Desarrollo de un Modelo Tridimensional que Identifique las Características del Puente Chipichape para Apoyar su Preservación y Conservación

García Solís Hilary Nahomi

Murillo Garcias Ana María

Director: MSc. Jorge Hernán Navarro

Codirector: MSc. Cesar Edwin García

Universidad del Valle

Facultad de Ingeniería

Programa de Ingeniería Topográfica

2025

Dedicatoria

A mis padres, hermanas y toda mi familia, por su incondicional apoyo y amor en cada paso de este camino, además de ser un ejemplo de admiración para mí. A mis amigos, por ser mi refugio y fuente de risas en los momentos difíciles. A mi amiga y compañera desde el primer día de clase, por ser mi apoyo constante y la mejor colega en este camino académico, este trabajo refleja nuestro gran esfuerzo y dedicación. Finalmente, a mí misma, por cada momento de duda superado y cada sacrificio realizado, me dedico este trabajo como un recordatorio de mi fuerza interior y mi capacidad para alcanzar cualquier meta que me proponga. Que este sea solo el comienzo de una vida llena de éxitos y satisfacciones.

Dedicatoria

Gracias a Dios por permitirme el ingreso y la permanencia dentro de una de las mejores universidades del país. A mi familia, cuyo apoyo incondicional han sido la base de todos mis logros y mi pilar en los momentos de adversidad. Gracias a mis amigos por la contención cuando más lo necesitaba, por las palabras de aliento en cada paso del camino. Gracias a mi compañera que ha estado conmigo en cada momento y en cada paso de la carrera y ahora también en el cierre de esta etapa. Finalmente, a cada uno de los profesores que se tomaron la tarea de enseñarnos con el corazón y nos dedicaron lo más valioso de sí mismos a nuestra formación. Esta tesis es tanto mía como de ustedes, porque sin su respaldo, nada de esto sería posible.

Agradecimientos

Con profundo agradecimiento, nos dirigimos a nuestras familias, ya que sin su apoyo incondicional y motivación no estaríamos celebrando este logro ahora. Nuestra gratitud se extiende a la Universidad del Valle, nos quedamos con la excelencia académica y el fomento para ser los mejores. Finalmente, extendemos nuestra más sincera gratitud a nuestros directores de tesis, Cesar Edwin García y Jorge Hernán Navarro. Su dedicación y su guía han sido fundamentales en la dirección de este trabajo.

Resumen

La documentación y análisis de bienes patrimoniales son fundamentales para su preservación a lo largo del tiempo. En este proyecto se busca identificar las características y el estado de conservación del puente Chipichape mediante el desarrollo de un modelo tridimensional. La metodología se llevó a cabo en dos etapas, la planificación y captura de la información con la metodología SfM para la fotogrametría aérea y terrestre en una primera etapa. A continuación, en la segunda etapa, se efectuó el procesamiento y modelado 3D siendo pasos claves la selección de las fotografías, la limpieza de las nubes de puntos y la fusión de los datos aéreos y terrestres. Los resultados muestran que la combinación de técnicas fotogramétricas aérea y terrestre permiten documentar el patrimonio y detallar las zonas críticas de la estructura de una manera poco invasiva. Esto constituye un soporte empírico para comprender la integración de datos fotogramétricos y su aplicabilidad en la documentación tridimensional del patrimonio cultural.

***Palabras clave*:** Patrimonio, Fotogrametría, Modelo, Preservación, 3D.

Abstract

The documentation and analysis of heritage assets are essential for their preservation over time. This project seeks to identify the characteristics and state of conservation of the Chipichape Bridge through the development of a three-dimensional model. The methodology was carried out in two stages, the planning and capture of information with SfM methodology for aerial and terrestrial photogrammetry in the first stage. Then, in the second stage, the 3D processing and modeling was carried out, being key steps the selection of the photographs, the cleaning of the point clouds and the fusion of the aerial and terrestrial data. The results show that the combination of aerial and terrestrial photogrammetric techniques allows documenting the heritage and detailing the critical areas of the structure in a non-invasive way. This provides empirical support for understanding the integration of photogrammetric data and its applicability in the three-dimensional documentation of cultural heritage.

