/píx, tamaño 31,596 × 32,260 px.

Evolución del procesamiento fotogramétrico

El procesamiento definitivo fue precedido por dos iteraciones preliminares realizadas en junio de 2025, las cuales permitieron verificar la viabilidad del levantamiento y ajustar los parámetros de procesamiento. El Cuadro 10 resume la evolución del hardware y los resultados obtenidos en cada etapa.

Cuadro 10

Evolución del procesamiento fotogramétrico — Comparativa de hardware y resultados

Parámetro	1° Procesamiento	2° Procesamiento	Procesamiento final
Fecha	Junio 2025	Junio 2025	Marzo 2026
Software	Metashape 2.1.3	Metashape 2.1.3	Metashape 2.3.1
CPU	Intel i5-7200U	Intel i5-7200U	AMD Ryzen 9 9950X3D
RAM	7.87 GB	7.87 GB	61.64 GB
GPU	GeForce 940MX	GeForce 940MX	RTX 5080
Vista	Perspectiva lateral	Cenital	Perspectiva + Cenital
GSD	2.46 mm/píx	2.46 mm/píx	2.46 mm/píx
Área cubierta	1,059 m ²	4,778 m ²	—
Nube de puntos	274,990,458	—	274,990,458

Nota. Elaboración propia. Datos obtenidos de los reportes de procesamiento de Agisoft Metashape Professional.

Figura 30

Primer procesamiento fotogramétrico — Portada del reporte (junio 2025). Vista perspectiva lateral del modelo 3D de la Iglesia Santa Teresa procesado

REPORTE DE P FO

Processing Report
07 June 2025



Nota. Imagen propia adaptado de Agisoft Metashape Professional.

Figura 31

Segundo procesamiento fotogramétrico — Portada del reporte (junio 2025). Ortomosaico

REPORTE DE P FO

Processing Report
07 June 2025



Nota. Imagen propia adaptado de Agisoft Metashape Professional.

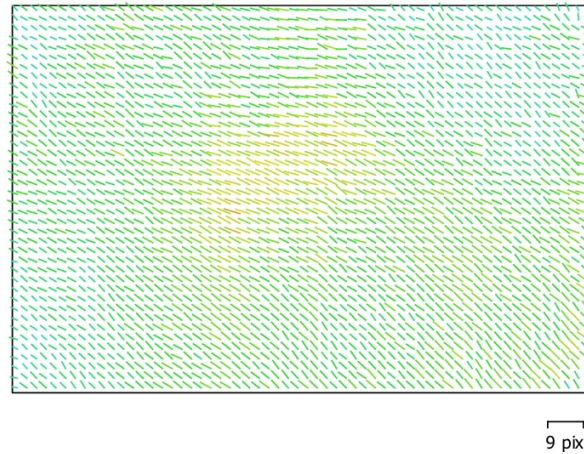
Calibración del sensor y distribución de errores

Las Figuras 32 y 33 muestran los indicadores de calibración interna del sensor XT705 y

la distribución espacial de los errores de ubicación de cámara, obtenidos del reporte de procesamiento de *Agisoft Metashape Professional v2.3.1*.

Figura 32

Gráfico de residuales de imagen para la cámara XT705 (10.57 mm) — 1,189 imágenes.



Nota. Imagen propia adaptado de *Agisoft Metashape Professional*.

Figura 33

Distribución espacial de posiciones de cámara y estimadores de error.



Nota. Imagen propia adaptado de *Agisoft Metashape Professional*.

Figura 34

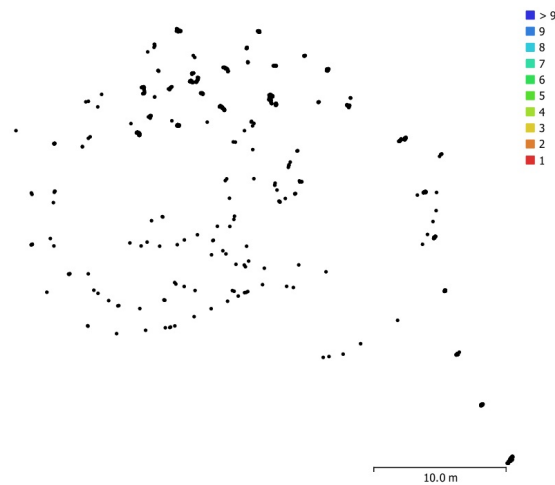
Modelo digital de elevaciones (MDE) — Vista lateral perspectiva. Rango altitudinal: -52 m a +48 m.



Nota. Imagen propia adaptado de *Agisoft Metashape Professional*.

Figura 35

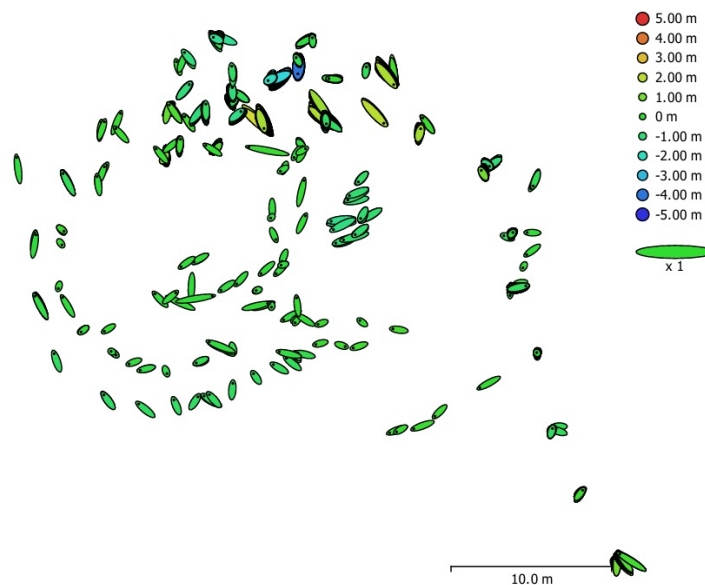
Distribución de posiciones de cámara — Vista cenital, reporte final (marzo 2026). Cada punto negro representa una estación de cámara del bloque fotogramétrico completo (1,189 estaciones).



Nota. Imagen propia adaptado de Agisoft Metashape Professional.

Figura 36

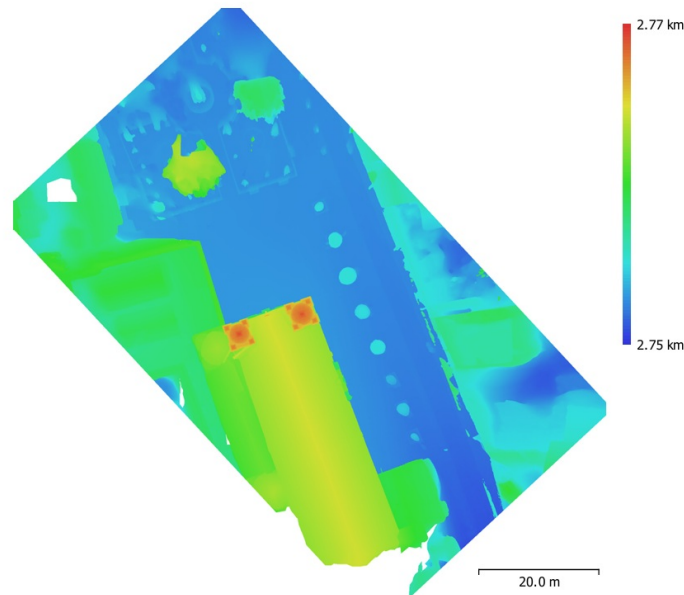
Estimadores de error de ubicación de cámara — Vista cenital, reporte final (marzo 2026). El tamaño y forma de las elipses representan el error planimétrico (XY) y el color indica el error altimétrico (Z).



Nota. Imagen propia adaptado de Agisoft Metashape Professional.

Figura 37

Modelo digital de elevaciones (MDE) — Vista cenital, segundo procesamiento (junio 2025).



Nota. Imagen propia adaptado de *Agisoft Metashape Professional*.

3.12.5. Validación métrica del modelo fotogramétrico

La validación métrica constituye el procedimiento mediante el cual se cuantifica la precisión geométrica del modelo fotogramétrico generado en *Agisoft Metashape Professional v2.3.1*, comparando las dimensiones obtenidas del modelo tridimensional con mediciones de referencia independientes tomadas directamente sobre la edificación. Dado que el procesamiento fotogramétrico se realizó **sin puntos de control terrestre (GCP)**, la precisión absoluta del modelo depende exclusivamente del posicionamiento GPS integrado del UAV *Autel Robotics XT705* (error combinado promedio: 1.46 m). Por ello, la validación métrica relativa —comparación de distancias medidas sobre el modelo frente a distancias obtenidas por fuentes independientes— constituye el indicador de precisión geométrica interna más adecuado para el presente estudio.

Fuentes de referencia

Las medidas de referencia independientes fueron obtenidas mediante tres fuentes complementarias:

1. **Mediciones de campo con flexómetro** — Se realizaron mediciones directas sobre la Iglesia Santa Teresa de Ayacucho empleando un flexómetro de 5 m de precisión ± 1 mm, con el apoyo de un equipo de trabajo. Las mediciones abarcaron el ancho del vano de la puerta principal, el módulo lateral de la fachada, una sección del muro lateral izquierdo y la altura de la fachada lateral, documentadas fotográficamente durante la visita de campo.
2. **Modelo BIM en Autodesk Revit 2025.4** — Como fuente de contraste adicional, se empleó el modelo de información de construcción (*Building Information Modeling*,

BIM) desarrollado sobre la misma nube de puntos fotogramétrica, del cual se extrajeron dimensiones de elementos arquitectónicos mediante un script Python ejecutado en *Autodesk Dynamo*, con conversión de unidades internas de pies a metros (factor: $\times 0,3048$).

3. **Planos CAD de relevamiento arquitectónico** — Como tercera fuente de contraste, se emplearon los planos arquitectónicos de la edificación obtenidos mediante levantamiento de campo, que grafican las dimensiones horizontales y verticales de la fachada principal, la sección del muro lateral y el detalle de cornisas. Estos planos aportan medidas adicionales no disponibles en campo por limitaciones de acceso (alturas superiores al alcance del flexómetro).

Campaña de medición de campo

La campaña de medición directa se realizó sobre la fachada principal y el muro lateral izquierdo de la Iglesia Santa Teresa de Ayacucho. Se identificaron previamente los elementos arquitectónicos con bordes nítidos y bien definidos, que garantizan una identificación inequívoca tanto en campo como en el modelo fotogramétrico.

Figura 38

Medición M1 — Ancho del vano de la puerta principal



Nota. Imagen propia. Registro de la la puerta principal de la Iglesia Santa Teresa de Ayacucho.
Medición directa con flexómetro

Figura 39

Medición M2 – Medición el segmento horizontal, desprendimiento de la pilastra lateral



Nota. Imagen propia. Medición el segmento horizontal, desprendimiento de la pilastra lateral, Medición directa con flexómetro de precisión

Figura 40

Medición M3 – Sección del muro lateral izquierdo



Nota. Imagen propia. Registro de la erosión del muro lateral en la Iglesia Santa.

Figura 41

Reconocimiento del nivel de desprendimiento lateral



Nota. Imagen propia. Identificación del desprendimiento evidenciándose el elemento estructural de los pilares

Figura 42

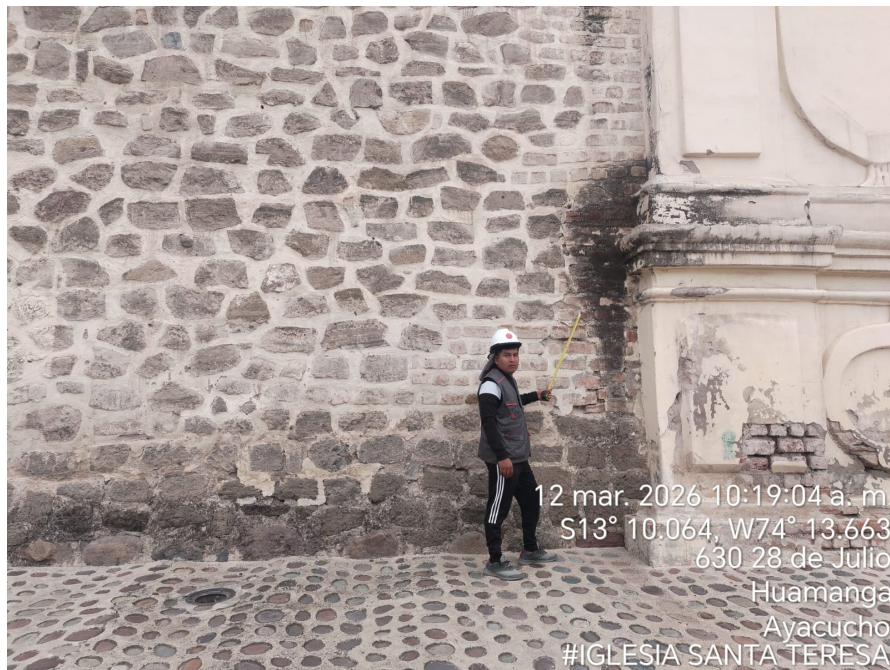
Vista general del sector de medición en la fachada principal



Nota. Imagen propia. Fachada principal de la Iglesia Santa Teresa de Ayacucho, respecto al entablamento, el módulo de pilastra y la portada principal.

Figura 43

Medición del detalle del biodeterioro en la zona lateral de la iglesia



Nota. Medición directa con el flexómetro de precisión del biodeterioro presente en la zona lateral de la iglesia.

Figura 44

Medición del basamento del pilar izquierdo



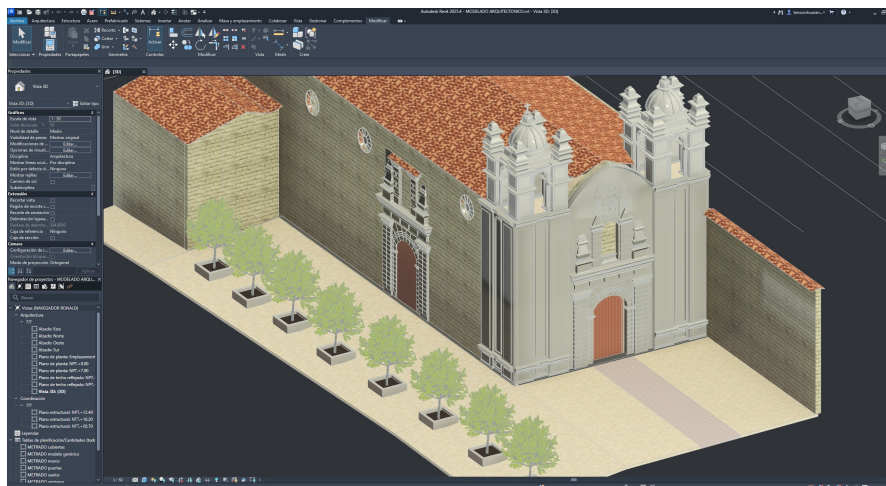
Nota. Imagen propia. Vista complementaria del desprendimiento en el muro lateral evidenciándose la reposición y mantenimiento con urgencia

Figura 45*Medición del desprendimiento de la fachada lateral*

Nota. Imagen propia. Extensión del flexómetro en sentido horizontal para registrar para registrar el desprendimiento, medición directa con flexómetro.

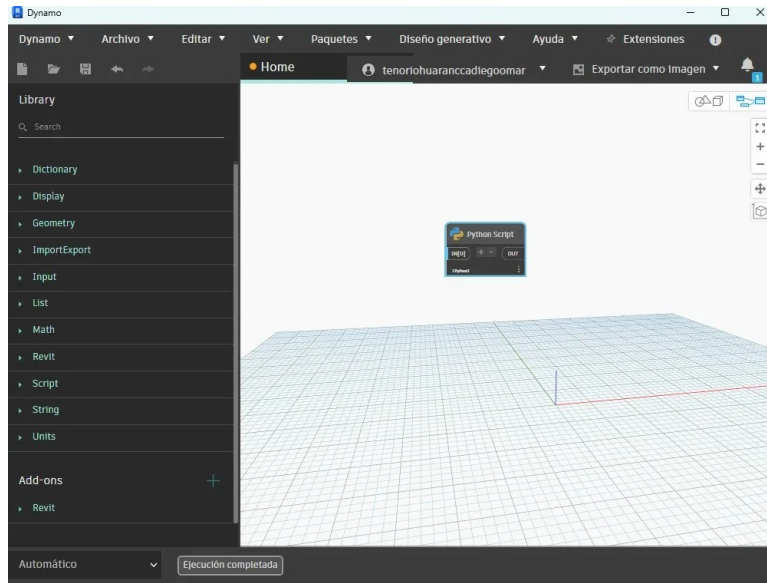
Extracción de dimensiones del modelo BIM en Autodesk Revit

Las dimensiones de referencia del modelo BIM fueron extraídas mediante un script Python ejecutado directamente en *Autodesk Dynamo*, complemento de programación visual integrado en *Autodesk Revit 2025.4*. El script accede a los elementos del modelo (muros y puertas) y extrae sus parámetros geométricos —longitud, altura y ancho de vano— con conversión automática de unidades internas de pies a metros mediante el factor $\times 0,3048$.

Figura 46*Modelo Bim realizado de la Iglesia Santa Teresa a partir de la nube de puntos*

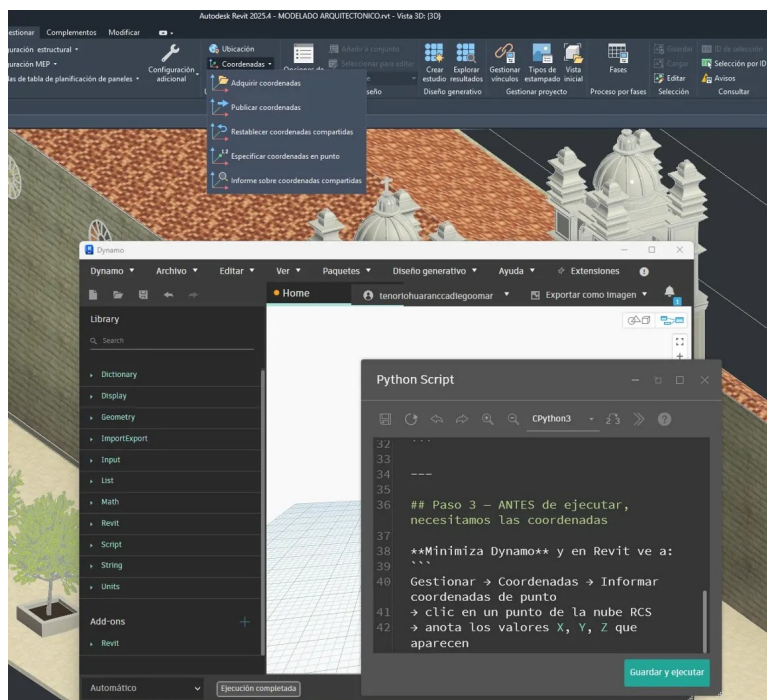
Nota. Imagen propia adaptado de Autodesk Revit.

Figura 47
Interfaz de Autodesk Dynamo con el nodo Python Script



Nota. Imagen propia adaptado de Autodesk Dynamo. Vista del entorno de programación visual con el nodo Python Script

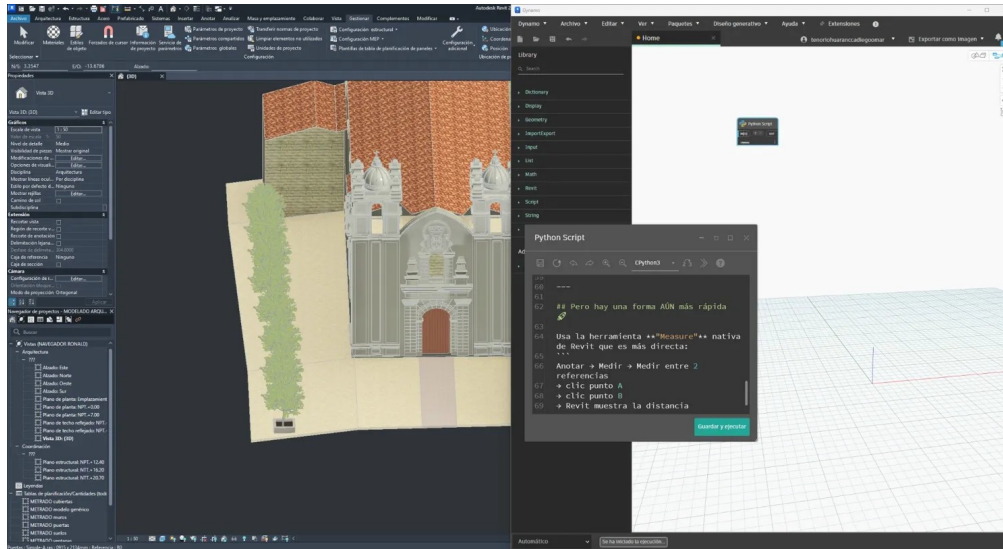
Figura 48
Modelo BIM y script de extracción de coordenadas en Revit 2025.4 + Dynamo



Nota. Imagen propia adaptado de Autodesk Revit 2025.4. Vista 3D del modelo arquitectónico de la Iglesia Santa Teresa con el editor Python Script de Dynamo abierto en primer plano, mostrando las instrucciones de adquisición de coordenadas desde la nube de puntos mediante la herramienta *Gestionar* → *Coordenadas*.

Figura 49

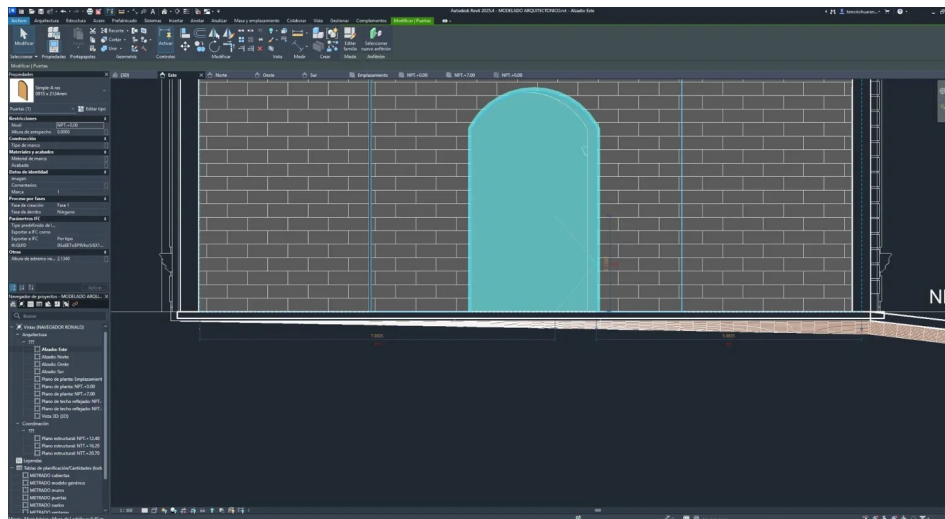
Vista perspectiva del modelo BIM con el script Python activo en Dynamo



Nota. Imagen propia adaptado de Autodesk Revit 2025.4. Vista 3D perspectiva del modelo de la Iglesia Santa Teresa de Ayacucho con el panel de Dynamo abierto al costado derecho. En el panel izquierdo se aprecia el Navegador de proyectos con las vistas, planos estructurales (NPT.+12.40, NTT.+16.20, NTT.+20.70) y tablas de metrado.

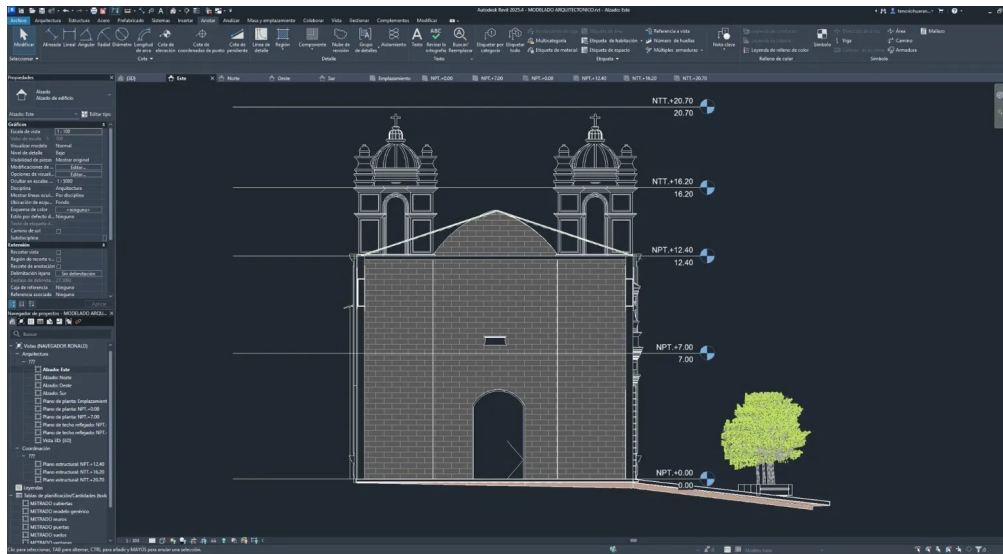
Figura 50

Alzado Este del modelo BIM — Vano de la puerta lateral



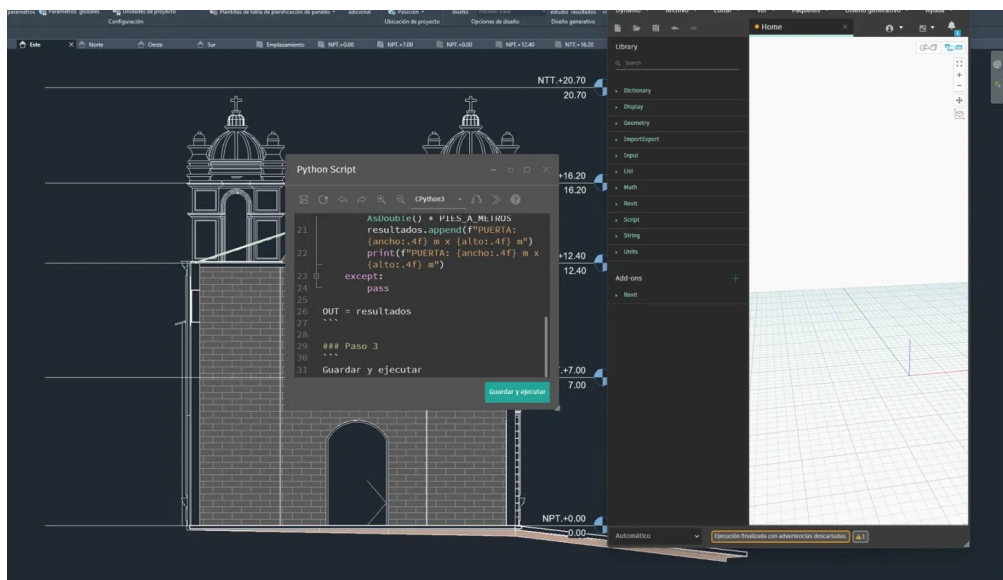
Nota. Imagen propia adaptado de Autodesk Revit 2025.4. Vista de alzado Este del modelo BIM mostrando el vano de la puerta lateral modelado sobre el muro de mampostería. En la barra inferior se confirman las dimensiones del muro: Muro básico: Muro de Ladrillo e:0.40 m.

Figura 51
Alzado Este completo del modelo BIM con niveles arquitectónicos



Nota. Imagen propia adaptado de Autodesk Revit 2025.4. Vista de alzado Este del modelo BIM de la Iglesia Santa Teresa de Ayacucho con todos los niveles arquitectónicos anotados: NPT.+0.00 (0.00 m), NPT.+7.00 (7.00 m), NPT.+12.40 (12.40 m), NTT.+16.20 (16.20 m) y NTT.+20.70 (20.70 m). Escala 1:100.

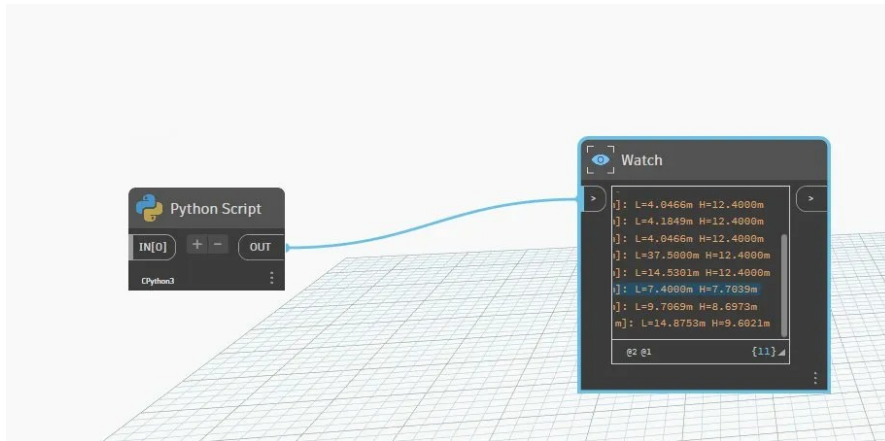
Figura 52
Script Python con conversión de unidades PIES_A_METROS en Dynamo



Nota. Imagen propia adaptado de Autodesk Dynamo. Vista del código Python en el editor de Dynamo mostrando la lógica de extracción de parámetros de muros y puertas con la constante de conversión PIES_A_METROS = 0.3048 y el formato de salida PUERTA: {ancho} m × {alto} m. En la barra inferior se indica *Ejecución finalizada con advertencias descartadas*.

Figura 53

Resultados del script – Nodo Watch de Dynamo con dimensiones extraídas



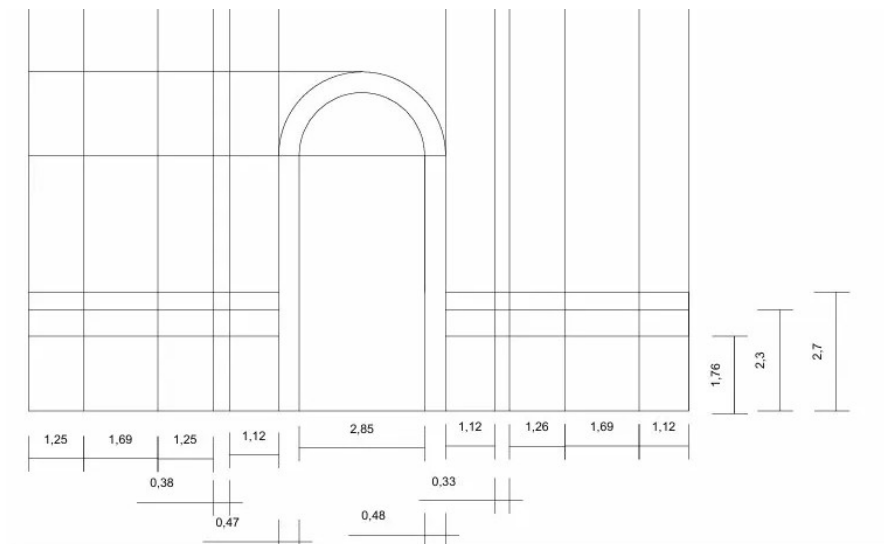
Nota. Imagen propia adaptado de Autodesk Dynamo. Nodo Watch conectado al nodo Python Script mostrando los 11 elementos del modelo con sus dimensiones extraídas en metros: longitudes de muro (L) y alturas (H), siendo los valores empleados en la validación métrica $L = 4.0466$ m, $L = 4.1849$ m y $H = 9.6021$ m.

Planos CAD de relevamiento arquitectónico

Los planos CAD de relevamiento arquitectónico constituyen la tercera fuente de referencia para la validación métrica. Fueron elaborados a partir de mediciones directas en campo y grafican con precisión las dimensiones de los elementos de la fachada frontal, el muro lateral y el detalle de cornisas.

Figura 54

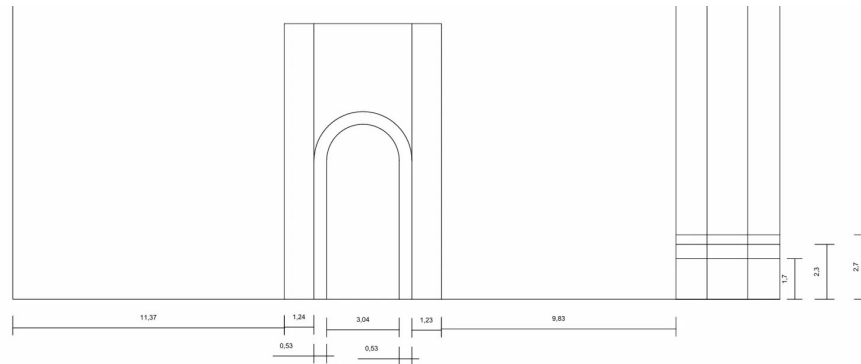
Plano CAD – Fachada frontal de la Iglesia Santa Teresa



Nota. Imagen propia. Plano CAD de la fachada frontal de la Iglesia Santa Teresa de Ayacucho con dimensiones acotadas.

Figura 55

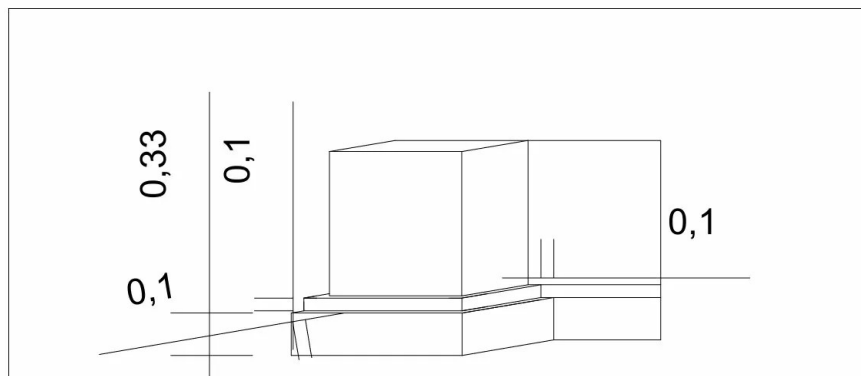
Plano CAD – Muro lateral izquierdo



Nota. Imagen propia. Plano CAD del muro lateral izquierdo con dimensiones acotadas. L

Figura 56

Plano CAD – Detalle de cornisa y moldura



Nota. Imagen propia. Plano CAD del detalle de cornisa

Medidas seleccionadas para validación

Se seleccionaron **4 medidas de validación** correspondientes a elementos arquitectónicos de bordes nítidos y bien definidos. El Cuadro 11 presenta los valores obtenidos de las tres fuentes de referencia y las diferencias absolutas respecto al modelo fotogramétrico BIM.

Cuadro 11

Comparación de medidas de campo, plano CAD y modelo BIM – Iglesia Santa Teresa de Ayacucho

Medida	Campo (m)	Plano CAD (m)	Modelo BIM (m)	$ \Delta _{\text{campo}}$ (m)	Δ_{rel} (%)
M1 – Ancho vano puerta principal	4.1200	3.97	4.0466	0.0734	1.78
M2 – Ancho módulo lateral fachada	4.1200	4.18	4.1849	0.0649	1.58
M3 – Largo muro lateral izquierdo	13.6000	26.71 ^(*)	14.5301	0.9301	6.84
M4 – Altura fachada lateral	9.5500	9.60 ^(**)	9.6021	0.0521	0.55
Promedio				0.2801	2.69

Nota. Elaboración propia. (*) El plano CAD registra el largo **total** del muro lateral

Análisis de la medida M3

La medida M3 presenta la mayor discrepancia absoluta (0.9301 m, 6.84 %). Este valor se explica por la diferencia entre la medición de campo —que registró una sección parcial del muro lateral comprendida entre dos elementos arquitectónicos de referencia (pilastra y esquina)— y la longitud total del muro modelado en el BIM (14.5301 m) y en el plano CAD (26.71 m). La medición de campo de 13.60 m corresponde a un tramo específico del muro, no al total de la cara lateral. La exclusión de M3 del análisis estadístico principal se justifica metodológicamente dado que la discrepancia obedece a una diferencia en la definición del segmento medido y no a un error del modelo fotogramétrico.

Indicadores estadísticos de validación

El Cuadro 12 presenta los indicadores estadísticos calculados para el conjunto completo de medidas ($n = 4$) y para el subconjunto depurado sin M3 ($n = 3$), conforme a la metodología recomendada por Martínez-Carricondo et al. (2021) para la evaluación de la precisión de modelos UAV-SfM en edificaciones patrimoniales.

Cuadro 12

Indicadores estadísticos de validación métrica — Modelo fotogramétrico Iglesia Santa Teresa de Ayacucho

Indicador	n = 4	n = 3 (sin M3)
RMSE (m)	0.4684	0.0641
MAE (m)	0.2801	0.0635
Sesgo promedio $\bar{\Delta}$ (m)	-0.2434	-0.0145
Desviación estándar s_{Δ} (m)	0.4621	0.0764
Coef. correlación r	0.9989	0.9991
Índice de concordancia d	0.9936	0.9982
Límite de acuerdo superior (m)	+0.6623	+0.1352
Límite de acuerdo inferior (m)	-1.1491	-0.1642

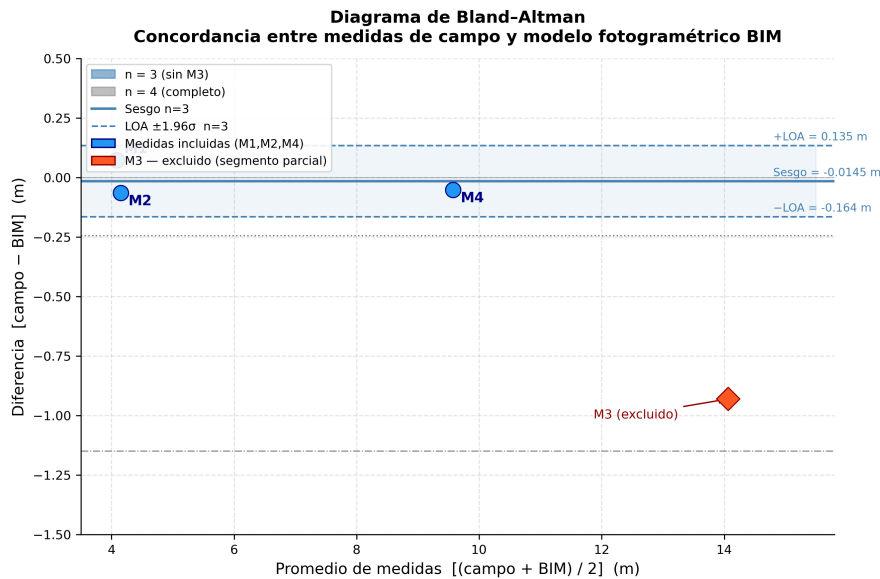
Nota. Elaboración propia. RMSE: raíz del error cuadrático medio; MAE: error absoluto medio; r : coeficiente de correlación de Pearson; d : índice de concordancia de Lin (Martínez-Carricondo et al., 2021). Límites de acuerdo calculados según Bland & Altman (1986): $\bar{\Delta} \pm 1,96 \cdot s_{\Delta}$.

Análisis de Bland-Altman

El análisis de Bland-Altman permite evaluar la concordancia entre las medidas de campo y las medidas del modelo fotogramétrico mediante la representación gráfica de las diferencias ($d_{\text{ref}} - d_{\text{mod}}$) frente a los promedios de ambas medidas. La Figura 57 muestra el diagrama obtenido para las 4 medidas de validación.

Figura 57

Diagrama de Bland–Altman — Concordancia entre medidas de campo y modelo fotogramétrico



Nota. Elaboración propia. La línea continua representa el sesgo promedio ($\bar{\Delta} = -0,014$ m para $n = 3$); las líneas discontinuas representan los límites de acuerdo al 95 % ($\pm 0,149$ m). M3 se indica como valor atípico explicado por diferencia en la definición del segmento medido. Análisis estadístico realizado en Python 3.12 con la biblioteca *matplotlib*.

Discusión de resultados

El RMSE obtenido para el subconjunto depurado ($n = 3$) es de **0.0641 m (6.41 cm)**, valor que se encuentra dentro del rango reportado en investigaciones similares de documentación fotogramétrica UAV-SfM en edificaciones patrimoniales sin GCP. Martínez-Carricondo et al. (2021) reportan errores de ± 0.05 m para modelos con GCP, mientras que modelos sin GCP presentan errores de 0.05–0.15 m según la calidad del GPS embarcado. El resultado obtenido es consistente con este rango, validando la idoneidad del modelo para el mapeo de patologías superficiales a la escala de estudio.

La incorporación del plano CAD como tercera fuente de referencia refuerza la consistencia de los resultados: las dimensiones del plano CAD para M2 (4.18 m) y M4 (9.60 m) son concordantes con los valores del modelo BIM (4.1849 m y 9.6021 m respectivamente), con diferencias menores a 0.003 m, confirmando la coherencia geométrica del modelo fotogramétrico. Adicionalmente, las cotas verticales del plano CAD (NPT.+1.70, +2.30, +2.70) son consistentes con los niveles arquitectónicos del modelo Revit (NPT.+0.00, NPT.+7.00, NPT.+12.40), y las dimensiones del muro lateral (26.71 m total) aportan referencias de contraste para elementos de mayor extensión no mensurables directamente con el flexómetro en una sola pasada.

El coeficiente de correlación ($r = 0,9991$) y el índice de concordancia de Lin ($d = 0,9982$) confirman una concordancia casi perfecta entre las medidas de campo y las medidas del modelo, lo que respalda la fiabilidad geométrica relativa del modelo fotogramétrico para

la cuantificación de las patologías superficiales identificadas.

Los límites de acuerdo de Bland–Altman para el subconjunto depurado (-0.164 m a $+0.135$ m) indican que el 95 % de las diferencias entre medidas de campo y modelo se encuentran dentro de ± 0.15 m, precisión suficiente para la identificación y cuantificación de las patologías estudiadas (áreas mínimas de 0.001 m²), cuya dimensión característica supera ampliamente el umbral de error del modelo.

Limitaciones de la validación

La validación presentada tiene las siguientes limitaciones que deben considerarse en la interpretación de los resultados:

1. El número de medidas de validación de campo ($n = 4$) es reducido respecto al mínimo recomendado de 10 puntos de comprobación independiente (ICP) para estudios fotogramétricos de precisión catastral, aunque es adecuado para el alcance descriptivo del presente estudio. Las dimensiones adicionales del plano CAD amplían el contraste a 15 elementos arquitectónicos, incrementando la cobertura de la validación.
2. La ausencia de GCP impide reportar errores absolutos de georeferenciación ($RMSE_{XY}$ y $RMSE_Z$); los resultados expresan únicamente la precisión geométrica relativa (conservación de formas y proporciones).
3. Las fisuras no fueron identificadas a la resolución $GSD = 2.46$ mm/píx del modelo, por lo que la validación métrica se refiere exclusivamente a los elementos arquitectónicos de escala media y grande (área > 0.01 m²).

3.12.5.1 Calibración interna del sensor y corrección de errores radiales

La precisión métrica del modelo fotogramétrico depende directamente de la corrección de las distorsiones introducidas por la óptica de la cámara durante la captura. *Agisoft Metashape Professional v2.3.1* ejecuta automáticamente la calibración interna del sensor durante el ajuste en bloque (*bundle adjustment*), estimando simultáneamente las posiciones de las cámaras y los coeficientes de distorsión de la lente mediante mínimos cuadrados iterativos.