***Keywords*:** Heritage, Photogrammetry, Model, Preservation, 3D.

Tabla de Contenido

Introducción....10

Planteamiento del Problema....12

Objetivos....16

- Objetivo General....16
- Objetivos específicos....16

Justificación....17

Marco Teórico....21

- Fotogrametría....21
- Traslape....21
- GSD....21
- GNSS RTK....21
- SIFT-SURF....22
- RANSAC....22
- Triangulación....23
- Structure-for-Motion (SfM)....23
- MVS (Multi-View Stereo)....23
- Bundle Adjustment....24
- Valor Histórico....24
- Patrimonio Tangible e Intangible....25
- Bienes Culturales....25
- Patrimonio Cultural....25
- Conservación....26

Restauración....26
Preservación....27
Marco Referencial....28
Área de Estudio....33
Materiales....36
Métodos....39
Etapa 1 Captura de Datos....40
Planificación de la captura....40
Obtención de datos de campo....41
Etapa 2 Procesamiento de la información y modelado 3D....45
Organización y selección de datos....45
Alineación de fotografías....46
Generación de nube de puntos densa....47
Limpieza de la nube de puntos....47
Fusión de las nubes de puntos....48
Creación de malla y textura....48
Resultados....50
Discusiones....62
Conclusiones....64
Recomendaciones....66
Bibliografía....68
Apéndice....74

Lista de Figuras

Figura 1 *Mapa de Localización* 34

Figura 2 *Puente Chipichape vista adelante*.....35

Figura 3 *Cámara Insta 360* 37

Figura 4 *Algoritmos de SIFT y SURF*.....37

Figura 5 *Estación total South N6* 38

Figura 6 *Flujo metodológico*.....39

Figura 7 *Cálculo de sombra en Shademap*.....40

Figura 8 *Mapa de distribución puntos de control*.....42

Figura 9 *Posición de las fotografías tomadas con dron*.....42

Figura 10 *Captura de Fotografías con cámara Insta360* 44

Figura 11 *Esquema de posición de la cámara* 44

Figura 12 *Posición fotografías tomadas con cámara insta360* 45

Figura 13 *Clasificación según la calidad de las imágenes* 46

Figura 14 *Tiled model generado por la alineación de imágenes* 47

Figura 15 *Limpieza de nube de puntos*.....48

Figura 16 *Edición de modelo 3D en Blender*.....49

Figura 17 *Modelo en vista general*.....51

Figura 18 *Deterioros observados en el puente* 52

Figura 19 *Representación cartográfica de vista en planta*.....57

Figura 20 *Representación cartográfica en sentido del eje vial* 57

Figura 21 *Representación cartográfica en sentido del eje vial* 58

Lista de Tablas

Tabla 1 *Comparación estado del Puente Chipichape (2009 vs. Actualidad)*.....53

Tabla 2 *Imágenes comparativas entre la ficha de 2009 y el modelo actual*.....53

Tabla 3 *Coordenadas de puntos tomados en campo*.....59

Tabla 4 *Coordenadas de puntos tomados sobre el modelo*.....60

Introducción

La (UNESCO, s. f.) establece que los patrimonios culturales no se limitan a objetos inamovibles o colecciones de objetos, sino que estos comprenden también las tradiciones o expresiones que se han venido transmitiendo y es por esto que la expresión de patrimonio cultural o bien de interés cultural ha venido cambiando con los años. En este contexto, tanto en el país como en la ciudad existe una diversidad de patrimonios culturales que representan, conservan y comprenden nuestro pasado.

La ciudad de Santiago de Cali es un lugar que se destaca por su rica diversidad de bienes de interés cultural. Esta ciudad colombiana protege una historia que se ve reflejada en sus edificios históricos, monumentos y sitios arqueológicos. Para los habitantes y las autoridades la conservación de estos bienes no es solamente prioridad, sino también un compromiso esencial. Este esfuerzo busca no solo preservar su legado histórico, sino también mantener viva la diversidad de significados culturales que conforman su identidad y enriquecen su presente.

Por otro lado, la fotogrametría ha demostrado ser una tecnología altamente efectiva para obtener datos geométricos y métricos precisos de construcciones arquitectónicas. (Salinas Niacato, 2023) Identifico que esta herramienta se ha consolidado como recurso fundamental en diversos campos, especialmente en la protección y preservación del patrimonio cultural. Las imágenes terrestres y aéreas de alta resolución son una necesidad fundamental para este proyecto, puesto que es relevante tener una cartografía precisa y un análisis de las relaciones espaciales que se disponen (Villar, Candelario y Díaz, 2023). Dicho esto, cabe afirmar que la fotogrametría actúa como una herramienta para monitorear y analizar el estado de deterioro de dichas estructuras, contribuyendo significativamente a su salvaguardia. La Organización de las Naciones Unidas (UNESCO, s. f.) para la educación, la ciencia y la cultura en el año 2012 estableció la noción de patrimonio cultural y natural como un producto y un proceso que provee recursos heredados del pasado para las generaciones futuras. Muchos países, incluyendo España y Chile, han promulgado leyes y normativas para proteger y conservar su patrimonio cultural.