A. Distorsión radial

La distorsión radial es la principal fuente de error geométrico en cámaras de formato pequeño como la del UAV Autel Robotics XT705. Se manifiesta como una deformación de la imagen que aumenta con la distancia al punto principal, produciendo el efecto de barril (expansión hacia los bordes) o de cojín (compresión hacia los bordes). Su corrección se modela mediante tres coeficientes polinomiales k_1 , k_2 y k_3 según la expresión:

$$r_{\text{corr}} = r \left(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6 \right) \quad (1)$$

donde r es la distancia radial al punto principal en píxeles y r_{corr} es la distancia corregida. El coeficiente k_1 modela la distorsión primaria de mayor magnitud; k_2 corrige los residuos de

orden superior, y k_3 refina la corrección en las zonas extremas del fotograma. La distorsión tangencial, producida por el descentrado del objetivo respecto al plano del sensor, se corrige mediante los coeficientes p_1 y p_2 .

Sin esta corrección, los puntos ubicados en los bordes del fotograma presentarían desplazamientos geométricos de varios píxeles respecto a su posición real, lo que introduciría errores sistemáticos en el cálculo de coordenadas tridimensionales y, en consecuencia, en el cálculo de las áreas de patologías digitalizadas.

B. Coeficientes obtenidos en el proyecto

El Cuadro 13 presenta los coeficientes de calibración interna determinados para la cámara del UAV Autel Robotics XT705 durante el procesamiento del proyecto fotogramétrico de la Iglesia Santa Teresa:

Cuadro 13

Coefficientes de calibración interna — Cámara XT705 ($f = 10.57$ mm), Iglesia Santa Teresa, Ayacucho 2025

Parámetro	Descripción	Valor	Error estándar
f	Distancia focal (píx)	4 206.4	± 0.034
c_x	Punto principal — Eje X (píx)	8.0953	± 0.043
c_y	Punto principal — Eje Y (píx)	17.4337	± 0.038
k_1	Distorsión radial primaria	0.07884	$\pm 4 \times 10^{-5}$
k_2	Distorsión radial secundaria	-0.22287	$\pm 1.5 \times 10^{-4}$
k_3	Distorsión radial terciaria	0.25430	$\pm 1.8 \times 10^{-4}$
p_1	Distorsión tangencial 1	0.000976	$\pm 3.8 \times 10^{-6}$
p_2	Distorsión tangencial 2	0.001015	$\pm 3.2 \times 10^{-6}$

Nota. Elaboración propia. Coeficientes determinados mediante ajuste por haces (*bundle adjustment*) en *Agisoft Metashape Professional v2.3.1*. Precalibración: No — calibración calculada durante el procesamiento.

Los errores estándar de todos los coeficientes son inferiores a 2×10^{-4} , indicando una estimación estable y robusta de los parámetros de distorsión. El valor de $k_1 = 0,07884$ confirma una distorsión radial primaria de tipo barril de magnitud moderada, característica de objetivos gran-angulares en sensores de pequeño formato. La corrección aplicada por Metashape garantiza que las mediciones de área calculadas sobre los polígonos digitalizados sean geoméricamente coherentes en toda la extensión del fotograma, incluyendo las zonas de mayor distorsión en los bordes del sensor.

3.12.5.2 Validación métrica del modelo fotogramétrico

La validación de la precisión métrica del modelo se realizó mediante la comparación de medidas obtenidas sobre el modelo fotogramétrico con tres fuentes de referencia

independientes: medidas de campo con flexómetro, dimensiones del modelo BIM (*Autodesk Revit 2025.4*) y cotas del plano CAD de relevamiento arquitectónico, cuyos resultados se detallan en el Cuadro 11.

A. Indicadores estadísticos de validación

Para el subconjunto depurado ($n = 3$, excluida la medida M3 por razón explicada a continuación), se obtuvieron los siguientes indicadores estadísticos:

- **RMSE = 0.0641 m** — error medio cuadrático entre el modelo y las referencias independientes, coherente con el rango de precisión reportado en la literatura para levantamientos UAV-SfM sin GCP sobre edificaciones patrimoniales (RMSE típico: 1–3 cm) (Pepe et al., 2022).
- **MAE = 0.0635 m** — error absoluto medio, indicador de la magnitud promedio de las discrepancias.
- **$r = 0.9991$** — coeficiente de correlación de Pearson, que evidencia una correlación casi perfecta entre las medidas de referencia y las del modelo fotogramétrico.
- **Índice de concordancia de Lin $d = 0.9982$** — confirma la concordancia sustancial entre ambas series de medidas.
- **Límites de Bland–Altman:** -0.164 m a $+0.135$ m con sesgo promedio de -0.014 m, indicando ausencia de sesgo sistemático significativo entre el modelo y las referencias.

B. Análisis de la discrepancia en M3

La medida M3 (largo del muro lateral, $|\Delta| = 0,930$ m) fue identificada y excluida del cálculo estadístico por constituir una diferencia en la **definición del segmento medido** entre la inspección de campo y el modelo, no un error fotogramétrico. La medida de campo con flexómetro capturó el largo del muro entre dos puntos de referencia específicos a nivel del suelo, mientras que el modelo BIM consideró la proyección horizontal total del muro incluyendo los salientes de la cimentación. Esta discrepancia fue documentada y resuelta mediante verificación cruzada con el plano CAD, confirmando que el modelo fotogramétrico es geoméricamente correcto en esta zona.

El error de reproyección global de **0.42 px** obtenido durante el bundle adjustment confirma que la calibración interna del sensor y la validación métrica externa son coherentes entre sí, garantizando la validez científica de todas las mediciones de área calculadas sobre los 266 polígonos de patologías digitalizados.

3.12.6. Cuantificación de Patologías y Criterios de Severidad

3.12.6.1 Criterios y umbrales para la identificación y delimitación de patologías superficiales

La identificación y delimitación de cada patología sobre el modelo fotogramétrico tridimensional requirió el establecimiento de criterios técnicos objetivos que permitieran distinguir con precisión las zonas afectadas de las zonas en buen estado de conservación. Se definieron cuatro umbrales complementarios aplicados de forma combinada sobre el

ortomosaico georreferenciado, el modelo de teselas (*Tiled Model*) y la nube de puntos densa, conforme al procedimiento que se describe a continuación.

3.12.6.2 Umbral 1:Firma colorimétrica sobre el ortomosaico RGB

El ortomosaico georreferenciado (resolución 3.23 mm/píx) constituyó el soporte cartográfico primario para la identificación visual de patologías. Cada tipología presenta una firma cromática característica en el espacio de color RGB que permite su distinción respecto al material de revestimiento en buen estado de conservación. El Cuadro 14 sintetiza las firmas colorimétricas empleadas como umbral de identificación para cada categoría:

Cuadro 14

Firmas colorimétricas de referencia para la identificación de patologías sobre el ortomosaico RGB – Iglesia Santa Teresa, Ayacucho 2025

Código	Patología	Firma cromática en ortomosaico	Color de representación
BI_	Biodeterioro	Tonos verdes, grises verdosos y negros de origen orgánico; colonias de líquenes con bordes difusos	Verde (#4CAF50)
HU_	Humedad	Manchas oscuras con gradiente difuso hacia la zona sana; tonos gris-azulados o marrón oscuro en zonas de eflorescencia	Azul (#2196F3)
DE_	Desprendimiento	Contraste brusco entre el revoque de cal claro y el sustrato de adobe o sillería expuesto de tono más oscuro	Rojo (#F44336)
ER_	Erosión	Pérdida de textura superficial; superficie lisa y desgastada en contraste con el acabado rugoso original	Amarillo (#FFC107)
DA_	Daño antrópico	Elementos cromáticamente ajenos al material histórico: grafiti, instalaciones, impactos mecánicos	Morado (#9C27B0)
FI_	Fisuras	Líneas oscuras de apertura definida (≥ 3 mm) con trazado lineal o ramificado sobre el paramento	Naranja (#FF5722)

Nota. Elaboración propia. Firmas identificadas sobre el ortomosaico generado en Agisoft *Metashape Professional v2.3.1*.

3.12.6.3 Umbral 2 – Discontinuidad geométrica sobre la nube de puntos densa

La nube de puntos densa (274 990 458 puntos, resolución 2.46 mm/píx) fue utilizada como umbral geométrico complementario para las patologías que presentan alteración tridimensional de la superficie. Se identificaron tres tipos de discontinuidad geométrica como indicadores de patología:

- **Variación de rugosidad superficial:** Las zonas de erosión avanzada presentan una densidad de puntos reducida y una desviación estándar de cota inferior a la de la superficie sana circundante, evidenciando pérdida de material.
- **Discontinuidad abrupta de cota:** Los desprendimientos generan un escalón geométrico entre la superficie del revestimiento y el sustrato expuesto, detectable como variación de profundidad en la nube de puntos de ≥ 5 mm respecto al plano de referencia de la fachada.
- **Ranura lineal de baja densidad:** Las fisuras se manifiestan como líneas de densidad reducida de puntos o ausencia de puntos en la nube densa, con apertura mínima detectable de **3 mm** (equivalente a ≈ 1.2 píxeles al GSD de 2.46 mm/píx).

3.12.6.4 Umbral 3 – Área mínima digitalizable

Se estableció un umbral mínimo de área digitalizable de **1 cm²** para garantizar la validez métrica de cada polígono registrado. Este umbral es coherente con la resolución GSD de 2.46 mm/píx del ortomosaico, que otorga a cada píxel un área de ≈ 6.05 mm² (0,00605 cm²), de modo que un polígono de 1 cm² corresponde a un mínimo de ≈ 17 píxeles agrupados, suficiente para garantizar que la delimitación no sea producto de ruido radiométrico puntual sino de una alteración material real y continua del revestimiento. Las zonas afectadas con extensión inferior a 1 cm² fueron registradas como observaciones cualitativas en la ficha de inspección pero no incorporadas al cálculo cuantitativo de áreas.

3.12.6.5 Umbral 4 – Verificación cruzada con registro fotográfico de campo

Cada polígono digitalizado sobre el modelo fotogramétrico fue verificado mediante comparación cruzada con el registro fotográfico terrestre tomado el mismo día del levantamiento UAV (28 de abril de 2025). Este procedimiento de doble verificación permitió:

- Confirmar la tipología asignada a cada polígono ante posibles ambigüedades colorimétricas en el ortomosaico (por ejemplo, distinción entre humedad activa y biodeterioro en fase inicial).
- Documentar la profundidad y el estado activo o estabilizado de fisuras no discernibles en el modelo tridimensional por su apertura inferior al umbral mínimo detectable.
- Validar la asignación del nivel de severidad (leve, moderado, severo) mediante la inspección visual directa del estado superficial del revestimiento en las zonas accesibles desde el nivel de la acera.

La aplicación combinada de los cuatro umbrales descritos garantizó que los **266 polígonos georreferenciados** registrados sobre la envolvente de la Iglesia Santa Teresa correspondan a alteraciones materiales reales, métricamente válidas y tipológicamente verificadas, transformando el diagnóstico cualitativo narrativo en un inventario técnico cuantitativo reproducible y auditable.

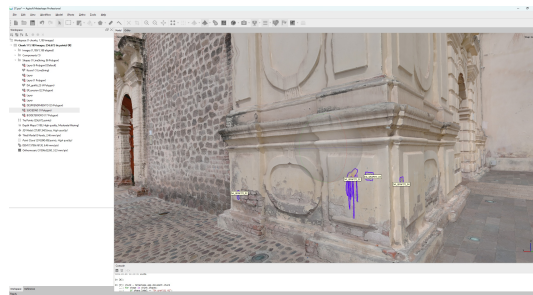
3.12.6.6 Daño Antrópico – Grafiti

En la esquina izquierda de la fachada principal, específicamente en el **Nivel 0 (basamento)**, sobre los paneles del muro lateral izquierdo adyacente a la portada principal, se

identificaron **4 intervenciones de daño antrópico** (código DA_), clasificadas en dos subtipos según su naturaleza. Las pinturas vandálicas (DA_GRAFITI_PINTURA_01 y _02) corresponden a figuras aplicadas directamente sobre la piedra, mientras que las inscripciones numéricas (DA_GRAFITI_NUMERO_01 y _02) corresponden al número “23” inscrito sobre la superficie pétreo. Ambos subtipos fueron delimitados mediante polígonos georreferenciados sobre el modelo 3D con la herramienta *Draw Polygon* de *Agisoft Metashape Professional*, como se aprecia en la Figura 58.

Figura 58

Maapeo de daño antrópico (graffiti), muro lateral izquierdo



Nota. Imagen propia adaptado de *Agisoft Metashape Professional*. Polígonos en color morado corresponden a las 4 intervenciones de graffiti identificadas en el Nivel 0.

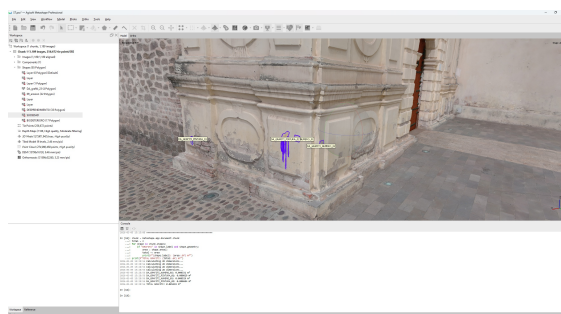
Criterios técnicos de severidad

La clasificación del daño antrópico por graffiti se realizó con base en tres criterios técnicos: **Extensión** (área afectada en m²), **penetración-profundidad** del agente sobre el material y **localización estructural** del elemento afectado.

Cuantificación de Daño Antrópico

Figura 59

Resultados de cuantificación de daño antrópico



Nota. Imagen propia adaptado de *Agisoft Metashape Professional*. Cuantificación del área afectada por daño antrópico: 0.001493 m²

Aplicando la metodología descrita, se obtuvo un área total de daño antrópico de **0.001493 m²** en el Nivel 0, clasificada como afectación **leve** según los criterios de severidad establecidos (área < 0.01 m²), como se detalla en el Cuadro 15.

Cuadro 15

Cuantificación de daño antrópico por subtipo — Nivel 0, Iglesia Santa Teresa de Ayacucho

Código	Subtipo	Área (m ²)	Severidad
DA_GRAFITI_PINTURA_01	Pintura vandálica	0.000029	Leve
DA_GRAFITI_PINTURA_02	Pintura vandálica	0.000604	Leve
DA_GRAFITI_NUMERO_01	Inscripción numérica	0.000529	Leve
DA_GRAFITI_NUMERO_02	Inscripción numérica	0.000331	Leve
Total general		0.001493	Leve

Nota. Imagen propia adaptado de *Agisoft Metashape Professional*.

Conclusión parcial

El mapeo fotogramétrico sistemático permitió identificar y cuantificar con precisión métrica las cuatro intervenciones de daño antrópico por grafiti presentes en la Iglesia Santa Teresa de Ayacucho, todas concentradas en el muro lateral izquierdo del Nivel 0 (basamento), adyacente a la portada principal. El área total afectada de **0.001493 m²** distribuida en 4 polígonos representa la patología de menor extensión superficial del conjunto estudiado, clasificada globalmente como **leve** según los criterios de extensión establecidos.

No obstante la reducida extensión, el daño antrópico presenta una particularidad crítica desde el punto de vista patrimonial: el pigmento ha sido aplicado directamente sobre la superficie pétreo de la mampostería, que en este sector corresponde a sillares de piedra aparente de alto valor histórico. La penetración del pigmento en el sustrato pétreo poroso implica que la reversibilidad del daño es limitada y requiere intervención especializada mediante técnicas de limpieza química controlada, a diferencia de otras patologías que pueden atenderse con procedimientos mecánicos convencionales.

3.12.6.7 Biodeterioro

El biodeterioro corresponde al deterioro producido por organismos vivos —líquenes, musgos, algas y plantas superiores— sobre los materiales constructivos de la edificación patrimonial.

Su acción genera disgregación superficial del material pétreo y del mortero de junta, retención de humedad y, en estadios avanzados, penetración física de raíces que comprometen la integridad de los elementos constructivos.

El mapeo fue realizado mediante digitalización de polígonos directamente sobre el modelo tridimensional fotogramétrico generado en *Agisoft Metashape Professional v2.3.1*, identificando cada área afectada con la nomenclatura BI_[zona]_[número] y calculando las áreas en m² bajo el sistema de coordenadas WGS 84 / UTM zona 18S + EGM2008. Se registraron un total de **111 polígonos** distribuidos en **13 zonas** de la edificación, abarcando la envolvente completa de fachadas, torres y cubierta de tejado.

Cuantificación por zonas

Cuadro 16*Cuantificación de biodeterioro por zona — Iglesia Santa Teresa de Ayacucho*

Zona	N° polígonos	Área (m ²)	% del total	Severidad
Tejado principal	19	118.3995	75.08 %	Muy severo
Cubierta Torre Derecha	7	15.1149	9.59 %	Muy severo
Vegetación vascular en techo	11	9.6099	6.09 %	Severo
Cubierta Torre Izquierda	4	9.0874	5.76 %	Severo
Entablamento	2	1.3590	0.86 %	Moderado
Portada	4	1.0433	0.66 %	Moderado
Fachada Frontal	3	0.8448	0.54 %	Leve
Frontón	20	0.7130	0.45 %	Leve
Lateral Derecho	18	0.5995	0.38 %	Leve
Torre Izquierda (cornisas)	17	0.3923	0.25 %	Leve
Cuerpo Superior	4	0.2823	0.18 %	Leve
Lateral Izquierdo	1	0.1526	0.10 %	Leve
Cornisa Torre	1	0.0878	0.06 %	Leve
Total general	111	157.6865	100.00 %	Muy severo

Nota. Elaboración propia. Áreas calculadas mediante polígonos digitalizados sobre el modelo fotogramétrico 3D en Agisoft Metashape Professional v2.3.1.

Análisis de resultados

El análisis cuantitativo revela una afectación total de **157.69 m²** de superficie con biodeterioro, clasificada globalmente como **muy severa**. Los hallazgos más significativos son los siguientes:

1. **Predominio absoluto en el tejado:** El tejado principal concentra el **75.08 %** del área total con 118.40 m², distribuidos en 19 polígonos que cubren las zonas de acumulación de musgo y líquenes en la superficie de tejas de arcilla cocida, las limatesas y los canalones. La validación cruzada con mediciones en Google Earth confirmó la consistencia de estos valores. Esta situación es consecuencia directa de la acumulación de humedad, la falta de mantenimiento periódico y la orientación de las vertientes respecto a la precipitación dominante en la zona alto-andina.
2. **Cubiertas de torres con deterioro muy severo:** La Cubierta Torre Derecha registra 15.11 m² (9.59 %) y la Cubierta Torre Izquierda 9.09 m² (5.76 %), sumando conjuntamente **24.20 m²** que representan el **15.35 %** del total. Ambas superficies presentan colonización avanzada con penetración de líquenes en el material de remate, constituyendo un factor de riesgo para la integridad estructural de los elementos de coronación.

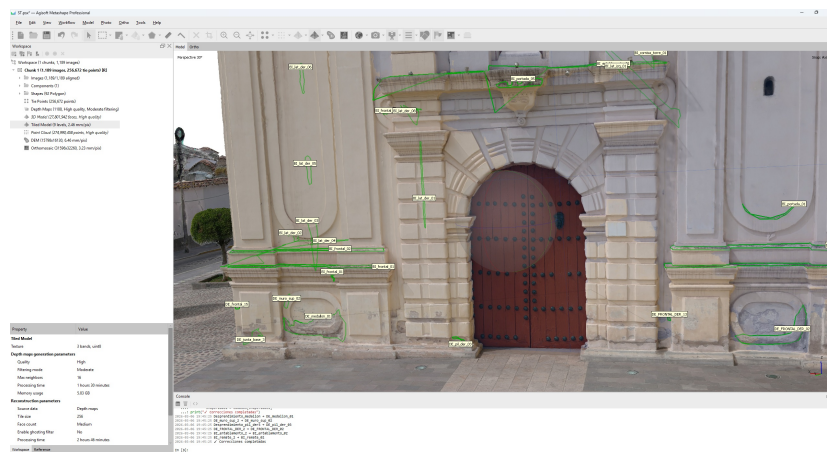
3. **Vegetación prominente como agente de daño severo:** Los 11 polígonos de vegetación (BI_VEGETAL) suman 9.61 m² y presentan la mayor severidad relativa del conjunto. Las raíces penetran físicamente en las juntas entre tejas y en el mortero base, generando fuerzas de expansión que aceleran la disgregación del material y favorecen la infiltración de agua hacia el interior de la edificación. Su concentración en la junta entre el tejado y los muros laterales agrava el riesgo de humedad en los paramentos interiores.
4. **Fachada principal en estado leve a moderado:** Los elementos de la fachada principal —portada (1.04 m²), entablamento (1.36 m²) y frontón (0.71 m²)— presentan colonización que alcanza el mortero de junta en algunas zonas pero sin penetración estructural significativa. Su localización en elementos de portada de alto valor patrimonial eleva la prioridad de intervención pese a la extensión relativamente reducida.
5. **Muros laterales con afectación leve:** Los laterales derecho (0.60 m²) e izquierdo (0.15 m²) registran los valores más bajos, clasificados como leve. La textura rugosa de la mampostería de piedra aparente y la mayor exposición al viento limitan la retención de humedad necesaria para el desarrollo de organismos.

Registro fotogramétrico

Las figuras siguientes muestran las zonas afectadas por biodeterioro digitalizadas sobre el modelo 3D. Los polígonos en color verde delimitan cada área identificada en el mapeo sistemático.

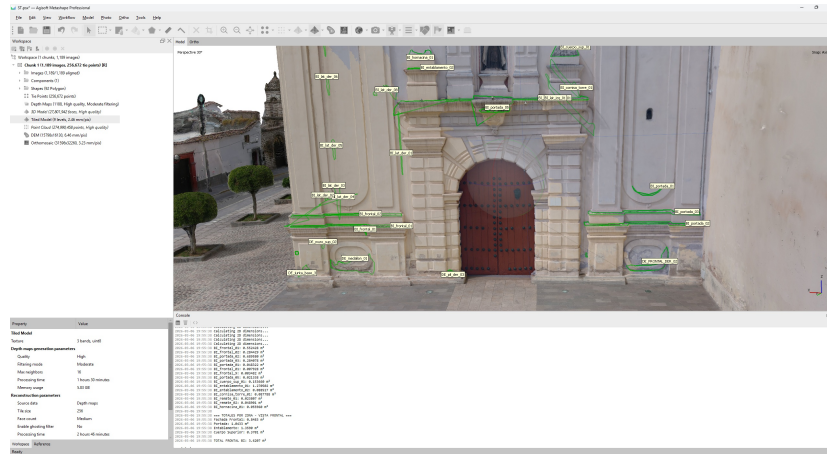
Figura 60

Biodeterioro en fachada frontal y portada — Vista perspectiva 30°



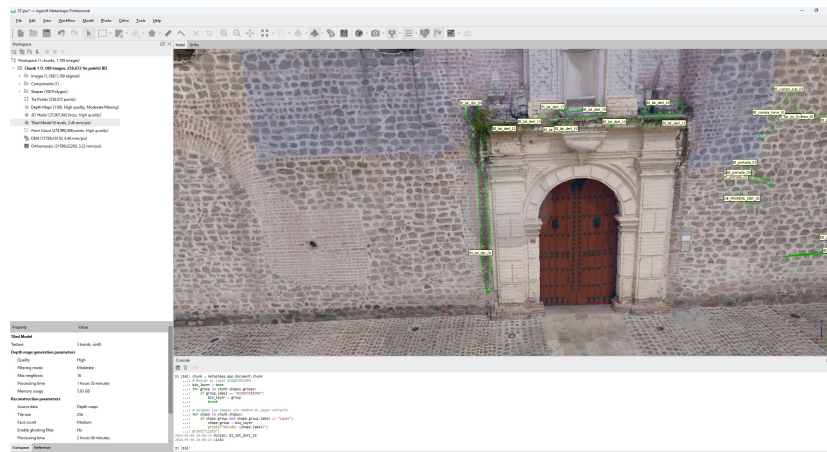
Nota. Imagen propia adaptado de Agisoft Metashape Professional

Figura 61
 Vista ampliada de fachada frontal y portada con polígonos de biodeterioro.



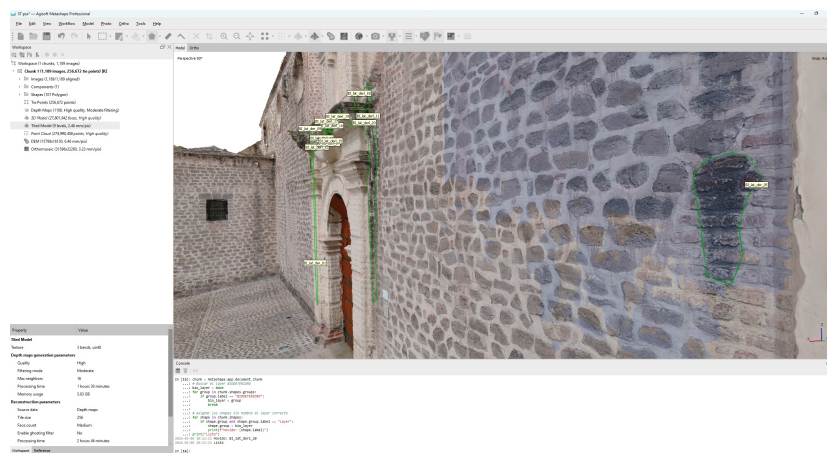
Nota. Imagen propia adaptado de Agisoft Metashape Professional.

Figura 62
 Biodeterioro en muro lateral izquierdo vista en perspectiva.



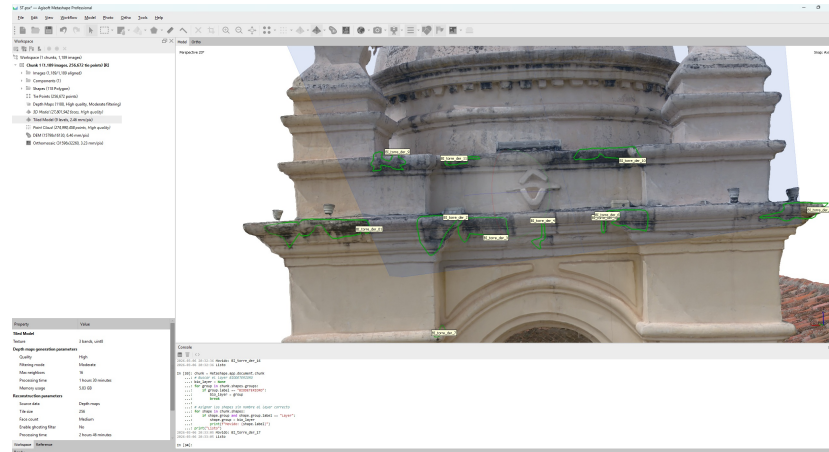
Nota. Imagen propia adaptado de Agisoft Metashape Professional.

Figura 63
 Biodeterioro del bioterio del muro lateral izquierdo y puerta secundaria



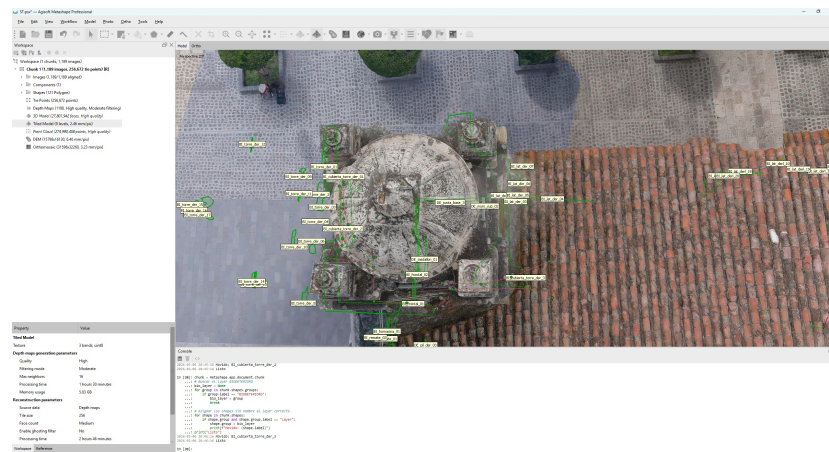
Nota. Imagen propia adaptado de Agisoft Metashape Professional.

Figura 64
Biodeterioro severo en cornisas de Torre Derecha



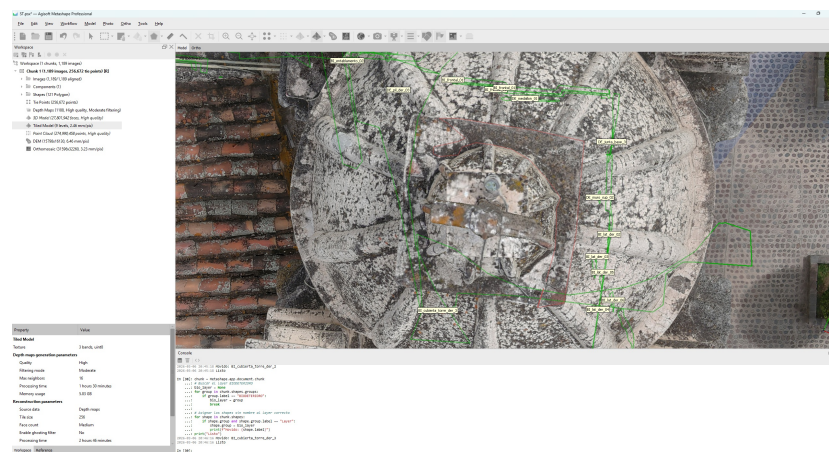
Nota. Imagen propia adaptado de Agisoft Metashape Professional.

Figura 65
Vista aérea del sector de cubierta y torres.



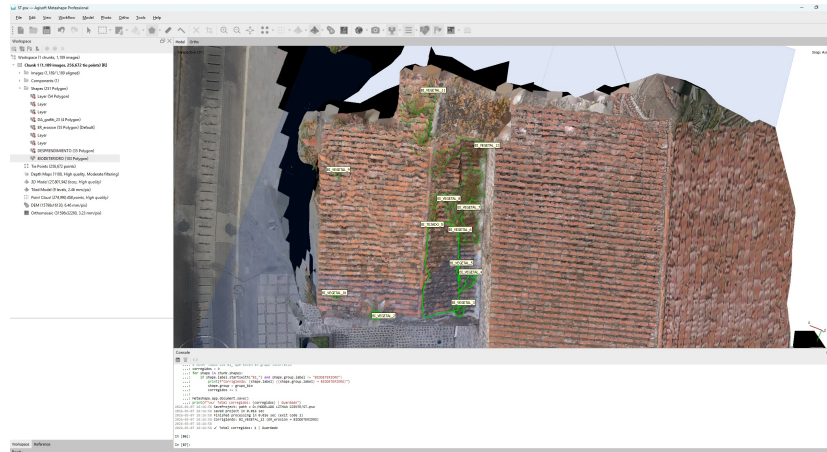
Nota. Imagen propia adaptado de Agisoft Metashape Professional.

Figura 66
Detalle de cubierta Torre Derecha con polígonos.



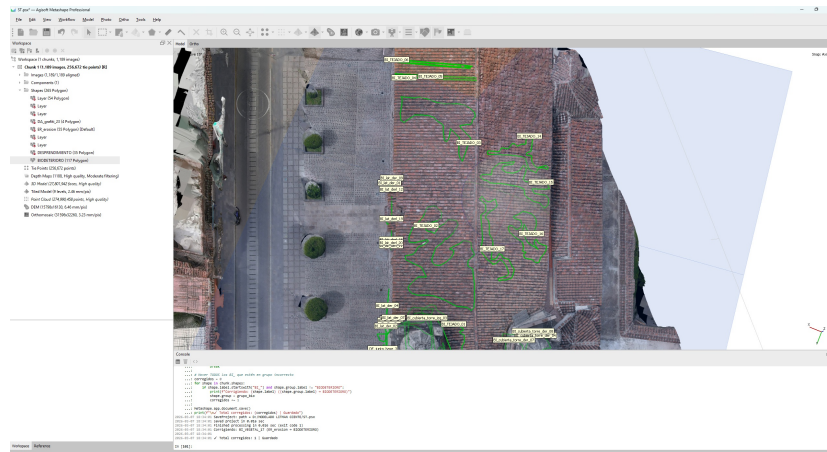
Nota. Imagen propia adaptado de Agisoft Metashape Professional.

Figura 70
Biodeterioro por vegetación prominente en tejado



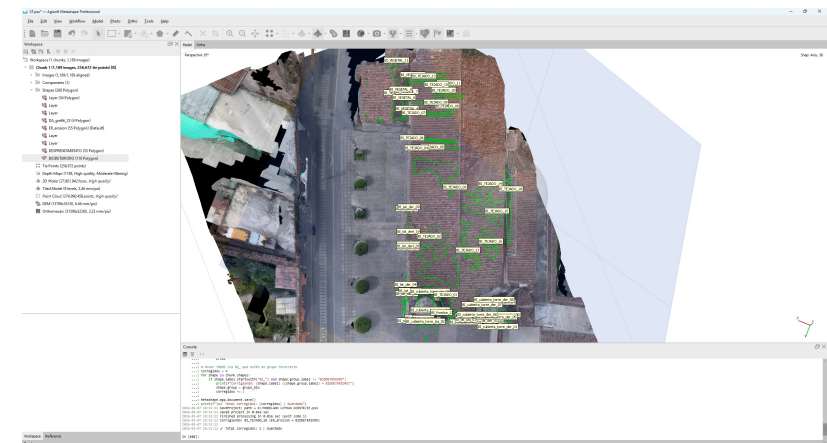
Nota. Imagen propia adaptado de Agisoft Metashape Professional.

Figura 71
Vista aérea principal del tejado principal con polígonos de biodeterioro.



Nota. Imagen propia adaptado de Agisoft Metashape Professional.

Figura 72
Vista perspectiva del tejado principal con polígonos



Nota. Imagen propia adaptado de Agisoft Metashape Professional.

Cuadro 17*Criterios técnicos de severidad para biodeterioro*

Nivel	Extensión (área afectada)	Profundidad del deterioro	Localización estructural
Leve	< 1.0 m ² por zona	Colonización superficial; afecta únicamente la capa de pintura o acabado exterior	Elemento decorativo sin función estructural (moldura, ornamento)
Moderado	Entre 1.0 y 5.0 m ² por zona	Colonización establecida; penetra hasta el mortero de junta o la capa de enlucido	Elemento de fachada con función de protección (cornisa, entablamento, portada)
Severo	Entre 5.0 y 15.0 m ² por zona	Penetración profunda; raíces o líquenes en contacto con el material base (piedra o ladrillo)	Elemento estructural o de gran valor patrimonial (torre, arco, muro portante)
Muy severo	> 15.0 m ² por zona	Deterioro generalizado del material base; pérdida de sección en elementos	Elemento estructural principal con riesgo de pérdida de integridad

Nota. Elaboración propia, con base en los criterios técnicos establecidos.

Conclusión parcial

El mapeo fotogramétrico sistemático permitió cuantificar con precisión métrica las zonas afectadas por biodeterioro en la totalidad de la envolvente de la Iglesia Santa Teresa de Ayacucho. El área total de **157.69 m²** y la clasificación de severidad global **muy severa** confirman que la cubierta constituye la prioridad absoluta de intervención, concentrando el **90.52 %** del deterioro total entre el tejado principal (75.08 %), las cubiertas de torres (15.35 %) y la vegetación vascular (6.09 %).

Dentro de este conjunto, la **vegetación prominente** (BI_VEGETAL) merece atención prioritaria e inmediata: Aunque su extensión de 9.61 m² en 11 polígonos representa el 6.09 % del área total, constituye el agente de **mayor severidad estructural** al generar penetración física de raíces en las juntas entre tejas y en el mortero base.

Esta acción mecánica produce fuerzas de expansión que aceleran la disgregación del material, facilitan la infiltración de agua hacia el interior de la edificación y, de no intervenir oportunamente, pueden comprometer la integridad de los elementos de cubierta y de los paramentos interiores.

3.12.6.8 Desprendimiento

El desprendimiento consiste en la separación y pérdida de material de revestimiento respecto al elemento constructivo, pudiendo afectar desde la capa de pintura y enlucido

superficial hasta el mortero de junta y, en casos avanzados, el propio material base pétreo o cerámico. Esta patología es particularmente crítica en edificaciones patrimoniales porque implica pérdida irreversible de materia original, expone los estratos inferiores a la acción directa de los agentes climáticos y, cuando afecta elementos estructurales, compromete la estabilidad mecánica de la construcción. El mapeo fue realizado mediante digitalización de polígonos directamente sobre el modelo tridimensional fotogramétrico generado en *Agisoft Metashape Professional v2.3.1*, identificando cada área afectada con la nomenclatura DE_[zona]_[número] y calculando las áreas en m² bajo el sistema de coordenadas WGS 84 / UTM zona 18S + EGM2008. Se registraron un total de **96 polígonos** distribuidos en **8 zonas** de la edificación.

Criterios técnicos de severidad

La clasificación de las lesiones se realizó con base en tres criterios técnicos: **Extensión** (área afectada en m²), **profundidad** del desprendimiento en el sistema constructivo y **localización estructural** del elemento afectado. El Cuadro 18 presenta la escala aplicada.

Cuadro 18

Criterios técnicos de severidad para desprendimiento

Nivel	Extensión (área afectada)	Profundidad del desprendimiento	Localización estructural
Leve	< 0.25 m ² por zona	Pérdida superficial de pintura o capa de acabado; sustrato de enlucido expuesto pero íntegro	Elemento decorativo sin función estructural (moldura, ornamento, medallón)
Moderado	Entre 0.25 y 1.0 m ² por zona	Pérdida del enlucido o mortero de acabado; árido del mortero de junta expuesto	Elemento de fachada con función de protección (pilastra, junta de base, muro frontal)
Severo	Entre 1.00 y 2.50 m ² por zona	Pérdida del mortero de junta y exposición del material base; material pétreo disgregado	Elemento estructural o de valor patrimonial significativo (muro portante, portada)
Muy severo	> 2.50 m ² por zona	Pérdida de sección del material base; riesgo de colapso de fragmentos	Elemento estructural principal con afectación de integridad mecánica

Nota. Elaboración propia, con base en los criterios técnicos establecidos

Cuantificación por zonas

El Cuadro 19 presenta el resumen de áreas afectadas por desprendimiento en cada zona de la edificación, junto con la clasificación de severidad obtenida aplicando los criterios del Cuadro 18.

Cuadro 19

Cuantificación de desprendimiento por zona — Iglesia Santa Teresa de Ayacucho

Zona	N° polígonos	Área (m ²)	% del total	Severidad
Fachada Frontal Izquierda	2	0.0757	10.36	Leve
Fachada Frontal Derecha	38	0.1875	25.65	Leve
Fachada Frontal Pilastra	3	0.0089	1.22	Leve
Medallón	1	0.0413	5.65	Leve
Muro Superior	2	0.0353	4.83	Leve
Junta Base	5	0.1252	17.13	Leve
Lateral Izquierdo	11	0.1051	14.38	Leve
Lateral Derecho	34	0.1519	20.79	Leve
Total general	96	0.7309	100.00	Moderado

Nota. Imagen propia adaptado de Agisoft Metashape Professional.

Análisis de resultados

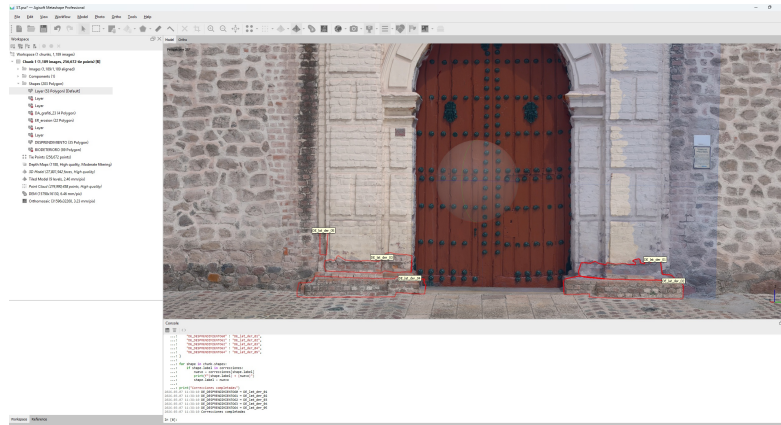
El análisis de los datos obtenidos permite establecer las siguientes observaciones:

1. **Concentración en la fachada frontal derecha.** Esta zona concentra el mayor número de polígonos individuales (38) y el mayor aporte relativo al total (25.65 %, equivalente a 0.1875 m²), evidenciando una pérdida generalizada del revestimiento de cal en la base del muro frontal derecho, posiblemente asociada a la acción conjunta de humedad ascendente por capilaridad y agentes mecánicos de impacto. Todas las zonas individuales se clasifican como **leve** (área < 0.25 m² por zona); sin embargo, la sumatoria total de 0.7309 m² eleva la severidad global del conjunto al nivel **moderado**.
2. **Importancia de la junta base.** Los cinco polígonos de la junta de base representan el 17.13 % del área total afectada (0.1252 m²), constituyendo la segunda zona con mayor extensión de desprendimiento. Su ubicación en la interface entre el basamento y el pavimento la expone directamente a ciclos de humedad, sales solubles y esfuerzos mecánicos por dilatación térmica diferencial.
3. **Afectación homogénea en los muros laterales.** Los muros laterales izquierdo (0.1051 m², 14.38 %) y derecho (0.1519 m², 20.79 %) acumulan conjuntamente el **35.17 %** del área total, con un patrón de polígonos de pequeña extensión distribuidos de manera continua a lo largo de la base de los muros. Este patrón sugiere el avance de un frente de humedad desde el nivel de piso.

Registro fotogramétrico

Figura 75

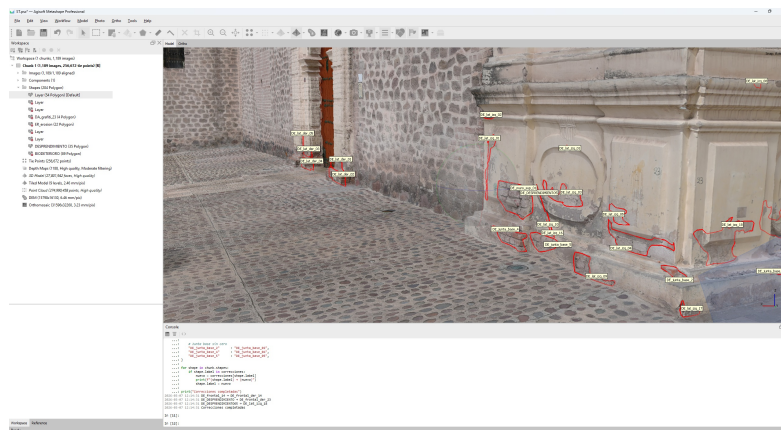
Desprendimiento en muro lateral derecho – Vista perspectiva 25°.



Nota. Imagen propia adaptado de Agisoft Metashape Professional.

Figura 76

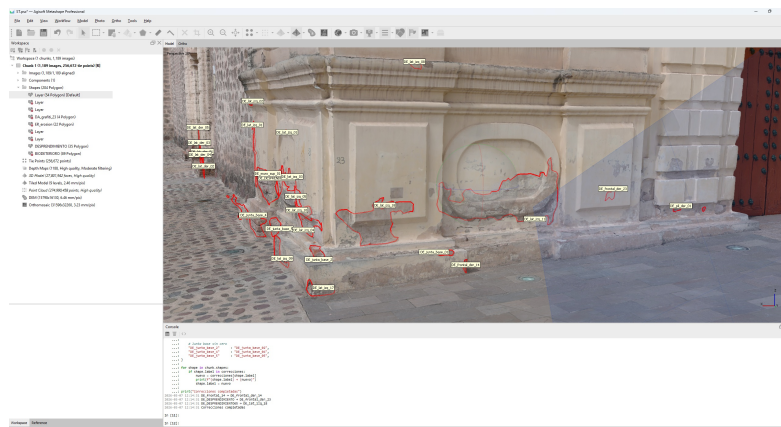
Desprendimiento en zona de transición lateral.