Por ende, el presente proyecto se centra en el marco de la conservación y preservación del patrimonio. Además, se busca emplear metodologías fotogramétricas para la captura de la información actualizada y detallada del estado y características del patrimonio, destacando la

SfM e integrando cámaras 360 que permitan tener una mejor cobertura de la estructura a analizar. Finalmente, es necesario que se desarrolle un modelo tridimensional a un nivel de detalle que permita la identificación de áreas críticas de conservación.

Planteamiento del Problema

La Ley General de Cultura (Ley 373 de 1997) y sus modificaciones introducidas por la Ley 1185 de 2008, establecen que el patrimonio cultural, es un testimonio de la identidad nacional y memorial histórica, el cual debe mantenerse en condiciones óptimas que permiten su salvaguardia, conservación y sostenibilidad. Los artículos 70 y 72 de la constitución política de Colombia, mencionan la protección de las riquezas culturales y naturales de la Nación, así como la promoción al acceso igualitario a la cultura. El Sistema Nacional de Patrimonio Cultural (SNPC) son los encargados de formular las políticas, establecer ciertos lineamientos y garantizar la articulación de los diferentes sectores que están relacionados con la protección de los patrimonios culturales materiales e inmateriales. (Decreto 2358 de 2019 - Gestor Normativo - Función Pública, 2019)

El Decreto Único Reglamentario del Sector Cultural (DUR 1080 de 205) contiene las diversas acciones para la gestión adecuada del patrimonio cultural. Las acciones que se pueden destacar son:

- La implementación de un régimen especial de protección para los bienes de interés cultural (BIC), que incluye la regulación de intervenciones en estos bienes y zonas de influencia, tal como lo estipula el Decreto 1077 de 2015 del sector vivienda.
- La integración de diferentes categorías de patrimonio en los instrumentos de planeación y gestión.
- El fortalecimiento de los instrumentos de protección a través de estrategias de seguimiento y articulación intersectorial.

Los mecanismos anteriores deben garantizar que estos bienes se mantengan en buen estado, bajo un sistema coordinado y sostenible que no solo proteja su integridad, sino que también promueva el acceso para la generaciones presentes y futuras.

El conservar estos bienes contribuye a la construcción de una identidad de cultura y a fortalecer el desarrollo de la sociedad y la economía del país, esto cumpliendo con las obligaciones internacionales y nacional (Departamento Administrativo de Planeación Municipal, 2003).

La ciudad de Santiago de Cali se ha caracterizado por la variedad de bienes de interés cultural, con un total de 263, de los cuales 181 pertenecen a particulares, 79 son

propiedad del distrito y 3 son del sector urbano. El País afirma que la mayoría de estos bienes han permanecido en estado de abandono durante muchos años, sin planes efectivos de mantenimiento ni inversión (El País, 2023).

El deterioro de los bienes culturales no solo afecta su valor estético, sino que también pone en peligro la memoria histórica y la identidad cultural de la región (Fundación de Estudios Internacionales, 2021). Estos bienes de interés cultural, que comprenden monumentos, edificios históricos, sitios arqueológicos y otras manifestaciones culturales, son fundamentales para preservar la historia y el patrimonio cultural. No obstante, se enfrentan a desafíos significativos relacionados con su conservación y protección a lo largo del tiempo. En la actualidad, estos bienes culturales enfrentan amenazas tanto naturales como antropogénicas que ponen en peligro su integridad. Estas amenazas incluyen el deterioro causado por el envejecimiento, la contaminación ambiental, los desastres naturales y la actividad humana, como la urbanización y la falta de conciencia sobre la importancia de la conservación.

El Puente de Chipichape, es un emblema histórico de Cali, este se enfrenta a un deterioro que amenaza su integridad estructural y su valor cultural. Este deterioro se ha visto impuesto por factores ambientales como las frecuentes inundaciones por fuertes lluvias en la zona. Un ejemplo de esto puede ser el pasado mayo del año 2024, una fuerte lluvia provoco una inundación que según las noticias de (Caracol, 2020) estas afectaron tanto el puente como áreas circundantes. Además de esto algunos reportes de (El Tiempo, 2024) evidencian que estas inundaciones no solo comprometen la estructura física del puente, sino que también dificultan su uso y acceso, afectando a la comunidad local.

En una convención realizada por la UNESCO en 1954, se destacan que los daños causados a estos bienes culturales de cualquier parte constituyen una disminución al patrimonio de toda la comunidad (Ministerio de Asuntos Exteriores, Unión Europea y Cooperación de España, s.f.). Por lo que, la preservación del Puente Chipichape no es solo responsabilidad local, sino también un compromiso con la comunidad global para que este patrimonio compartido se pueda salvaguardar.