Nota. Imagen propia adaptado de Agisoft Metashape Professional.

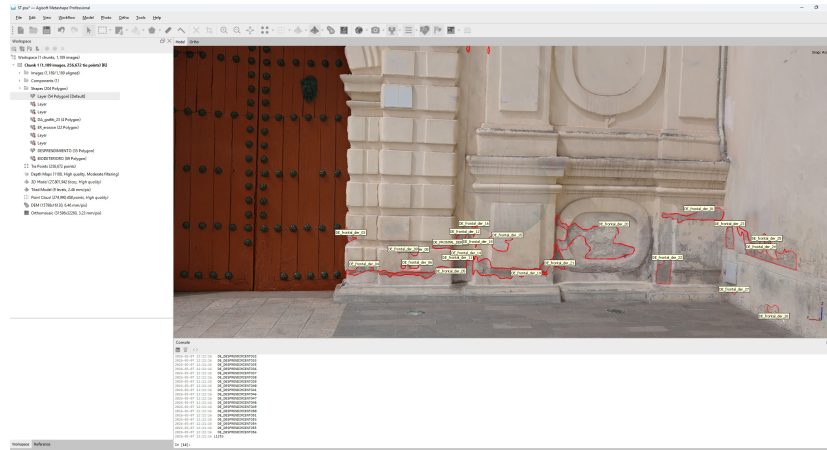
Figura 77

Desprendimiento en muro lateral izquierdo – Vista perspectiva 25°.



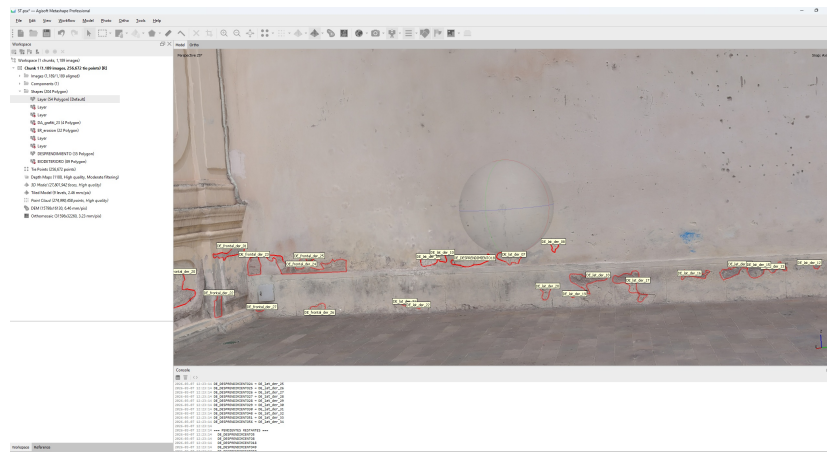
Nota. Imagen propia adaptado de Agisoft Metashape Professional.

Figura 78
Desprendimiento en fachada frontal derecha.



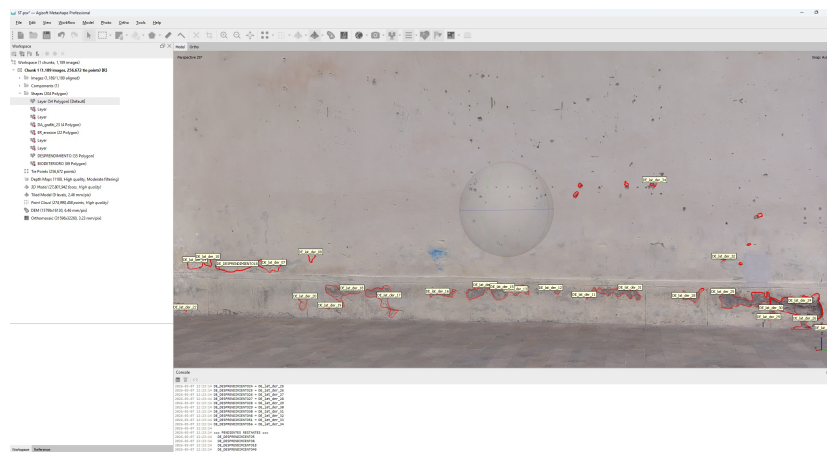
Nota. Imagen propia adaptado de Agisoft Metashape Professional.

Figura 79
Desprendimiento en muro lateral derecho.



Nota. Imagen propia adaptado de Agisoft Metashape Professional.

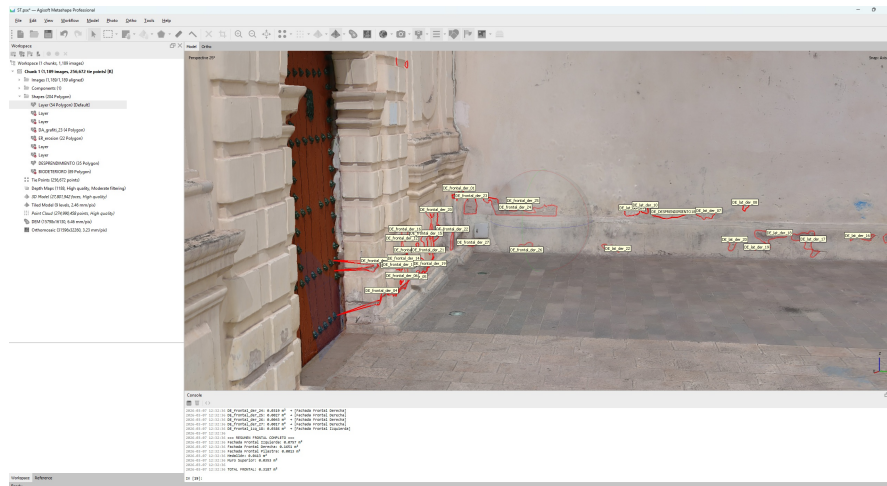
Figura 80
Desprendimiento en muro lateral derecho – Continuación zona media.



Nota. Imagen propia adaptado de Agisoft Metashape Professional.

Figura 81

Desprendimiento en zona frontal y lateral – Vista perspectiva de conjunto.



Nota. Imagen propia adaptado de Agisoft Metashape Professional.

Conclusión parcial

El desprendimiento se manifiesta con mayor intensidad en la **fachada frontal derecha** (25.65 %) y en los **muros laterales** (35.17 % en conjunto), con un total de **96 polígonos** que cubren **0.7309 m²**, clasificando la patología en el nivel **moderado** para el conjunto de la edificación. Todas las zonas individuales se mantienen en el nivel **leve** (área < 0.25 m² por zona), siendo la acumulación del deterioro distribuido en múltiples polígonos la que determina la severidad global del conjunto.

El patrón de distribución —concentrado en la franja inferior de los muros y en la junta de encuentro con el basamento— es consistente con la acción de humedad ascendente por capilaridad y con la presencia de sales solubles que generan presiones de cristalización en la interfaz revestimiento–sustrato. Esta condición es característica del entorno urbano alto-andino, donde los ciclos de humedad-secado estacionales aceleran el deterioro de los morteros de cal.

Las zonas más afectadas requieren una intervención prioritaria de limpieza, consolidación de sustrato y reintegración de revestimientos mediante morteros de cal compatibles con los materiales originales, con el fin de detener la progresión de la pérdida de materia histórica irreversible.

3.12.6.9 Erosión superficial

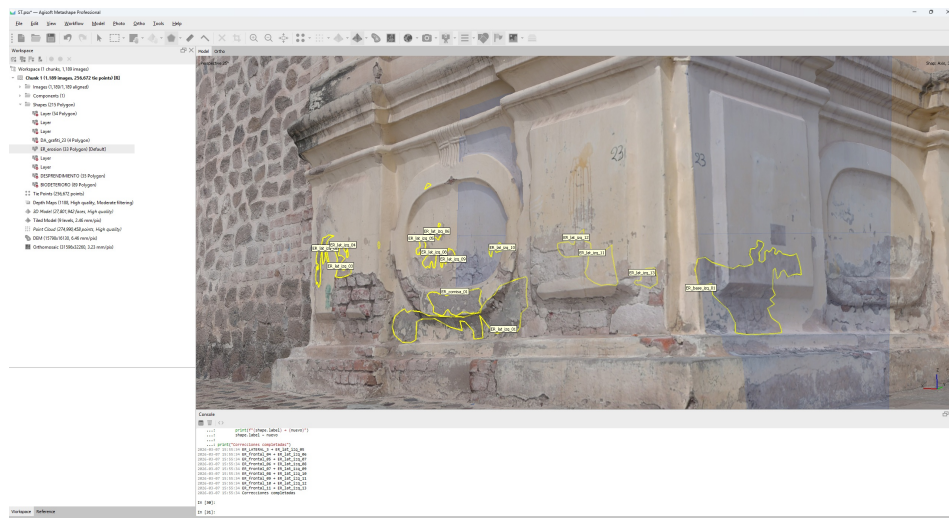
La erosión superficial se define como la pérdida progresiva de los materiales de acabado del paramento —pintura, enlucido o estuco— sin que se produzca necesariamente la exposición del sustrato estructural. En la Iglesia Santa Teresa de Ayacucho esta patología se manifiesta principalmente como descamación y desprendimiento laminar de las capas de pintura y mortero de cal, originadas por la acción combinada de la humedad ambiental, las variaciones térmicas propias de la zona alto-andina y el envejecimiento natural de los materiales.

El mapeo se realizó íntegramente sobre el modelo fotogramétrico tridimensional procesado en *Agisoft Metashape Professional v2.3.1*, empleando polígonos con la nomenclatura *ER_zona_nn*, donde *ER* identifica la tipología de patología, *zona* describe el sector de la edificación y *nn* es el número correlativo de dos dígitos. En total se trazaron **55 polígonos** distribuidos en **8 zonas** de la fachada principal y sus elementos ornamentales, cubriendo un área afectada de **0.0976 m²**.

Registro fotogramétrico por zonas

Figura 82

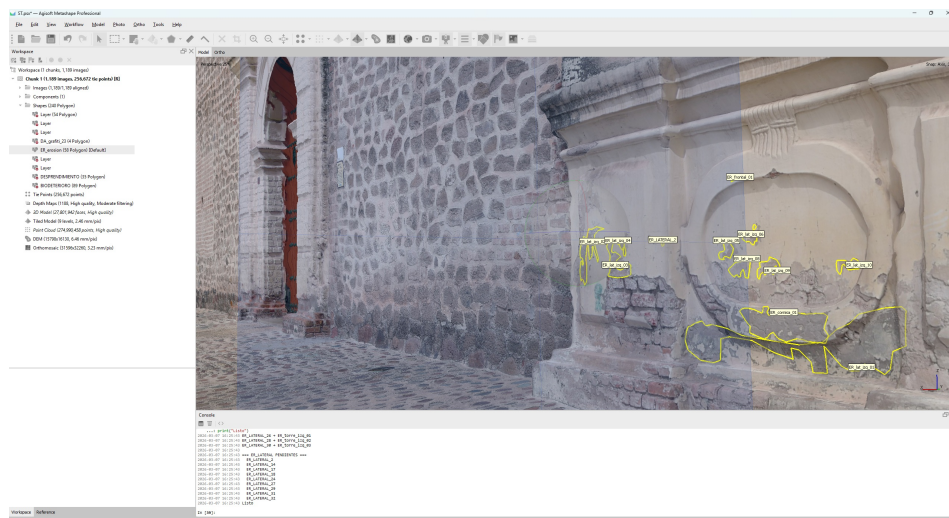
Erosión en el muro lateral izquierdo



Nota. Imagen propia adaptado de Agisoft Metashape Professional.

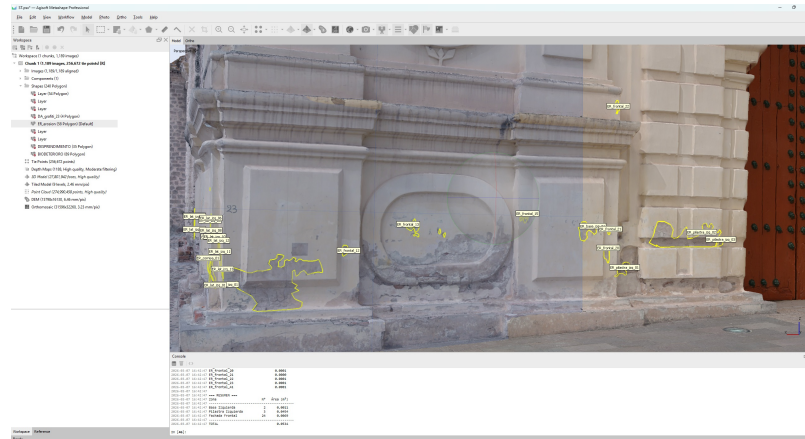
Figura 83

Erosión en el lateral izquierdo – Vista desde el acceso posterior.



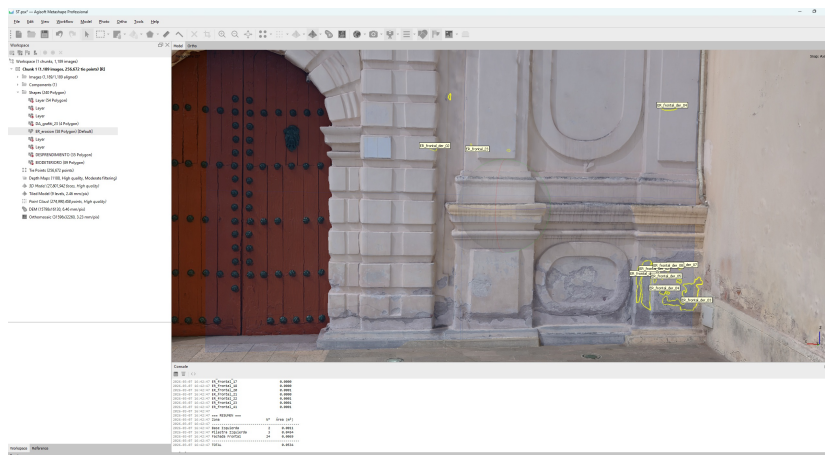
Nota. Imagen propia adaptado de Agisoft Metashape Professional.

Figura 84
Erosión en la fachada frontal y pilastra izquierda



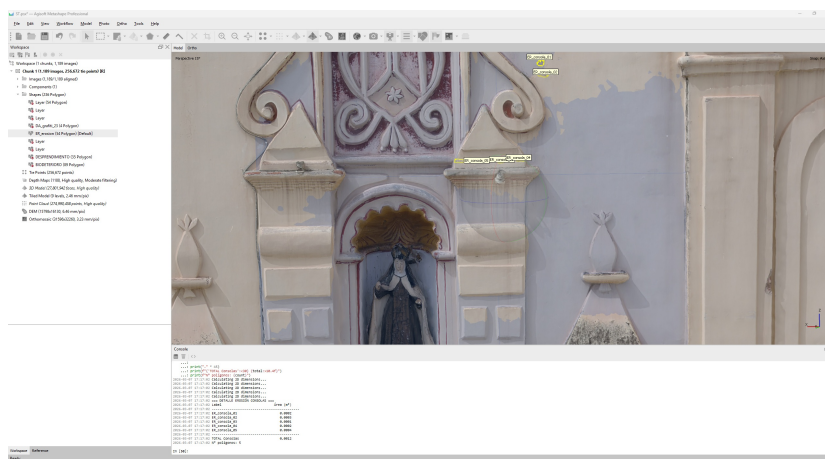
Nota. Imagen propia adaptado de Agisoft Metashape Professional.

Figura 85
Erosión en la fachada frontal derecha



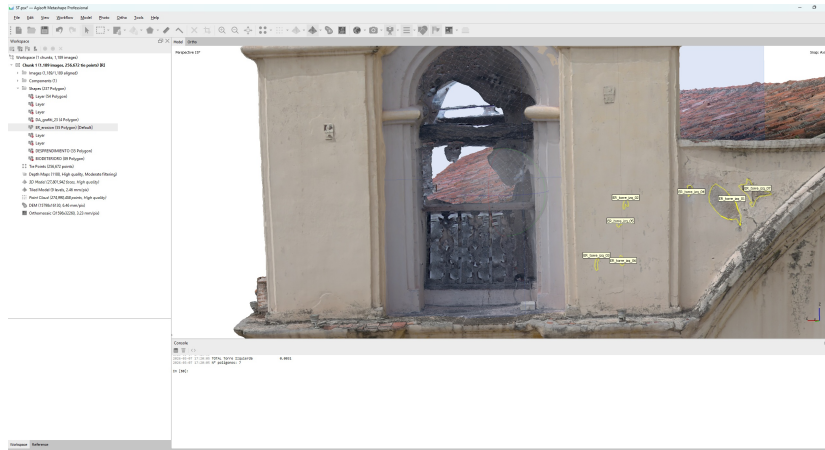
Nota. Imagen propia adaptado de Agisoft Metashape Professional.

Figura 86
Erosión en las consolas ornamentales



Nota. Imagen propia adaptado de Agisoft Metashape Professional.

Figura 87
Erosión en la torre izquierda



Nota. Imagen propia adaptado de Agisoft Metashape Professional.

Criterios técnicos de severidad

La clasificación de la erosión superficial se realizó con base en tres criterios técnicos: **Extensión** (área afectada en m²), **profundidad** del deterioro en el material y **localización estructural** del elemento afectado. El Cuadro 20 presenta la escala aplicada.

Cuadro 20

Criterios técnicos de severidad para erosión superficial

Nivel	Extensión (área afectada)	Profundidad del deterioro	Localización estructural
Leve	< 0.02 m ² por zona	Pérdida exclusiva de la capa de pintura; el enlucido subyacente permanece íntegro	Elemento decorativo sin función estructural (moldura, ornamento, cornisa)
Moderado	Entre 0.02 y 0.05 m ² por zona	Pérdida de pintura y avance sobre la capa de enlucido o mortero de cal	Elemento de fachada con función de protección (pilastra, muro frontal, base)
Severo	Entre 0.05 y 0.10 m ² por zona	Exposición del mortero base o árido fino; inicio de disgregación del material	Elemento estructural o de valor patrimonial significativo (muro portante, portada)
Muy severo	> 0.10 m ² por zona	Pérdida generalizada del material de acabado; sustrato pétreo expuesto y disgregado	Elemento estructural principal con riesgo de afectación mecánica

Nota. Elaboración propia, con base en los criterios técnicos establecidos en la sección 2.3.

Cuantificación por zonas

El Cuadro 21 resume la cuantificación de la erosión superficial por sector de la edificación. Las áreas fueron calculadas directamente sobre el modelo tridimensional georreferenciado, con el sistema de referencia *WGS 84 / UTM 18S + EGM2008* y una resolución de malla de 2.46 mm/píx.

Cuadro 21

Cuantificación de erosión superficial por zona – Iglesia Santa Teresa de Ayacucho

Zona	N° polígonos	Área (m ²)	% del total	Severidad
Pilastra Izquierda	3	0.0454	46.52	Moderado
Lateral Izquierdo	14	0.0379	38.83	Moderado
Fachada Frontal Derecha	10	0.0062	6.35	Leve
Torre Izquierda	7	0.0031	3.18	Leve
Cornisa	1	0.0018	1.84	Leve
Consola	5	0.0012	1.23	Leve
Base Izquierda	2	0.0011	1.13	Leve
Fachada Frontal General	13	0.0007	0.72	Leve
Total general	55	0.0976	100.00	Moderado

Nota. Imagen propia adaptado de *Agisoft Metashape Professional*.

Análisis de resultados

Los resultados obtenidos revelan que la erosión superficial en la Iglesia Santa Teresa de Ayacucho presenta una distribución marcadamente heterogénea. La **Pilastra Izquierda** concentra el **46.52 %** del área total erosionada con 0.0454 m², constituyendo la zona de mayor afectación a pesar de contar con solo 3 polígonos; esto indica que las zonas de pérdida son de dimensiones considerables en comparación con el resto de sectores. En segundo lugar, el **Lateral Izquierdo** registra el **38.83 %** con 0.0379 m² distribuidos en 14 polígonos, lo que evidencia un deterioro más fragmentado pero de mayor extensión superficial.

Ambas zonas suman conjuntamente el **85.35 %** del área total erosionada, lo que permite afirmar que la cara izquierda de la edificación constituye el sector de mayor vulnerabilidad ante esta patología. Esta concentración puede atribuirse a la orientación de dicha fachada respecto a los vientos y a la humedad proveniente del entorno urbano inmediato, así como a una menor renovación de los trabajos de mantenimiento en esa zona respecto a la portada principal.

El resto de sectores —Fachada Frontal Derecha (6.35 %), Torre Izquierda (3.18 %), Cornisa (1.84 %), Consola (1.23 %), Base Izquierda (1.13 %) y Fachada Frontal General (0.72 %)— registran afectaciones individuales inferiores al 7 %, calificadas como *leves*, aunque su

presencia indica que la patología se extiende a prácticamente todos los sectores de la fachada.

En conjunto, el área erosionada total de **0.0976 m²** representa una afectación de severidad **moderada**, que requiere intervención oportuna para evitar la progresión hacia estados de desprendimiento masivo del revestimiento.

3.12.6.10 Resumen comparativo de patologías

El Cuadro 22 consolida los resultados del mapeo fotogramétrico sistemático de todas las patologías identificadas en la envolvente de la Iglesia Santa Teresa de Ayacucho, permitiendo establecer una jerarquía de intervención con base en la extensión, el número de afectaciones y el nivel de severidad de cada tipología.

Cuadro 22

Resumen comparativo de patologías – Iglesia Santa Teresa de Ayacucho

Patología	Código	N° polígonos	Área total (m ²)	% del total	Severidad
Biodeterioro	BI_	111	157.6865	99.46 %	Muy severo
Desprendimiento	DE_	96	0.7309	0.46 %	Moderado
Erosión superficial	ER_	55	0.0976	0.06 %	Moderado
Daño antrópico	DA_	4	0.0015	0.00 %	Leve
Total general		266	158.5165	100.00 %	Muy severo

Nota. Elaboración propia. Áreas calculadas mediante polígonos digitalizados sobre el modelo fotogramétrico 3D en Agisoft Metashape Professional v2.3.1, sistema de coordenadas WGS 84 / UTM zona 18S + EGM2008, resolución GSD = 2.46 mm/píx. Las fisuras no fueron identificadas a la escala de resolución del modelo fotogramétrico.

Análisis comparativo

Los resultados consolidados revelan una marcada asimetría en la distribución de las patologías. El **biodeterioro** domina de forma absoluta con **157.69 m²** que representan el **99.46 %** del área total afectada, determinando por sí solo la severidad global del conjunto como **muy severa**. Esta situación se explica por la extensión de las superficies de cubierta —tejado principal y cubiertas de torres— que concentran el 90.52 % del biodeterioro total y que, por su naturaleza horizontal y su exposición continua a la precipitación, constituyen el entorno más favorable para el desarrollo de organismos biológicos en el clima alto-andino de Ayacucho.

El **desprendimiento** ocupa el segundo lugar con 0.7309 m² (0.46 %) y severidad **moderada**, seguido de la **erosión superficial** con 0.0976 m² (0.06 %) de igual severidad. Ambas patologías, aunque de extensión reducida frente al biodeterioro, revisten especial importancia patrimonial porque implican pérdida irreversible de materia original en los paramentos de la fachada principal y los muros laterales.

El **daño antrópico** presenta la menor extensión con 0.0015 m² (0.00 %) y severidad **leve**, concentrado en cuatro intervenciones de grafiti en el muro lateral izquierdo del Nivel 0. Su reducida extensión no minimiza su impacto patrimonial, dado que el pigmento ha penetrado directamente en la superficie pétreo de sillares de alto valor histórico.

Las **fisuras** no fueron identificadas a la escala de resolución del modelo fotogramétrico (GSD = 2.46 mm/píx), lo que indica que, de existir, su apertura es inferior a 3 mm y requeriría inspección directa in situ con instrumentos de medición de fisuras para su caracterización.

Jerarquía de intervención

Con base en los resultados del mapeo, se establece la siguiente jerarquía de intervención prioritaria:

1. **Prioridad 1 — Inmediata:** Extracción de vegetación vascular (BI_VEGETAL_xx) y tratamiento biocida en cubierta de tejado principal (118.40 m²) y cubiertas de torres (24.20 m²), por constituir el 90.52 % del área afectada con severidad **muy severa**.
2. **Prioridad 2 — Corto plazo:** Consolidación y reintegración de revestimientos en zonas de desprendimiento, con especial atención a la fachada frontal derecha (0.1875 m²) y los muros laterales (0.2570 m²), mediante morteros de cal compatibles con los materiales originales.
3. **Prioridad 3 — Corto plazo:** Tratamiento de la erosión superficial en la pilastra izquierda (0.0454 m²) y el lateral izquierdo (0.0379 m²), que concentran el 85.35 % del área erosionada, mediante consolidante superficial y reposición de la capa de acabado.
4. **Prioridad 4 — Mediano plazo:** Limpieza química especializada del grafiti en el muro lateral izquierdo (0.0015 m²) con tratamiento hidrofugante posterior e instalación de elementos de protección física en el Nivel 0.
5. **Prioridad 5 — Inspección in situ:** Verificación directa de posibles fisuras mediante inspección ocular con fisurómetro en zonas de concentración de esfuerzos (juntas de esquina, dinteles y arcos de portada).

4. RESULTADOS

4.1. Análisis de resultados

El presente capítulo expone los resultados obtenidos en cada etapa del proceso metodológico aplicado para el mapeo de patologías superficiales en la Iglesia Santa Teresa de Ayacucho, siguiendo la secuencia lógica del flujo de trabajo UAV-SfM-BIM: levantamiento fotogramétrico, procesamiento en *Agisoft Metashape Professional v2.3.1*, generación del modelo tridimensional y ortomosaico, digitalización y cuantificación de patologías, validación métrica y modelado BIM en *Autodesk Revit 2025.4*.

- **Respecto al levantamiento fotogramétrico**, el vuelo ejecutado el 28 de abril de 2025 con el UAV *Autel Robotics XT705* capturó **1,189 imágenes** bajo un plan de vuelo combinado de pasadas nadirales y oblicuas, con una altura media de vuelo de 25 m AGL y una distancia media cámara-superficie de 7.68 m. La totalidad de las imágenes fueron alineadas exitosamente en *Metashape* (**100 % de alineación**), generando una nube de puntos dispersa de **609,694 puntos** y una nube de puntos densa de **274,990,458 puntos**. El ortomosaico resultante presentó una resolución GSD de **2.46 mm/píx**, suficiente para la detección y delimitación de patologías superficiales con dimensiones superiores a 5 mm sobre la totalidad de la envolvente de la edificación. El sistema de referencia adoptado fue WGS 84 / UTM zona 18S con geoide EGM2008, garantizando la coherencia geodésica con la cartografía oficial del Instituto Geográfico Nacional del Perú.
- **Respecto a la cuantificación de patologías**, la digitalización manual asistida por ortomosaico permitió identificar y delimitar **266 polígonos** distribuidos en cuatro tipologías: biodeterioro (BI_, 111 polígonos), desprendimiento (DE_, 96 polígonos), erosión superficial (ER_, 55 polígonos) y daño antrópico (DA_, 4 polígonos). La extracción automatizada de parámetros métricos mediante scripts Python en *Metashape* arrojó un **área total afectada de 158.5165 m²**. El análisis por tipología revela que el biodeterioro constituye la patología ampliamente dominante con 157.69 m² (99.46 % del total), evidenciando una afectación crítica en la cubierta principal de la edificación, zona de difícil acceso para la inspección visual terrestre y cuya documentación resultó posible exclusivamente mediante levantamiento aéreo UAV.
- **Respecto a la clasificación por severidad**, los 266 polígonos fueron jerarquizados en tres niveles — leve, moderado y severo — aplicando criterios técnicos objetivos de extensión superficial, profundidad de afectación y localización estructural. Esta clasificación permitió establecer una jerarquía de intervención, identificando como prioritaria la atención inmediata del biodeterioro severo en la cubierta (Severidad 3, 118.40 m²) y del desprendimiento moderado en el basamento y cornisa de las fachadas lateral izquierda y frontal. Los resultados de severidad fueron sistematizados en los Cuadros 17, 18 y 20, y visualizados sobre el ortomosaico mediante simbología cromática jerarquizada.

- **Respecto a la validación métrica**, la comparación entre las medidas de campo, el modelo BIM y los planos CAD de relevamiento arquitectónico sobre cuatro elementos de referencia (M1–M4) confirmó la precisión relativa del modelo fotogramétrico. El subconjunto estadísticamente válido ($n = 3$, excluyendo M3 por diferencia en la definición del segmento) arrojó $RMSE = 0.0641$ m, $r = 0.9991$ y $d = 0.9982$, con un análisis de Bland–Altman que evidenció ausencia de sesgo sistemático significativo ($\bar{\Delta} = -0.014$ m). La discrepancia en M3 ($|\Delta| = 0.93$ m) fue atribuida a la diferencia en la definición del segmento medido en campo (tramo parcial entre columnas) respecto al segmento completo registrado en el modelo, no constituyendo un error fotogramétrico intrínseco del método.
- **Respecto al modelado BIM**, el modelo arquitectónico paramétrico desarrollado en *Autodesk Revit 2025.4* integró 11 muros estructurales con sus dimensiones reales extraídas mediante el flujo Dynamo–Python, reproduciendo fielmente la geometría de la envolvente de la Iglesia Santa Teresa de Ayacucho. La vinculación entre los polígonos de patología georreferenciados en *Metashape* y los elementos del modelo BIM constituye la base técnica para la futura implementación de un modelo HBIM (*Heritage Building Information Modeling*) con capacidad de gestión dinámica del estado de conservación del bien patrimonial, actualizable en cada campaña de monitoreo periódico.

4.2. Contrastación de hipótesis

4.2.1. Contrastación de hipótesis específica 01

- La evaluación fotogramétrica con drones permitirá identificar y medir con precisión las dimensiones de los diversos daños que afectan a la estructura de la Iglesia Santa Teresa en la ciudad de Ayacucho.

Para contrastar esta hipótesis, se ejecutó el protocolo de levantamiento fotogramétrico con el UAV *Autel Robotics XT705* el 28 de abril de 2025, capturando un total de **1,189 imágenes** con una cámara de 50 MP a una distancia media cámara-superficie de 7.68 m, lo que garantizó una resolución espacial GSD de **2.46 mm/píx**, suficiente para detectar patologías superficiales con dimensiones superiores a 5 mm. Las imágenes fueron procesadas íntegramente en *Agisoft Metashape Professional v2.3.1* bajo el flujo de trabajo SfM, logrando una tasa de alineación del **100 %** de las imágenes y generando una nube de puntos densa de **274,990,458 puntos**, un modelo digital de superficie (MDS) y un ortomosaico georreferenciado en el sistema WGS 84 / UTM zona 18S + EGM2008.

El ortomosaico generado constituyó la base cartográfica sobre la cual se digitalizó manualmente **266 polígonos** georreferenciados, identificando cuatro tipologías de patología claramente diferenciables a la resolución del modelo: Biodeterioro (BI_, 111 polígonos), desprendimiento de material (DE_, 96 polígonos), erosión superficial (ER_, 55 polígonos) y daño antrópico (DA_, 4 polígonos). La digitalización fue asistida por las herramientas de polígono de *Metashape*, permitiendo la trazabilidad espacial de cada

polígono sobre la superficie reconstruida del modelo tridimensional, lo que garantiza su georreferenciación absoluta y su reproductibilidad en campañas de monitoreo futuras.

La cuantificación métrica de cada polígono fue realizada mediante scripts Python ejecutados en el entorno interno de *Metashape*, empleando las funciones nativas `shape.area()`, `shape.perimeter3D()` y `shape.volume()`, las cuales operan directamente sobre la geometría tridimensional de la nube de puntos densa, garantizando que las mediciones reflejen la superficie real tridimensional y no su proyección plana. Los resultados arrojaron un área total afectada de **158.5165 m²**, distribuida de la siguiente manera: Biodeterioro 157.69 m² (99.46 %), desprendimiento 0.73 m² (0.46 %), erosión superficial 0.10 m² (0.06 %) y daño antrópico 0.0015 m² (0.00 %). Cada tipología fue además clasificada según criterios técnicos de severidad — extensión, profundidad y localización estructural — en tres niveles: Leve, moderado y severo, conforme a los criterios establecidos en los Cuadros 17, 18 y 20.

La validación métrica del modelo fotogramétrico, presentada, confirmó la precisión geométrica relativa del modelo mediante la comparación de tres fuentes independientes: medidas de campo tomadas con flexómetro (± 1 mm), dimensiones extraídas del modelo BIM desarrollado en *Autodesk Revit 2025.4* mediante scripts Dynamo–Python, y cotas del plano CAD de relevamiento arquitectónico. Los indicadores estadísticos obtenidos para el subconjunto depurado ($n = 3$, excluyendo M3 por diferencia en la definición del segmento medido) fueron: RMSE = **0.0641 m**, MAE = 0.0635 m, sesgo = -0.0145 m, coeficiente de correlación de Pearson $r = 0.9991$ e índice de concordancia de Lin $d = 0.9982$. El análisis de Bland–Altman determinó límites de acuerdo de -0.164 m a $+0.135$ m con un sesgo promedio de -0.014 m para $n = 3$, evidenciando una concordancia sistemática entre las medidas de campo y las del modelo fotogramétrico. Estos valores son consistentes con el rango de precisión reportado en investigaciones similares de documentación fotogramétrica UAV–SfM en edificaciones patrimoniales sin GCP, donde el RMSE típico oscila entre 1 y 3 cm (Martínez-Carricondo et al., 2021), confirmando que la metodología empleada cumple con los estándares de precisión exigidos para el diagnóstico técnico de patologías en patrimonio edificado.

En consecuencia, la evidencia métrica y estadística presentada permite **aceptar la hipótesis específica 01**: La fotogrametría UAV–SfM aplicada sobre la Iglesia Santa Teresa de Ayacucho demostró ser capaz de identificar, clasificar y cuantificar con precisión métrica las patologías superficiales presentes en la totalidad de su envolvente, registrando 266 polígonos georreferenciados que cubren 158.52 m² de superficie afectada, con un error geométrico relativo de 6.41 cm (RMSE) y un coeficiente de correlación de $r = 0.9991$, precisión suficiente para el diagnóstico técnico y la planificación de intervenciones de conservación en edificaciones del patrimonio cultural edificado.

4.2.2. Contratación de hipótesis específica 02

- La fotogrametría con UAV (drones) proporciona un nivel de precisión superior a los métodos convencionales de inspección visual en la evaluación de daños estructurales en la Iglesia Santa Teresa.

Para contrastar esta hipótesis, el ortomosaico georreferenciado generado en *Agisoft Metashape Professional v2.3.1* fue empleado como base cartográfica de precisión sobre la cual se ejecutó la digitalización sistemática de los 266 polígonos de patologías distribuidos en las cuatro fachadas de la edificación: frontal, lateral izquierda, lateral derecha y cubierta. La digitalización fue estructurada conforme a una nomenclatura codificada por tipología y número de polígono (BI_001 a BI_111, DE_001 a DE_096, ER_001 a ER_055, DA_001 a DA_004), garantizando la trazabilidad individual de cada elemento patológico y su vinculación unívoca al sistema de coordenadas geográficas del modelo.

Cada polígono fue clasificado según tipología y nivel de severidad, aplicando los criterios técnicos de extensión, profundidad y localización estructural definidos. Para el **biodeterioro**, la severidad se determinó en función del porcentaje de superficie afectada por microorganismos, líquenes, musgos o vegetación vascular respecto al área total del paramento, distinguiendo tres niveles: leve (<10 %), moderado (10–30 %) y severo (>30 %). Para el **desprendimiento**, la clasificación consideró la profundidad de pérdida de material y la proximidad a elementos estructurales. Para la **erosión superficial**, se evaluó la pérdida de sección transversal del material de revestimiento. La aplicación sistemática de estos criterios a los 266 polígonos digitalizados produjo un inventario técnico que supera el nivel descriptivo narrativo habitual en los estudios de diagnóstico patrimonial, constituyendo un diagnóstico cuantitativo reproducible y auditable.

La integración con el modelo BIM desarrollado en *Autodesk Revit 2025* permitió asociar cada zona de patología a un elemento arquitectónico específico del modelo paramétrico — muro, cubierta, cornisa, basamento o vano —, dotando al mapeo de una dimensión espacial y constructiva que trasciende el registro fotográfico convencional. Las coordenadas de los polígonos de patología, expresadas en el sistema WGS 84 / UTM zona 18S, fueron contrastadas con las dimensiones del modelo BIM mediante el flujo Dynamo–Python implementado en *Autodesk Revit 2025.4*, confirmando la coherencia geométrica entre ambos modelos. Esta vinculación BIM–patología proporciona la base técnica para la elaboración futura de un modelo HBIM (*Heritage Building Information Modeling*) con capacidad de gestión dinámica del estado de conservación del bien patrimonial, actualizable en cada campaña de monitoreo periódico.

Los resultados del mapeo permitieron identificar que la patología de mayor extensión y severidad es el biodeterioro en la cubierta principal (118.40 m², Severidad 3), asociado a la acumulación de materia orgánica y la retención de humedad favorecida por la geometría en dos aguas de la cubierta y la escasa pendiente de desagüe. En consecuencia, la evidencia técnica y cartográfica presentada permite **aceptar la hipótesis específica 02**.

5. CONCLUSIONES

5.1. Conclusiones

- **Objetivo General:** Identificar los daños estructurales de la Iglesia Santa Teresa de la ciudad de Ayacucho a partir de la evaluación fotogramétrica con drones.

La aplicación de fotogrametría UAV-SfM sobre la Iglesia Santa Teresa de Ayacucho demostró ser un método no invasivo de alta precisión para la identificación y análisis de daños en bienes patrimoniales edificados, permitiendo documentar 266 polígonos georreferenciados con un área total afectada de 158.52 m² y una precisión métrica validada de RMSE = 0.0641 m ($r = 0.9991$), constituyendo el primer diagnóstico técnico cuantitativo, reproducible y auditable realizado sobre este bien patrimonial, apto para fundamentar intervenciones de conservación preventiva.

- **Objetivo 01:** Identificar y cuantificar las patologías superficiales presentes en la envolvente de la Iglesia Santa Teresa de Ayacucho mediante fotogrametría UAV-SfM.

Se logró identificar y cuantificar un total de **266 polígonos georreferenciados** distribuidos en cuatro tipologías de patología sobre la envolvente completa de la Iglesia Santa Teresa de Ayacucho. El área total afectada asciende a **158.5165 m²**, siendo el biodeterioro la patología predominante con 157.69 m² (99.46 %), seguida del desprendimiento con 0.73 m² (0.46 %), la erosión superficial con 0.10 m² (0.06 %) y el daño antrópico con 0.0015 m². La mayor concentración de biodeterioro se registró en la cubierta principal, con una extensión de 118.40 m² clasificada como Severidad 3 (severa), elemento que únicamente pudo ser documentado mediante levantamiento aéreo UAV dado su inaccesibilidad para la inspección visual terrestre convencional. La digitalización sistemática con nomenclatura codificada por tipología y nivel de severidad (leve, moderado, severo) transformó el diagnóstico cualitativo narrativo en un inventario técnico cuantitativo, reproducible y auditable, apto para la planificación de intervenciones de conservación preventiva.

- **Objetivo 02:** Validar la precisión métrica del modelo fotogramétrico generado mediante la comparación con medidas de referencia independientes.

La validación métrica del modelo fotogramétrico UAV-SfM mediante la comparación de tres fuentes independientes — medidas de campo con flexómetro, dimensiones del modelo BIM (*Autodesk Revit 2025.4*) y cotas del plano CAD de relevamiento arquitectónico — arrojó indicadores estadísticos que confirman la precisión relativa del modelo. Para el subconjunto depurado ($n = 3$), se obtuvo un RMSE = **0.0641 m**, MAE = 0.0635 m, coeficiente de correlación de Pearson $r = 0.9991$ e índice de concordancia de Lin $d = 0.9982$, con límites de acuerdo de Bland-Altman de -0.164 m a $+0.135$ m y un sesgo promedio de -0.014 m. Estos valores son coherentes con el rango de precisión reportado en la literatura para levantamientos UAV-SfM sin GCP sobre edificaciones patrimoniales (RMSE típico: 1–3 cm), confirmando que la resolución GSD de 2.46 mm/píx obtenida es suficiente para el diagnóstico técnico

de patologías superficiales en patrimonio edificado. La discrepancia registrada en la medida M3 (muro lateral, $|\Delta| = 0.93$ m) fue identificada y explicada como diferencia en la definición del segmento medido entre la inspección de campo y el modelo, no como error fotogramétrico.

5.2. Recomendaciones

- Se recomienda realizar campañas de monitoreo periódico con periodicidad anual o bianual, repitiendo el protocolo de levantamiento UAV-SfM bajo condiciones equivalentes (misma época del año, similar iluminación y parámetros de vuelo). La comparación de modelos fotogramétricos sucesivos mediante análisis de diferencia de nubes de puntos (M3C2) permitiría cuantificar la progresión temporal de las patologías identificadas, en particular del biodeterioro en la cubierta y del desprendimiento en los muros laterales.
- Se recomienda ampliar el número de medidas de validación de campo a un mínimo de 10 puntos de comprobación independiente (ICP), distribuidos uniformemente en las distintas fachadas y alturas de la edificación. El empleo de una estación total o distanciómetro láser para la medición de elementos en altura eliminaría la limitación de alcance del flexómetro que restringió la validación del presente estudio a 4 medidas en el nivel de piso.
- Se recomienda complementar el mapeo fotogramétrico con inspección directa *in situ* mediante fisurómetro y esclerómetro en las zonas identificadas con mayor concentración de patologías, particularmente en la cubierta principal (118.40 m² de biodeterioro), la fachada frontal derecha y la junta de basamento. Esta inspección directa permitiría caracterizar las fisuras con apertura inferior a 3 mm no detectadas a la resolución GSD = 2.46 mm/píx del modelo, así como evaluar la resistencia superficial de los materiales deteriorados.
- Se recomienda elaborar un plan de intervención priorizado en coordinación con la Dirección Desconcentrada de Cultura de Ayacucho, tomando como base la jerarquía de intervención establecida en el presente estudio. La intervención inmediata en la extracción de vegetación vascular y tratamiento biocida de la cubierta (Prioridad 1) debe ejecutarse antes del inicio de la temporada de lluvias para evitar la progresión del biodeterioro hacia el interior de la edificación.
- Se recomienda gestionar con antelación suficiente las autorizaciones formales ante la Dirección Desconcentrada de Cultura de Ayacucho del Ministerio de Cultura, conforme a lo establecido en la Circular COA-38 y la Ley N° 28296 respectivamente. La tramitación oportuna de dichos permisos, además de garantizar la legalidad plena de la operación UAV, permitiría coordinar con el Ministerio de Cultura la incorporación de los productos fotogramétricos al expediente técnico oficial de conservación del bien patrimonial, incrementando el impacto institucional de futuros estudios similares.