La falta de información técnica actualizada sobre el estado del Puente de Chipichape dificulta las posibles intervenciones y la formulación de estrategias de conservación. Esto subraya la necesidad de implementar algunas herramientas modernas de evaluación y monitoreo que permitan la gestión eficiente de este bien cultural.

Las repercusiones financieras que tienen el abandono y deterioro de los bienes culturales son significativas. Dado que las intervenciones correctivas suelen ser un poco más costosas que las acciones preventivas, la falta de mantenimiento regular incrementa los costos de restauraciones futuras. El deterioro de los bienes afecta el potencial económico de la ciudad. Las ciudades que priorizan la conservación de sus patrimonios experimentan un beneficio económico directos e indirectos según el Consejo Internacional de Monumentos y Sitios (ICOMOS, 2023).

Por otro lado, los costos de oportunidades que están en conjunto con el deterioro del patrimonio cultural son elevados. La falta de participación limita la capacidad de los bienes para atraer una inversión y promover el desarrollo económico de los sectores como la educación, la cultura, entre otros. Finalmente, sin una intervención adecuada para el deterioro del patrimonio que afecta la imagen pública de ciudad esto podría perpetuar un vínculo vicioso de abandono, deterioro y perdida de oportunidades económicas y sociales para la región.

La fotogrametría ha surgido como una herramienta innovadora y eficiente para abordar estos problemas, debido que permite la creación de modelos tridimensionales que facilitan el poder identificar el deterioro u otro daño en las estructuras. Según (Salinas Niacato, 2023) esta técnica ofrece una precisión de hasta un 95% en la detección de puntos críticos en estructuras patrimoniales. Sin embargo, su aplicación en la ciudad de Cali es limitada, y no se cuenta con un uso sistemático que permita priorizar intervenciones en los bienes culturales más vulnerables.

Además, Garcia Ugalde destaca que la fotogrametría también genera registros digitales que se pueden utilizar para el monitoreo de los cambios a lo largo del tiempo y para la creación de replicas virtuales con fines educativo y no solamente esto, sino que también documenta con exactitud las características arquitectónicas de los bien culturales (Murillo Muñoz, 2018). Su aplicación permite que la conservación del patrimonio no solo mejore la precisión en la documentación, sino que también optimice los costos y gastos en comparación con otras técnicas tradicionales. El poder generar modelos 3D detallados permite evaluar el estado de las estructuras, identificar áreas de deterioro y el planificar estrategias de intervención efectivas (Barberà Giné, 2018).

El implementar la fotogrametría en el caso del Puente de Chipichape podría proporcionar un entendimiento detallado de su estado actual, permitiendo que se identifiquen sus zonas críticas las cuales requieran atención inmediata y facilite la planificación de estrategias de conservación.

Para abordar estas problemáticas del bien de interés, se propone la implementación de las técnicas fotogramétricas, por lo que se utiliza la metodología “Structure from Motion” (SfM), debido a que esta técnica permite que se construya estructuras tridimensionales a partir de una serie de imágenes bidimensionales tomadas desde diferentes ángulos. Para que finalmente se pueda desarrollar un modelo tridimensional del Puente de Chipichape. Según (Pereira Uzal, 2013) el SfM sirve como una herramienta accesible para la protección y documentación del patrimonio. Gracias a su capacidad para obtener información actualizada sobre el estado del puente.

En conclusión, la problemática anterior mencionada evidencia la necesidad de estrategias de conservación efectivas. El que se implementen técnicas de fotogrametría permite el análisis de la estructura, proporcionando una base sólida para la optimización de las intervenciones y garantizar la preservación a largo plazo teniendo en cuenta que se cumplan las normativas establecidas como el Decreto Reglamentario del Sector Cultural y el Decreto 2358 de 2019.

Ante esta situación, se plantea la siguiente pregunta de investigación:

¿Cómo puede la fotogrametría contribuir a identificar las características y zonas críticas mediante el desarrollo de un modelo tridimensional del Puente Chipichape para optimizar las estrategias de conservación y preservación de la estructura?

Objetivos

Objetivo General

Desarrollar un modelo tridimensional del Puente Chipichape con un nivel de detalle que permita identificar características y estado de conservación con alta precisión.

Objetivos específicos

Disponer de una estrategia para la captura de información de bienes culturales, integrando técnicas fotogramétricas.

Combinar modelos fotogramétricos aéreos y terrestres para documentar y preservar el patrimonio cultural con un nivel de detalle que permita la identificación de áreas críticas de conservación.

Evaluar la precisión y el detalle de las zonas críticas identificadas en la estructura.

Justificación

La ciudad de Cali es rica en patrimonio cultural, y uno de sus bienes más valorados es el puente Chipichape, que adquirió el estatus de bien de interés cultural en el año 2016 y fue clasificado como nivel de conservación tipo 2 según la categorización establecida por el Departamento Administrativo de Planeación Municipal en 2009.

El deterioro del Puente de Chipichape, bien de interés cultural de Cali, punto de referencia emblemático que ha dejado una huella indeleble en la historia de la ciudad, plantea un desafío importante para su preservación. Pese a su relevancia histórica como un icono del desarrollo industrial y ferroviario ya que antes servía como la entrada principal de las locomotoras a los talleres de Chipichape, donde eran reparadas por sus propios operadores (Alcaldía de Cali, 2023). Este hecho marcó un periodo importante de la historia industrial y ferroviaria de Cali, contribuyendo significativamente al progreso económico y social de la región. El paso del tiempo y factores ambientales han impactado negativamente su estructura.

Este proceso de deterioro plantea desafíos importantes para la preservación y conservación del puente Chipichape. Esto subraya la necesidad de emplear herramientas tecnológicas avanzadas, como lo es la fotogrametría, para el monitoreo de su estado actual, identificando patologías estructurales, evitar su perdida y comprender su valor en la historia y cultura de Cali (Departamento Administrativo de Planeación Municipal, 2009).

Este proyecto adquiere relevancia al posibilitarnos mantener la información constantemente actualizada, sirviendo como un destacado modelo para que otras regiones, instituciones e incluso individuos se motiven a asignar valor a cada uno de los bienes de interés cultural que, según (López, Ortiz y Sánchez, 2022) este fue uno de los objetivos del Sistema Nacional de Patrimonio Cultural de la Nación (SNPCN). La ejecución de esta iniciativa contribuirá a generar datos pertinentes para la identificación de información del patrimonio Puente de Chipichape.

Los objetivos planteados responden a lo que será el desarrollo de un modelo tridimensional del Puente con un nivel de detalle que permita identificar características y el estado de conservación con alta precisión. Y en línea con este se pudieron establecer algunos propósitos entre los cuales están, disponer de una estrategia para la captura de información de

bienes culturales, hacer una combinación de modelos fotogramétricos tanto aéreos como terrestres con el fin de documentar y preservar el patrimonio con un nivel de detalle que permita la identificación de áreas críticas de conservación y por último, evaluar la precisión y el detalle de las zonas críticas identificadas en la estructura. Además, el proyecto generará un registro que no solo permitirá documentar la condición actual del puente, sino que también permitirá evaluar la evolución con el tiempo esto mediante herramientas de monitoreo.

La implementación de este proyecto tendrá un impacto significativo en la preservación del Puente y en la consolidación de estrategias sostenibles de conservación del patrimonio cultural. Este enfoque responde a lo señalado por (Endere y Prado, 2014), los cuales destacan que la conservación de un patrimonio no solo implica acciones técnicas, sino que también un compromiso ético y la identidad cultural de las comunidades.

Este proyecto plantea algunos beneficios tangibles e intangibles que justifican ampliamente su ejecución, también plantea la valoración de los costos involucrados para lograr un balance entre inversión y resultados. Entre los tangibles se encuentra la preservación estructural del bien de interés la intervención permitirá que se garantice la estabilidad física del puente, según los planteamientos de (García y Pacheco, 2018), el restaurar los bienes culturales no solo prolonga la vida útil de estos, sino que también reduce costos futuros de manteamiento. Otro beneficio sería el incremento en el turismo ya que este fomenta la llegada de los visitantes nacionales e internacionales, generando un impacto positivo en la economía local. Estudios como los de (Pérez de Arce et al., 2017) resalta como los proyectos de restauración de bienes patrimoniales repercuten directamente en el crecimiento económico de las comunidades cercanas. En cuanto a los intangibles la intervención permitirá que se rescate el puente como símbolo histórico. También promoverá el desarrollo sostenible mediante practicas consideradas con el medio ambiente, en consonancia con (Lozano Serna et al., 2018). Finalmente, se incentiva la valoración del patrimonio cultural mediante actividades de sensibilización comunitaria, como lo sugiere (Flórez Cardona et al., 2023).