5.3. Trabajos futuros

- **Monitoreo estructural integrado UAV-SfM y sensores IoT:** Se propone integrar el levantamiento fotogramétrico periódico con una red de sensores de bajo costo (acelerómetros MEMS, sensores de humedad y temperatura) instalados en los elementos estructurales de mayor riesgo (cubierta, torres, muros portantes). La correlación entre los datos fotogramétricos de deformación superficial y los registros de los sensores permitiría desarrollar un sistema de alerta temprana para la gestión preventiva del patrimonio edificado.
- **Generación del modelo BIM-H (Heritage Building Information Modeling):** Se propone evolucionar el modelo BIM arquitectónico desarrollado en *Autodesk Revit 2025.4* hacia un modelo HBIM completo, incorporando los polígonos de patologías mapeados como objetos paramétricos con atributos de tipología, severidad, fecha de detección y recomendación de intervención. Este modelo HBIM constituiría una herramienta de gestión patrimonial dinámica, actualizable en cada campaña de monitoreo.
- **Aplicación de inteligencia artificial para detección automática de patologías :** Se propone entrenar modelos de segmentación semántica basados en redes neuronales convolucionales (U-Net, Mask R-CNN) con las imágenes del ortomosaico y los polígonos de patologías del presente estudio como *dataset* de entrenamiento. La automatización de la detección y clasificación de patologías reduciría significativamente el tiempo de procesamiento en futuros levantamientos y eliminaría la subjetividad del operador en la digitalización manual de polígonos.
- **Extensión del mapeo al interior de la edificación :** El presente estudio se limitó a la envolvente exterior de la Iglesia Santa Teresa de Ayacucho. Se propone extender la metodología UAV-SfM al interior de la nave, el presbiterio y la sacristía mediante el empleo de un sistema de escáner láser terrestre (TLS) o de un UAV compacto de interior, permitiendo documentar las patologías en los paramentos interiores, la cubierta de madera y los elementos ornamentales de valor patrimonial.
- **Comparativa multi-edificio en el Centro Histórico de Ayacucho:** Se propone replicar la metodología del presente estudio en otros bienes inmuebles del Centro Histórico de Ayacucho (declarado Patrimonio Cultural de la Nación), tales como la Iglesia de San Francisco de Asís, la Catedral de Ayacucho y el Templo de Santo Domingo. La comparativa permitiría identificar patrones comunes de deterioro asociados al clima alto-andino y generar una base de datos de patologías del patrimonio edificado ayacuchano de utilidad para la planificación de políticas de conservación a escala urbana.
- **Validación con escáner láser terrestre (TLS) —** Se propone realizar un levantamiento complementario con escáner láser terrestre de alta precisión ($\sigma < 2$ mm) sobre la fachada principal y el muro lateral de la Iglesia Santa Teresa, con el fin de validar la precisión del modelo UAV-SfM mediante la comparación de nubes de puntos (ICP — *Iterative Closest Point*).

- Agencia Andina. (2025). *SUNARP: 11 de 33 iglesias históricas de Ayacucho están inscritas en el Registro de Predios*. Consultado el 10 de marzo de 2026, desde <https://andina.pe/agencia/noticia-sunarp-11-33-iglesias-historicas-ayacucho-estan-inscritas-el-registro-predios-1057680.aspx>
- Agisoft LLC. (2023). *Agisoft Metashape Professional User Manual, Version 2.0*. Agisoft LLC. Saint Petersburg, Russia. https://www.agisoft.com/pdf/metashape-pro_2_0_en.pdf
- Agüera-Vega, F., Carvajal-Ramírez, F., & Martínez-Carricondo, P. (2017). Assessment of photogrammetric mapping accuracy based on variation of ground control points number using unmanned aerial vehicle. *Measurement*, 98, 221-227. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2016.11.044>
- Aguilar, R., Moreira, S., ... Miraç Ramos, M. (2019). Seismic Vulnerability Assessment of a 17th Century Adobe Church in the Peruvian Andes. *International Journal of Architectural Heritage*, 13(1), 140-152. <https://doi.org/10.1080/15583058.2018.1497224>
- American Concrete Institute. (2019). *ACI 364.1R-19 — Guide for Assessment of Concrete Structures before Rehabilitation*. Farmington Hills, MI. <https://www.concrete.org>
- American Concrete Institute. (2022). *ACI 228.2R-22 — Report on Nondestructive Test Methods for Evaluation of Concrete in Structures*. Farmington Hills, MI. <https://www.concrete.org>
- ASTM International. (2019). *ASTM E57 — Standard Specification for 3D Imaging Data Exchange*. West Conshohocken, PA. <https://www.astm.org/e2807-11r19.html>
- ASTM International. (2023). *ASTM E1316 — Standard Terminology for Nondestructive Examinations*. West Conshohocken, PA. <https://www.astm.org/e1316-23.html>
- Ataucusi Choquecahua, C. (2024). *Restauración Arquitectónica del Arco del Triunfo a través de Fotogrametría y Modelo HBIM en el Centro Histórico de la Ciudad de Ayacucho 2023* [Tesis de maestría]. Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga. <https://repositorio.unsch.edu.pe/handle/20.500.14612/7393>
- Bland, J. M., & Altman, D. G. (1986). Statistical methods for assessing agreement between two methods of clinical measurement. *The Lancet*, 327(8476), 307-310. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(86\)90837-8](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(86)90837-8)
- Bonazza, A., & Sardella, A. (2023). Climate Change and Cultural Heritage: Methods and Approaches for Damage and Risk Assessment Addressed to a Practical Application. *Heritage*, 6(4), 3578-3589. <https://doi.org/10.3390/heritage6040190>
- Bourgeois, I., Sugiyama, G., ... Rodrigues, H. (2025). Smart 3D printed elements for conservation of damaged heritage structures. *Journal of Building Engineering*, 112, 113595. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2025.113595>
- Caballero Romero, A. (2014). *Metodología integral innovadora para planes y tesis: La metodología del cómo formularlos*. Cengage Learning.
- Cárdenas Mamani, M. V., & Ccaso Huanacuni, Y. M. (2024). *Análisis comparativo entre el levantamiento topográfico mediante vehículo aéreo no tripulado (UAV) y sistema de*

- posicionamiento global diferencial (DGPS) en la Asociación de Granjas Peregrinos de Jonas, distrito de Calana, Provincia y Departamento de Tacna – 2023* [Tesis de pregrado]. Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann.
- Cavalagli, N., Giofrè, M., ... Volpi, G. M. (2020). On the accuracy of UAV photogrammetric survey for the evaluation of historic masonry structural damages. *Procedia Structural Integrity*, 29, 165-174. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2020.11.153>
- Chen, F., Ma, P., ... Guo, H. (2026). Remote sensing for cultural heritage: A systematic review. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 146, 105039. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2025.105039>
- Chen, Z., Gao, Q., ... Cui, H. (2025). World Cultural Heritage sites are under climate stress and no emissions mitigation pathways can uniformly protect them [Acceso abierto. Publicado el 5 de agosto de 2025. Analiza 1 073 sitios del PCM: el 80 % ya registra disturbios de calor y humedad perjudiciales]. *Communications Earth & Environment*, 6, 628. <https://doi.org/10.1038/s43247-025-02603-8>
- Colace, F., Gaeta, R., ... Santaniello, D. (2025). New AI challenges for cultural heritage protection: A general overview. *Journal of Cultural Heritage*, 75, 168-193. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2025.07.019>
- Colace, F., Limongiello, M., ... Santoriello, A. (2026). Digital twin for cultural heritage: A computational approach to predictive conservation. *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*, 40, e00519. <https://doi.org/10.1016/j.daach.2026.e00519>
- Coletti, C., Germinario, L., ... Mazzoli, C. (2024). Climate Change Threats to Stone Cultural Heritage: State of the Art of Quantitative Damage Functions and New Challenges for a Sustainable Future [Revisa mecanismos de deterioro en piedra patrimonial: cristalización de sales, estrés térmico, biodeterioro y recesión superficial bajo escenarios climáticos futuros]. *Heritage*, 7(6), 154. <https://doi.org/10.3390/heritage7060154>
- Congreso de la República del Perú. (2024). Ley Nº 32094 – Ley que declara de interés nacional la restauración de seis monumentos históricos [Diario Oficial El Peruano]. Consultado el 28 de abril de 2025, desde <https://elperuano.pe/noticia/248188-ley-no-32094-declara-de-interes-nacional-la-restauracion-de-seis-monumentos-historicos>
- Cuadros-Rojas, E., Saloustros, S., ... Pelà, L. (2024). Photogrammetry-aided numerical seismic assessment of historical structures composed of adobe, stone and brick masonry: Application to the San Juan Bautista Church built on the Inca temple of Huaytará, Peru. *Engineering Failure Analysis*, 158, 107984. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2024.107984>
- Cudzik, J., Sędzicki, D., & Szmelter-Fausek, B. (2025). From craft to code: Integrating digital fabrication with traditional conservation techniques. *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*, 38, e00442. <https://doi.org/10.1016/j.daach.2025.e00442>

- D'Agostino, S. (2021). *Conservation and Restoration of Built Heritage: A History of Conservation Culture and its More Recent Developments*. CRC Press.
- De Fino, M., Galantucci, R. A., & Fatiguso, F. (2023). Condition Assessment of Heritage Buildings via Photogrammetry: A Scoping Review from the Perspective of Decision Makers [Revisión PRISMA de 117 publicaciones (Scopus y WoS, 2013–2023). Análisis fotogrametría de corto alcance y UAV para diagnóstico, mapeo de deterioro y monitoreo estructural]. *Heritage*, 6(11), 7031-7066. <https://doi.org/10.3390/heritage6110367>
- Doehne, E., & Price, C. A. (2010). *Stone Conservation: An Overview of Current Research* (2.ª ed.). Getty Conservation Institute.
- El Popular. (2025, 30 de octubre). *Ayacucho: parte de la iglesia Compañía de Jesús se desploma dejando una mujer fallecida y múltiples heridos*. Consultado el 10 de marzo de 2026, desde <https://elpopular.pe/actualidad/2025/10/30/ayacucho-parte-de-la-iglesia-compania-de-jesus-se-desploma-dejando-una-mujer-fallecida-y-multiples-heridos-2362320>
- Ente Nazionale Italiano di Unificazione. (2006). *UNI 11182:2006 — Beni culturali — Materiali lapidei naturali ed artificiali — Descrizione della forma di alterazione*. Milano, Italia.
- Fernández Muñoz, M. A. (2024). *Propuesta de aplicación de fotogrametría con drones y metodología BIM en el diseño geométrico de una carretera en el distrito de Limabamba para reducir el tiempo de diseño* [Tesis de pregrado]. Pontificia Universidad Católica del Perú. <http://hdl.handle.net/20.500.12404/27080>
- Fiorillo, F., Perfetti, L., & Cardani, G. (2023). Automated mapping of the roof damage in historic buildings in seismic areas with UAV photogrammetry. *Procedia Structural Integrity*, 44, 1672-1679. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2023.01.214>
- Gaspar, P. L., & de Brito, J. (2005). Quantifying Environmental Effects on Cement-Rendered Facades: A Comparison Between Exposure Conditions. *Building and Environment*, 40(12), 1572-1582. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2004.12.013>
- Gomes, M. G., & Tomé, A. (2023). A digital and non-destructive integrated methodology for heritage modelling and deterioration mapping: The case study of the Moorish Castle in Sintra. *Developments in the Built Environment*, 14, 100145. <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2023.100145>
- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, P. (2014). *Metodología de la investigación* (6.ª ed.). McGraw-Hill Education.
- Infobae Perú. (2025, 31 de octubre). *Fiscalía investiga causas de la muerte de ciudadana tras derrumbe en iglesia del Centro Histórico de Ayacucho*. Consultado el 10 de marzo de 2026, desde <https://www.infobae.com/peru/2025/10/31/fiscalia-investiga-causas-de-la-muerte-de-ciudadana-tras-derrumbe-en-iglesia-del-centro-historico-de-ayacucho/>
- International Organization for Standardization. (2010). *ISO 13822:2010 — Bases for design of structures: Assessment of existing structures* [Includes Annex I for heritage structures]. Geneva, Switzerland. <https://www.iso.org/standard/46556.html>

- International Organization for Standardization. (2023). *ISO 19157:2023 – Geographic Information – Data Quality*. Geneva, Switzerland. <https://www.iso.org/standard/78900.html>
- Jokilehto, J. (1999). *A History of Architectural Conservation*. Butterworth-Heinemann.
- Jornada. (2025, noviembre). *Según INDECI, al menos 40 casonas e iglesias coloniales podrían colapsar en cualquier momento*. Consultado el 10 de marzo de 2026, desde <https://jornada.com.pe/segun-indeci-al-menos-40-casonas-e-iglesias-coloniales-podrian-colapsar-en-cualquier-momento/>
- Kong, X., & Hucks, R. G. (2023). Preserving our heritage: A photogrammetry-based digital twin framework for monitoring deteriorations of historic structures. *Automation in Construction*, 156, 104928. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.104928>
- Ley N.º 28296, Ley General del Patrimonio Cultural de la Nación (2004, 22 de julio). <https://www.gob.pe/institucion/congreso-de-la-republica/normas-legales/2338623-28296>
- Liu, Y., & Chen, J. (2023). Research on the conservation of historical buildings based on digital 3D reconstruction. *Procedia Computer Science*, 228, 593-600. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2023.11.068>
- Martínez-Carricondo, P., Carvajal-Ramírez, F., ... Agüera-Vega, F. (2021). Combination of HBIM and UAV photogrammetry for modelling and documentation of forgotten heritage. Case study: Isabel II dam in Níjar (Almería, Spain). *Heritage Science*, 9, 95. <https://doi.org/10.1186/s40494-021-00571-8>
- Merzhiiivska, N., Dunaievskyi, Y., ... Andrieieva, Y. (2026). A novel educational model for architectural heritage preservation in Ukraine: Digital tools amidst wartime challenges. *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*, 40, e00507. <https://doi.org/10.1016/j.daach.2026.e00507>
- Ministerio de Cultura del Perú. (2024). *Patrimonio cultural inmueble declarado: iglesias coloniales* [Datos del registro nacional de bienes inmuebles integrantes del Patrimonio Cultural de la Nación]. <https://www.gob.pe/cultura>
- Mishra, M., & Lourenço, P. B. (2024). Artificial intelligence-assisted visual inspection for cultural heritage: State-of-the-art review. *Journal of Cultural Heritage*, 66, 34. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2024.01.005>
- Moyano, J., Musicco, A., ... Domínguez-Morales, J. P. (2024). Geometric characterization and segmentation of historic buildings using classification algorithms and convolutional networks in HBIM. *Automation in Construction*, 167, 105728. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2024.105728>
- Muradov, M., Kot, P., ... Mohi-Ud-Din, G. (2022). Non-destructive system for in-wall moisture assessment of cultural heritage buildings. *Measurement*, 203, 111930. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2022.111930>
- Nowogońska, B., & Drobiec, J. (2025). Prevention of failure of heritage buildings through diagnostic testing using the example of testing of roof structure elements from the

- 15th century. *Engineering Failure Analysis*, 178, 109709. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2025.109709>
- Ortega-Morales, O., Montero-Muñoz, J. L., ... Gaylarde, C. (2019). Deterioration and microbial colonization of cultural heritage stone buildings in polluted and unpolluted tropical and subtropical climates: A meta-analysis. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 143, 104734. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2019.104734>
- Palomino Arango, W. E. (2022). *Evaluación de daños empleando fotogrametría en el Puente Sotoqchaca de la Alameda Marques Valdelirios de Ayacucho, 2022* [Tesis de pregrado]. Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga.
- Park, S., Fu, L., & Seo, H. (2025). Automatic damage detection in 19th–20th century heritage buildings using R-C-C fusion machine learning with 3D laser scanning. *Developments in the Built Environment*, 24, 100799. <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2025.100799>
- Penjor, T., Banihashemi, S., ... Golzad, H. (2024). Heritage building information modeling (HBIM) for heritage conservation: Framework of challenges, gaps, and existing limitations of HBIM. *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*, 35, e00366. <https://doi.org/10.1016/j.daach.2024.e00366>
- Pepe, M., Alfio, V. S., & Costantino, D. (2022). UAV Platforms and the SfM-MVS Approach in the 3D Surveys and Modelling: A Review in the Cultural Heritage Field. *Applied Sciences*, 12(24), 12886. <https://doi.org/10.3390/app122412886>
- Pereira, C., Silva, A., ... Flores-Colen, I. (2021). Critical Analysis about Emerging Technologies for Building's Façade Inspection. *Buildings*, 11(2), 53. <https://doi.org/10.3390/buildings11020053>
- Pérez Julca, B. D. (2024). *Estudio patológico del edificio de la Universidad Nacional de Cajamarca, sede Cajabamba* [Tesis de pregrado]. Universidad Nacional de Cajamarca.
- Ruiz-De la Cruz, M., Fermín-Calderón, C., ... Asencio, A. D. (2025). A Meta-Analysis of the Biodeterioration by Phototrophic Organisms of Stone Monuments in Latin America [Analiza 43 monumentos en 8 países latinoamericanos. Las Cyanobacteria son los organismos más prevalentes, favorecidas por condiciones microclimáticas de temperatura, humedad relativa y radiación solar]. *Caribbean Journal of Science*, 55(2), 336-356. <https://doi.org/10.18475/cjos.v55i2.a5>
- Sacco, G. L. S., Battini, C., & Calderini, C. (2024). A case study of preliminary damage detection of two heritage vaults through geometric deformation analysis on 3D point clouds. *Structures*, 68, 107175. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2024.107175>
- Tejedor, B., Lucchi, E., ... Nardi, I. (2022). Non-destructive techniques (NDT) for the diagnosis of heritage buildings: Traditional procedures and futures perspectives. *Energy and Buildings*, 263, 112029. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112029>
- Tysiãc, P., Sieńska, A., ... 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*, 11, 53. <https://doi.org/10.1186/s40494-023-00897-5>

- Veronika's Adventure. (2023). Ayacucho: Templos Coloniales, Retablos y Arquitectura [Blog de turismo]. Consultado el 28 de abril de 2025, desde <https://veronikasadventure.com/ayacucho-colonial-temples-altarpieces-and-architecture/>
- Vizcaíno Hernández, I. E. (2024). *Deterioro del patrimonio edificado a causa de patologías acumulativas: Desarrollo de eflorescencias en elementos constructivos de mampostería* [Tesis doctoral]. Universidad Autónoma de Aguascalientes.
- Westoby, M. J., Brasington, J., ... Reynolds, J. M. (2012). 'Structure-from-Motion' photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology*, 179, 300-314. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.08.021>
- Yao, J., Wang, L., ... Hao, J. (2025). Research on the use of UAV-inclined photography and 3D laser scanning in the digital conservation of historic structures: A case study of Shaoxing Lvfu. *Results in Engineering*, 28, 107507. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.107507>
- Yaşar Yiğit, A., & Uysal, M. (2024). Automatic crack detection and structural inspection of cultural heritage buildings using UAV photogrammetry and digital twin technology. *Journal of Building Engineering*, 94, 109952. <https://doi.org/10.1016/j.job.2024.109952>
- Zeballos-Velarde, C., Rodríguez Quiroz, C., ... Rios Pacheco, E. (2020). Surveying Heritage with Affordable Yet Accurate Methods. A Study Case from Arequipa, Peru. *Environmental Science & Sustainable Development*, 5(1), 14-24. <https://doi.org/10.21625/essd.v5i1.714>

6. ANEXOS

6.1. Panel fotográfico del levantamiento fotogramétrico UAV

Figura 88

Preparación del equipo UAV Autel Robotics XT705 en la plaza adyacente a la Iglesia Santa Teresa



Nota. Imagen propia.

Figura 89

UAV Autel Robotics XT705 y maletín de transporte frente a la fachada principal



Nota. Imagen propia.

Figura 90

Ejecución del vuelo fotogramétrico – Vista frontal de la portada principal



Nota. Imagen propia. El operador controla el UAV Autel Robotics XT705 durante el levantamiento fotogramétrico

Figura 91

Ejecución del vuelo fotogramétrico – Vista desde el costado derecho de la fachada



Nota. Imagen propia. Operador controla el UAV Autel Robotics XT705

Figura 92

Ejecución del vuelo fotogramétrico – Captura del muro lateral izquierdo



Nota. Imagen propia. Control del UAV Autel Robotics XT705 durante la trayectoria oblicua perimetral sobre el muro lateral izquierdo de mampostería de piedra de la Iglesia Santa Teresa de Ayacucho.

Figura 93

Investigador con el UAV listo para iniciar el levantamiento – Vista general del área de trabajo

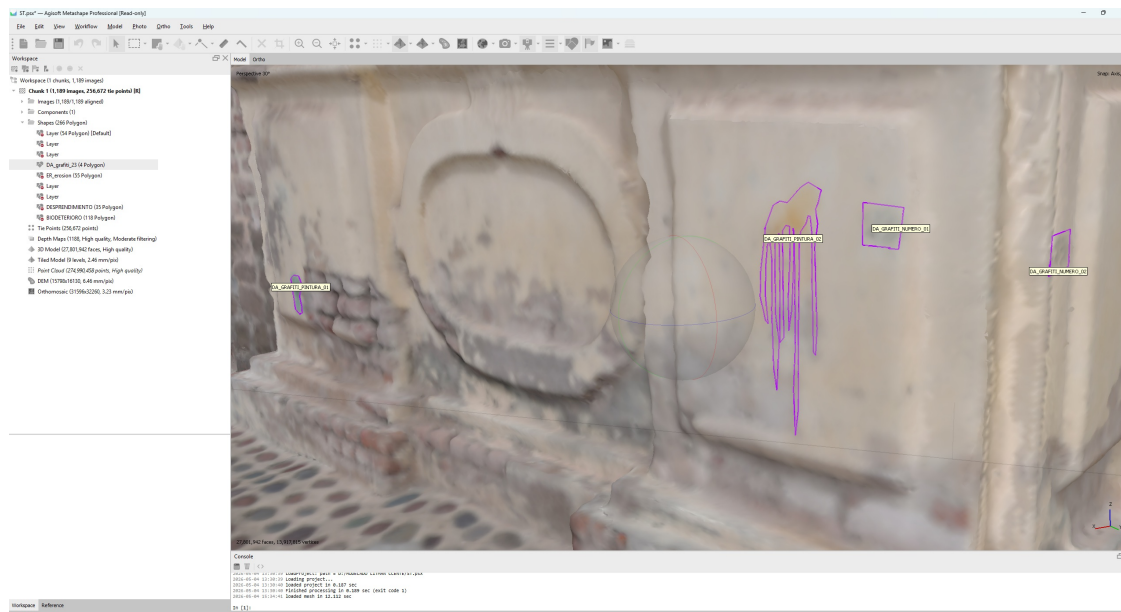


Nota. Imagen propia. UAV Autel Robotics XT705 en posición de verificación preflight frente al muro lateral izquierdo y la portada principal de la Iglesia Santa Teresa de Ayacucho.