Por otro lado, el proyecto implica costos significativos, aunque plenamente justificados por los beneficios que aporta. La inversión en tecnologías avanzadas como la metodología “Structure from Motion” (SfM) garantizará diagnósticos precisos, tal como (del Río Santana et al., 2020) argumentan al señalar que estas herramientas, aunque costosas inicialmente, reducen errores y costos a largo plazo. También será necesario planificar el mantenimiento

periódico del puente para asegurar su conservación, una medida indispensable según Paredes (2019), quienes resaltan la importancia de asignar recursos para el monitoreo constante. Además, se requerirá la contratación de personal especializado en restauración y conservación, lo que representa un gasto elevado pero fundamental para garantizar la calidad de la intervención, como lo sostienen Terán (2004). Estos costos, aunque significativos, son esenciales para garantizar la sostenibilidad y el éxito del proyecto.

Adicionalmente, se han tenido en cuenta casos de éxito como el de (Quenta Amones, 2022) quien determinó en su investigación que la aplicación de las herramientas tecnológicas como la fotogrametría mejoran significativamente la captura de la geometría de edificaciones para gestión y preservación de bienes culturales encontrando resultados altamente importantes como el estado real y actual del patrimonio, identificando patologías y el alto riesgo de pérdida total. De la misma forma (Echavez Rocha y Poveda Atencia, 2022) afirma que la implementación de dicha metodología actúa como una base de datos que permite almacenar datos locales como en la nube para proyectos de mantenimiento a corto y largo plazo, además, aseveran que la implementación de fotogrametría para la creación del modelo 3D fue una herramienta poco invasiva para la captura de la información.

Se puede afirmar que, en la actualidad, el patrimonio cultural se presenta como un requisito fundamental para el progreso socioeconómico y la consolidación de la identidad cultural de una comunidad. En este sentido, la comprensión, divulgación y creación de este patrimonio se erigen como la manera primordial en que la humanidad se expresa y se conecta con su legado y singularidad cultural. Es por esto por lo que (Soto Suárez, Muñoz Castillo, y Morcate Labrada, 2014), mencionan que la conservación del patrimonio cultural representa un campo avanzado que aún demanda nuevas técnicas y enfoques conceptuales y que, para su análisis y abordaje, es esencial adoptar enfoques integrales y multidisciplinarios, ya que trasciende la mera consideración de elementos naturales, construidos o susceptibles de exhibición en museos. Su alcance abarca dimensiones más amplias que involucran a la sociedad en su totalidad.

En virtud de lo anterior, la razón fundamental es identificar y documentar la información del bien de interés cultural para su preservación, utilizando fotogrametría aérea y terrestre. Los beneficios derivados de esta iniciativa incluyen la preservación del patrimonio, en particular del Puente de Chipichape, la actualización de información para su gestión y la función que

incentiva a otros interesados a emprender iniciativas similares. Los beneficiarios directos de este proyecto son la comunidad local de Santiago de Cali, diversas instituciones culturales dedicadas a la preservación del patrimonio, que pueden aprovechar los resultados y métodos para mejorar sus prácticas, así como investigadores y académicos que encontrarán datos valiosos para sus intereses en este tema.

Marco Teórico

Fotogrametría

La fotogrametría se define como una técnica que brinda la ventaja de alcanzar gran realismo de los objetos para realizar modelos en 3D, obtener volúmenes, medidas tridimensionales, modelos digitales de terreno, mapas y ortomosaicos a través de la fotogrametría digital y las texturas que se obtienen a partir de fotografías (Caro Herrero, 2012).

Traslape

El termino traslape se refiere la superposición entre imágenes consecutivas a lo largo de la misma línea de vuelo. Según (Kraus, Harley, & Kyle, 2007), se recomienda un traslape longitudinal del 60-80% para asegurar una buena cobertura y redundancia de datos.

GSD

Según USGS los puntos de control se definen como puntos de ubicación conocida sobre la superficie, además según (Gómez Ávalos, 2020) estos puntos deben permanecer visibles en el momento del vuelo para que queden registrados en las fotografías y de esta manera puedan ser georreferenciados.

GNSS RTK

Las redes RTK (Real-Time Kinematic) se componen de receptores GNSS permanentes distribuidos en un área extensa. Estas redes unen señales para generar correcciones diferenciales que los receptores móviles pueden emplear en tiempo real, logrando precisiones de 1 a 5 centímetros. Este método utiliza un receptor de referencia y uno móvil, conectados por radio. La estación de referencia transmite datos de los satélites al receptor móvil, que también recibe datos directamente de los satélites. Con estos datos, se resuelven las ambigüedades y se obtiene una posición precisa con relación a la referencia (Baque Solis, Cuadrado Torres, & Palacios Paredes, 2022).