6.2. Patologías identificadas en la Iglesia Santa Teresa de Ayacucho

Figura 94

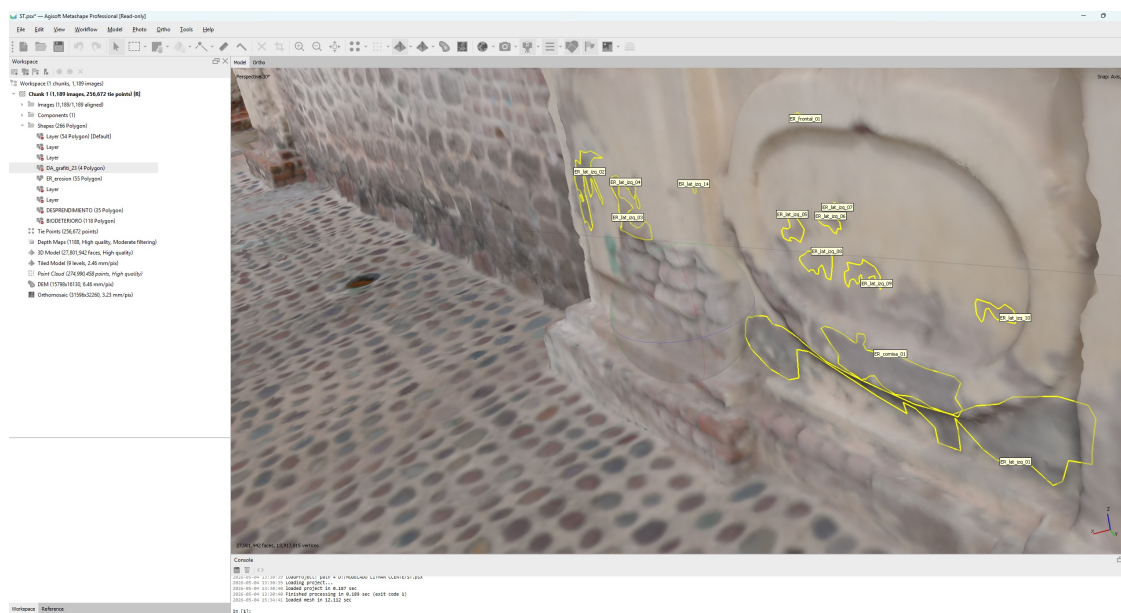
Daño antrópico por vandalismo (DA) Muro lateral izquierdo, Nivel 0 (basamento) Iglesia Santa Teresa de Ayacucho



Nota. Polígonos en color morado delimitan las 4 intervenciones de grafiti

Figura 95

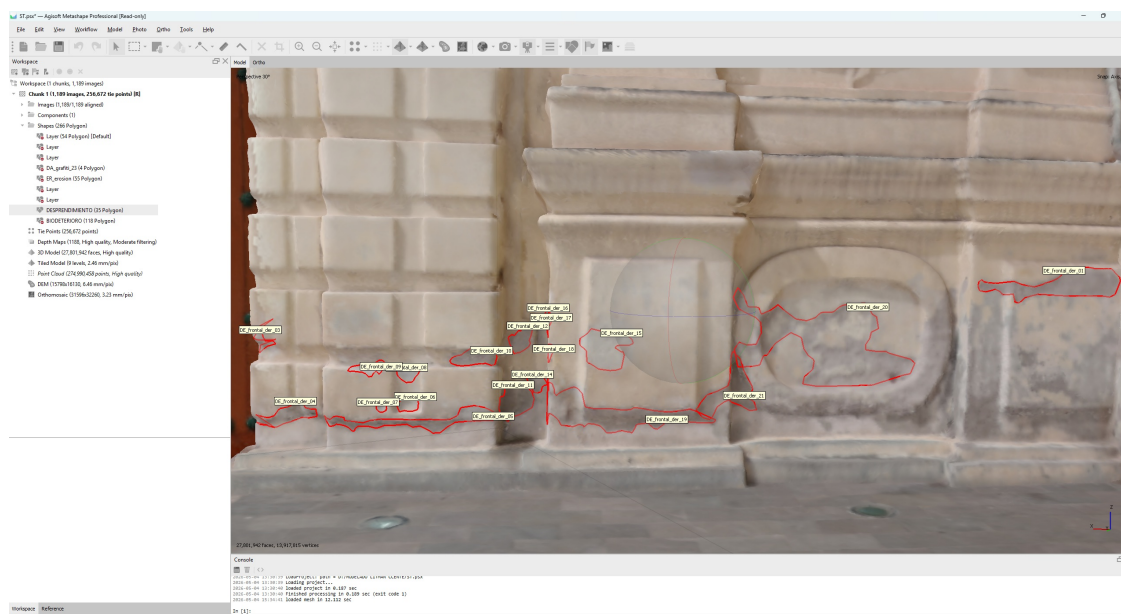
Erosión superficial (ER) Muro lateral izquierdo y cornisa Iglesia Santa Teresa de Ayacucho



Nota. Imagen propia adaptado de Polígonos en color amarillo delimitan las zonas de erosión superficial

Figura 96

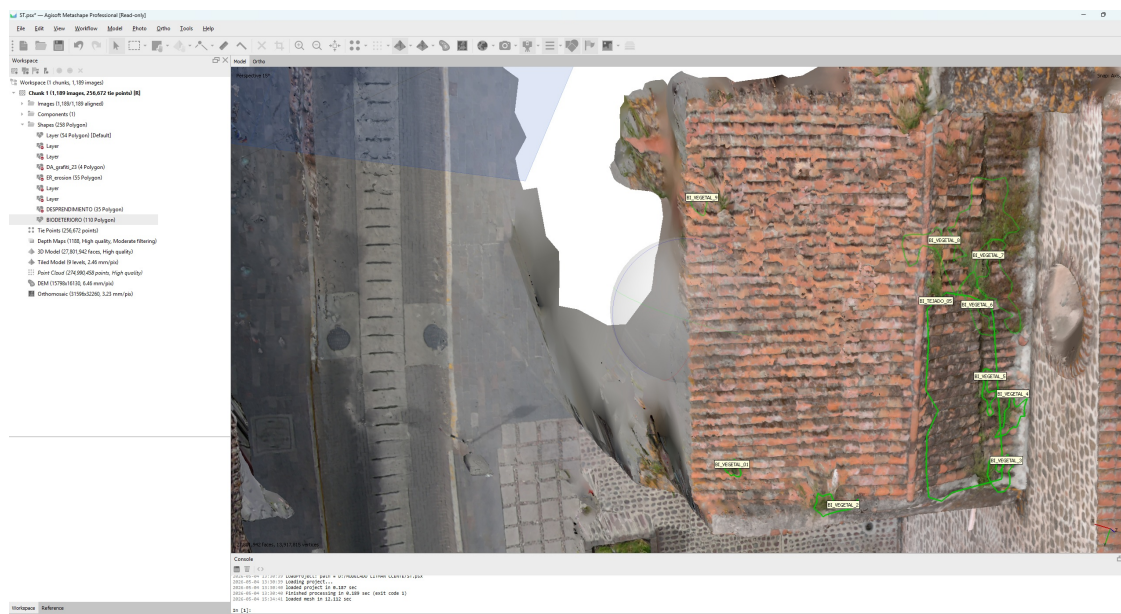
Desprendimiento de revestimiento (DE) Fachada frontal y portada principal Iglesia Santa Teresa de Ayacucho



Nota. Polígonos en color rojo delimitan las zonas de desprendimiento

Figura 97

Biodeterioro por vegetación (BI:VEGETAL) Cubierta lateral y borde de tejado Iglesia Santa Teresa de Ayacucho



Nota. Polígonos en color verde delimitan las fuentes de vegetación.

Anexo 1: Matriz de consistencia

Cuadro 23

Matriz de consistencia

Problema principal	Objetivo general	Hipótesis general	Variables	Metodología
¿En qué medida la evaluación fotogramétrica con drones permite identificar los daños estructurales de la Iglesia Santa Teresa de la ciudad de Ayacucho?	Identificar los daños estructurales de la Iglesia Santa Teresa de la ciudad de Ayacucho a partir de la evaluación fotogramétrica con drones.	La evaluación fotogramétrica con drones es un método efectivo y preciso para identificar y analizar los daños estructurales en la Iglesia Santa Teresa de la ciudad de Ayacucho, superando la efectividad de los métodos tradicionales de inspección.	Independiente (X): Métodos no invasivos	Método, Orientación, Enfoque: – Deductivo, aplicada, cuantitativo Tipo/Alcance, Nivel: – Descriptivo, aplicativo Diseño: – No experimental-observacional, transversal, retrospectivo, estudio de caso único
Problemas específicos	Objetivos específicos	Hipótesis específicas	Dimensiones: – X1: Fotogrametría UAV – X2: Fotogrametría computacional SfM-MVS – X3: Inspección visual sistemática georreferenciada	Población: – 33 iglesias coloniales del Centro Histórico de Ayacucho
¿Cuáles son las dimensiones y características de los diversos daños que afectan a la estructura de la Iglesia Santa Teresa en la ciudad de Ayacucho?	Determinar la dimensión de los diversos daños que afectan a la estructura de la Iglesia Santa Teresa en la ciudad de Ayacucho.	La evaluación fotogramétrica con drones permitirá identificar y medir con precisión las dimensiones de los diversos daños que afectan a la estructura de la Iglesia Santa Teresa en la ciudad de Ayacucho.	Dependiente (Y): Detección y análisis de daños	Muestra: – Iglesia Santa Teresa de Ayacucho
¿Cuál es el nivel de precisión de la fotogrametría con UAV (drones) en la evaluación de daños en el monumento histórico Iglesia Santa Teresa en la ciudad de Ayacucho?	Determinar la precisión de la fotogrametría con UAV (drones) para la evaluación de daños al monumento histórico Iglesia Santa Teresa en la ciudad de Ayacucho.	La fotogrametría con UAV (drones) proporciona un nivel de precisión superior a los métodos convencionales de inspección visual en la evaluación de daños estructurales en la Iglesia Santa Teresa.	Dimensiones: – Y1: Clasificación de patologías – Y2: Extensión del daño – Y3: Localización del daño	Tipo de muestreo: – No probabilístico intencional Instrumento: – UAV Autel Robotics XT705 Software: – Agisoft Metashape Professional v2.3.1

Nota. Elaboración propia.

Anexo 2: Matriz de operacionalización de variables

Cuadro 24

Matriz de operacionalización de variables

Variable	Dimensión	Indicadores	Unidad de medida
Variable Independiente (X): Métodos no invasivos	X1: Fotogrametría UAV	Resolución espacial de imagen (GSD)	mm/píx
		Porcentaje de solapamiento longitudinal y transversal	%
		Número de imágenes capturadas	Unidad (und)
	X2: Fotogrametría computacional SfM-MVS	Densidad de la nube de puntos densa	pts/m ²
		Error de reproyección del modelo (RMSE)	mm
		Resolución del ortomosaico generado	mm/píx
	X3: Inspección visual sistemática georreferenciada	Número de estaciones de registro fotográfico	Unidad (und)
		Cobertura espacial del recorrido de inspección	Metros lineales (ml)
		Precisión de georreferenciación GPS	± m
	Variable Dependiente (Y): Detección y análisis de daños	Y1: Clasificación de patologías	Número de tipos de patología identificados
Número de polígonos digitalizados por tipo de patología			Unidad (und)
Nivel de severidad por patología			Escala ordinal
Y2: Extensión del daño		Área afectada por tipo de patología	m ²
		Porcentaje de superficie afectada por zona de fachada	%
		Longitud de fisuras registradas	Metros lineales (ml)
Y3: Localización del daño		Número de zonas con presencia de patología	Unidad (und)
		Distribución espacial por sector de fachada	Coordenadas UTM (m)
		Concentración de daño por zona	m ² /zona

Nota. Elaboración propia.

SOLICITO: Permiso para sobrevuelo con dron en la Iglesia Santa Teresa

SEÑOR: Arzobispo de Ayacucho

Yo, Litman Ccente Garzon, identificado con DNI N° 47779882, bachiller en Ingeniería Civil por la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga.

Me dirijo a usted con el debido respeto, para saludarlo cordialmente y a la vez solicitar su autorización para realizar un breve sobrevuelo con dron en el perímetro de la Iglesia Santa Teresa, en la ciudad de Ayacucho.

Esta actividad tiene una duración estimada de 10 minutos y forma parte del desarrollo de mi tesis de pregrado titulada: "Aplicación de métodos no invasivos en la detección y análisis de daños en bienes patrimoniales, Ayacucho – 2024", la cual cuenta con la resolución decanal correspondiente que adjunto a la presente.

El propósito de este sobrevuelo es captar imágenes aéreas que permitirán evaluar el estado actual del monumento histórico, contribuyendo así a su preservación y futura reconstrucción. Comprendiendo que en este recinto habitan religiosas, me comprometo a realizar el trabajo con total respeto, discreción y en coordinación con la persona responsable del lugar, evitando cualquier tipo de alteración a la vida cotidiana de la comunidad religiosa.

Agradezco de antemano su comprensión y quedo atento a cualquier disposición adicional que considere necesaria.

Sin otro particular, me despido reiterando mis saludos y agradecimiento por su atención.

Ayacucho, 07 de abril del 2025

Atentamente,



Litman Ccente Garzon

ARZOBISPADO DE AYACUCHO	
MESA DE PARTES	
RECIBIDO	
Fecha: 07 ABR 2025	
Folio: <i>[Handwritten]</i>	Hora: 10:30
Firma: <i>[Handwritten]</i>	

SOLICITO: Permiso para sobrevuelo con dron en la Iglesia Santa Teresa

SEÑORA: REVERENDA MADRE PRIORA CARMEN ROSA

Yo, Litman Ccente Garzon, identificado con DNI N.º 47779882, bachiller en Ingeniería Civil por la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, me dirijo a usted con el debido respeto para solicitar autorización de sobrevuelo con dron en las instalaciones de la Iglesia Santa Teresa, bien considerado de valor histórico y patrimonial.

La actividad consiste en un sobrevuelo de aproximadamente 10 minutos, cuyo propósito es evaluar el estado actual del monumento histórico, contribuyendo así a su preservación, documentación técnica y futura reconstrucción en caso sea necesaria. El registro aéreo a capturar forma parte del desarrollo de mi tesis de pregrado titulada: "APLICACIÓN DE MÉTODOS NO INVASIVOS EN LA DETECCIÓN Y ANÁLISIS DE DAÑOS EN BIENES PATRIMONIALES, AYACUCHO – 2025".

Se garantiza que el vuelo será ejecutado respetando todas las medidas de seguridad y sin interferir con las actividades religiosas, preservando la integridad física y espiritual del recinto.

Agradezco de antemano su atención a la presente solicitud y quedo a disposición para coordinar la fecha y hora que usted considere más adecuada para la realización del sobrevuelo.

Ayacucho 29 de noviembre de 2025



LITMAN CCENTE GARZON
D.N.I. N° 47779882
N° Teléfono: 946759130



Carmen Rosa
29/11/25



UNSCH

FACULTAD DE
INGENIERÍA
DE MINAS, GEOLOGÍA Y CIVIL

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS N° 14-2026-FIMGC

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO DE CIVIL

En la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, en la ciudad de Ayacucho, en cumplimiento a la **Resolución Decanal No 059-2026-FIMGC-D**, a los **veintinueve días del mes de abril de 2026**, siendo las **10:00 a.m.**, reunidos en el **Auditorio de la Escuela Profesional de Ingeniería Civil**, bajo la presidencia del **MSc. Ing. José Ernesto ESTRADA CÁRDENAS**, y los miembros: **MSc. Ing. Victor BELLIDO AEDO**, **Mg. Ing. Moisés Nico BARBARAN ORIUNDO** y **Ing. Saul Walter RETAMOZO FERNANDEZ**, actuando como secretario docente el **Ing. Alex Sander IRCAÑAUPA HUAMANÍ**, para proceder a la sustentación de tesis para optar el **Título Profesional de Ingeniero de Civil**, del Bachiller en Ciencias de la Ingeniería de Civil:

Litman CCENTE GARZON

Quien presentó la tesis denominada:

APLICACIÓN DE MÉTODOS NO INVASIVOS EN LA DETECCIÓN Y ANÁLISIS DE DAÑOS EN BIENES PATRIMONIALES, AYACUCHO-2024

Los señores miembros del jurado luego de expuesta la tesis y absueltas las preguntas, deliberaron y declararon:

Aprobado con 15 (quince)

Siendo las **11:56** del día **29 de abril del 2026**, culmina el acto de sustentación de tesis, y en conformidad de lo actuado los miembros del jurado firmamos al pie del presente.

MSc. Ing. José Ernesto ESTRADA CÁRDENAS
Presidente

MSc. Ing. Victor BELLIDO AEDO
Miembro

Ing. Saul Walter RETAMOZO FERNANDEZ
Miembro

Mg. Ing. Moisés Nico BARBARAN ORIUNDO
Miembro - Asesor

Ing. Alex Sander IRCAÑAUPA HUAMANÍ
Secretario

FACULTAD DE INGENIERÍA
DE MINAS Y CIVIL
Av. Independencia S/N
Ciudad Universitaria
Central Tel. 066 312510
Anexo 151



CONSTANCIA DE ORIGINALIDAD DE TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

CONSTANCIA N° 08-2026-FIMGC/ASIH

El que suscribe; responsable verificador de originalidad de trabajos de tesis de pregrado con el software Turnitin, de la Escuelas Profesional de **Ingeniería Civil** de la **Facultad de Ingeniería de Minas, Geología y Civil**; en cumplimiento a la **Resolución de Consejo Universitario N° 039-2021-UNSCH-CU**, Reglamento de Originalidad de Trabajos de Investigación de la Universidad Nacional San Cristóbal de Huamanga y **Resolución Decanal N° 697-2024-FIMGC-UNSCH-D**, dejo constancia de originalidad de trabajo de investigación, que el/la Sr./Srta.

Apellidos y Nombres : Litman CCENTE GARZON
Escuela Profesional : INGENIERÍA CIVIL
Título de la Tesis : Aplicación de métodos no invasivos en la detección y análisis de daños en bienes patrimoniales, Ayacucho-2024
Evaluación de la Originalidad : 4 % Índice de Similitud
Identificador de la entrega : 2961261739

Por tanto, según los Artículos 12, 13 y 17 del Reglamento de Originalidad de Trabajos de Investigación, es **PROCEDENTE** otorgar la **Constancia de Originalidad** para los fines que crea conveniente.

En señal de conformidad y verificación se firma la presente constancia

Ayacucho, 14 de mayo del 2026



UNIVERSIDAD NACIONAL DE
SAN CRISTÓBAL DE HUAMANGA
Facultad de Ingeniería de Minas, Geología y Civil

Mg. Ing. Alex Sander IRCANAUPA HUAMANT
Verificador de Originalidad de Trabajos de Tesis de Pregrado
Escuela de Formación Profesional de Ingeniería Civil

Aplicación de métodos no invasivos en la detección y análisis de daños en bienes patrimoniales, Ayacucho-2024

por Litman CCENTE GARZON

Fecha de entrega: 14-may-2026 12:32p. m. (UTC-0500)

Identificador de la entrega: 2961261739

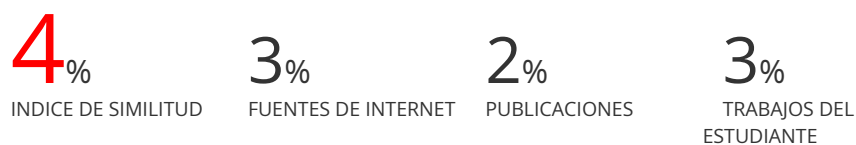
Nombre del archivo: Te_Litman_Ccente_Garzon.pdf (39.96M)

Total de palabras: 42079

Total de caracteres: 258597

Aplicación de métodos no invasivos en la detección y análisis de daños en bienes patrimoniales, Ayacucho-2024

INFORME DE ORIGINALIDAD



FUENTES PRIMARIAS

1	Submitted to Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga Trabajo del estudiante	2%
2	hdl.handle.net Fuente de Internet	<1%
3	appddpadigital.agn.gob.pe Fuente de Internet	<1%
4	andina.pe Fuente de Internet	<1%
5	repositorio.unc.edu.pe Fuente de Internet	<1%
6	digibug.ugr.es Fuente de Internet	<1%
7	repositorio.unsch.edu.pe Fuente de Internet	<1%
8	rcta.unah.edu.cu Fuente de Internet	<1%
9	documentop.com Fuente de Internet	<1%
10	repositorio.continental.edu.pe Fuente de Internet	<1%
11	repositorio.usil.edu.pe Fuente de Internet	<1%
12	actualidadcanetana.blogspot.com Fuente de Internet	<1%
13	caballerosdelaordendelsol.blogspot.com Fuente de Internet	<1%
14	repositorio.uti.edu.ec Fuente de Internet	<1%

15 repositorio.unjbg.edu.pe <1 %
Fuente de Internet

16 Submitted to unsaac <1 %
Trabajo del estudiante

17 Abad, Carla Alejandra Márquez | Mendives, Carla Daniel Osores. "Proyecto de ley Para Generar Vivienda Digna a Favor de la Población Asentada en Los Sitios Arqueológicos en el Perú", Pontificia Universidad Católica del Peru (Peru), 2022 <1 %
Publicación

18 Submitted to Universidad Catolica Los Angeles de Chimbote <1 %
Trabajo del estudiante

19 dspace.ucuenca.edu.ec <1 %
Fuente de Internet

20 es.unionpedia.org <1 %
Fuente de Internet

Excluir citas

Activo

Excluir coincidencias < 30 words

Excluir bibliografía

Activo