SIFT-SURF

Este algoritmo permite detectar los puntos clave en diferentes escalas que no varían con la rotación, además se realiza encontrando extremos locales en el espacio de escala haciendo uso de la ecuación de diferencia Gaussiana (DoG) (Tareen y Saleem, 2018) como lo muestra la siguiente ecuación:

$$D(x, y, \sigma) = \big(G(x, y, k\sigma) - G(x, y, k\sigma)\big) * I(x, y) \quad (1)$$

Donde:

$D(x, y, k\sigma)$ es la diferencia de Gaussianas.

$G(x, y, k\sigma)$ es la función Gaussiana con desviación estándar σ.

k es la constante de escala.

$I(x, y)$ es la imágen original.

Este algoritmo se ha optimizado para más rapidez con el nombre de SURF, este último utiliza aproximación de la segunda derivada de la Gaussiana para realizar la detección.

RANSAC

El algoritmo RANSAC se utiliza para justar el conjunto de valores atípicos que contiene un modelo, seleccionando aleatoriamente un fragmento de los datos para ajustar un modelo (Flores Tenza, 2018), finalmente evalúa cual es el porcentaje de datos completo que se ajusta al modelo dentro de un margen de error, esto se lleva a cabo mediante la siguiente fórmula:

$$N = \frac{log(1-p)}{log(1-(1-e)^m)} \quad (2)$$

Donde:

N es el número de iteraciones necesarias para garantizar una solución.

p es la probabilidad deseada de que al menos una de las muestras no contenga *outliers*.

e es la probabilidad de que un punto del fragmento sea *outlier*

m es el número de puntos totales.

Triangulación

El proceso de triangulación se lleva a cabo mediante la geometría epipolar calculando las coordenadas 3D de los puntos a partir de sus proyecciones en 2 o más imágenes (Savarese y Fei-Fei, 2007), esto realizado mediante la siguiente formula:

$$X = (A^T A)^{-1} A^T b \qquad (3)$$

Donde:

X son las coordenadas 3D.

A, b representan las coordenadas en las imágenes.

Structure-for-Motion (SfM)

De acuerdo con (Schönberger y Frahm, 2016), se entiende por SfM el proceso de reconstruir una estructura a partir de imágenes capturadas desde distintos puntos obteniendo diferentes proyecciones de esta, basándose en la triangulación y la detección de puntos clave iterando en cada imagen para ajustar las posiciones de la cámara. La geometría epipolar, clave en el SfM, permite calcular la posición de los puntos en el espacio tridimensional.

$$x' \, Fx = 0 \qquad (4)$$

Donde:

x y x' son los puntos clave en las dos imágenes.

F es la matriz fundamental que relaciona las posiciones de las dos cámaras.

MVS (Multi-View Stereo)

Este algoritmo busca que coincidan entre sí regiones similares o iguales en varias imágenes aplicado en diferentes vistas, esto para crear un conjunto de puntos denso

(Furukawa y Hernández, 2015). Además, tiene como objeto partir desde los parámetros intrínsecos y extrínsecos conocidos de una colección de imágenes de una cámara para reconstruir la escena 3D completamente (Wajjari, 2023).

Bundle Adjustment

Se define como un método que busca encontrar la posición de dichas regiones coincididas con el algoritmo MVS, simultáneamente ajusta la geometría de los puntos 3D y los parámetros de la cámara minimizando el error de reproyección (Triggs, McLauchlan, Hartley y Fitzgibbon 2000). El objetivo es minimizar E ajustando tanto P_i como X_j , y se resuelve utilizando métodos iterativos de optimización.

$$E(P, X) = \sum_{i=1}^{m} \sum_{j=1}^{n} D\left(x_{ij}, P_i X_j\right)^2$$

(5)

Donde:

E es el error total de reproyección.

x_{ij} es la posición observada del punto i en la imagen j.

P_i es la matriz de proyección de la cámara i.

X_j es la posición 3D del punto j.

Valor Histórico

El valor histórico de un bien patrimonial se refiere a la importancia de este bien en la historia de una comunidad o civilización, y está determinado por ser un testimonio de los eventos pasados. Según Riegl (1903), el valor histórico está basado en la autenticidad del bien, que permite que este bien actúe como un vínculo entre el presente y el pasado. El uso de tecnologías ayuda a contextualizar los bienes patrimoniales dentro de su entorno original, proporcionando un mayor entendimiento de su función y significado en el pasado (López et al., 2018).

Patrimonio Tangible e Intangible

El patrimonio tangible se refiere a los elementos materiales del patrimonio cultural, como monumentos, edificaciones, artefactos y objetos históricos. Por otro lado, el patrimonio intangible abarca las tradiciones, expresiones, conocimientos y prácticas culturales que son transmitidas de generación en generación, como rituales, lenguas, danzas y música. La Convención de la UNESCO para la Salvaguardia del Patrimonio Cultural Inmaterial (2003) resalta la importancia de proteger ambos tipos de patrimonio, ya que ambos constituyen una parte integral de la identidad cultural de una comunidad. Mientras que el patrimonio tangible puede ser conservado mediante métodos físicos, el intangible se preserva a través de la transmisión de conocimientos y prácticas.

Bienes Culturales

Los bienes culturales son objetos, construcciones, artefactos y manifestaciones que poseen un valor histórico, artístico o social significativo para una comunidad. Según el Consejo Internacional de Monumentos y Sitios (ICOMOS), los bienes culturales pueden ser muebles, como pinturas, esculturas o documentos, o inmuebles, como edificios, monumentos y sitios arqueológicos. La digitalización mediante técnicas fotogramétricas y otras tecnologías de captura 3D permite la conservación virtual de estos bienes, generando réplicas digitales que pueden ser estudiadas sin riesgo de deteriorar el objeto original. Esto permite la creación de archivos que pueden utilizarse tanto en la educación como en la exposición pública, facilitando el acceso global a estos bienes (Poux y Billen, 2019).

Patrimonio Cultural

El patrimonio cultural está compuesto por los bienes, tradiciones y conocimientos que reflejan la identidad y la historia de una sociedad. La UNESCO (2003) define el patrimonio cultural como un conjunto de recursos materiales e inmateriales que son fundamentales para la memoria colectiva y el desarrollo sostenible de las comunidades. La preservación del patrimonio cultural es clave no solo para la protección de estos recursos, sino también para la transmisión de los valores y conocimientos que ellos contienen. El patrimonio cultural no solo se refiere a monumentos y artefactos, sino también a las tradiciones, creencias y prácticas que una comunidad considera valiosas. (Herrmann, 2009) sostiene que la preservación del

patrimonio cultural requiere un enfoque multidisciplinario que combine la historia, la tecnología y la gestión adecuada de los bienes, lo que ayuda a garantizar que estos recursos se conserven a largo plazo

Conservación

La conservación del patrimonio cultural abarca todas las acciones y medidas tomadas para garantizar la estabilidad y durabilidad de los bienes culturales, tanto materiales como inmateriales, a lo largo del tiempo. (Feilden, 2003) describe la conservación como un proceso de mantenimiento y cuidado de los bienes patrimoniales para evitar su deterioro y asegurar su transmisión a las generaciones futuras. En este contexto, la conservación puede ser preventiva, cuando se busca evitar la degradación mediante el control de factores ambientales, o curativa, cuando se toman acciones para restaurar un bien que ya ha sufrido daños. Además, la conservación no solo se limita a la acción física sobre los bienes, sino también a su documentación y monitoreo a lo largo del tiempo. La digitalización mediante técnicas fotogramétricas se ha convertido en un recurso valioso en la conservación, pues permite la creación de registros tridimensionales que facilitan el monitoreo continuo del estado de los bienes y su conservación (Chiabrando et al., 2015). De esta forma, se pueden implementar medidas más efectivas y menos invasivas para su protección.

Restauración

La restauración patrimonial es el proceso mediante el cual se realizan intervenciones sobre bienes culturales con el fin de devolverles su estado original o prolongar su existencia sin comprometer su autenticidad. Según (Brandi, 1963), la restauración debe ser realizada bajo principios de reversibilidad y respeto a los materiales originales, de modo que cualquier intervención no altere permanentemente el bien. La intervención restauradora debe tener en cuenta el uso y el desgaste histórico del bien, y realizarse con una comprensión profunda de su contexto histórico, arquitectónico y cultural. La restauración debe, por tanto, ser el resultado de un estudio exhaustivo de la historia del objeto y su estado actual. El modelado digital, mediante el uso de tecnologías de escaneo y fotogrametría, se ha convertido en una herramienta valiosa para la restauración, pues permite realizar un análisis detallado del deterioro y planificar intervenciones sin necesidad de manipular físicamente el bien (Fassi et al., 2017). Esta

aproximación no solo facilita la restauración, sino que minimiza el riesgo de daños adicionales al patrimonio.

Preservación

La preservación del patrimonio cultural se refiere a las estrategias y acciones implementadas para proteger los bienes culturales de los daños que puedan comprometer su integridad y valor a lo largo del tiempo. Esta protección busca evitar alteraciones permanentes o degradación de los bienes a través de un enfoque preventivo. Según Muñoz Viñas (2005), la preservación no solo involucra la conservación física de los bienes, sino también su contextualización dentro de la memoria colectiva de las comunidades. En este sentido, se prioriza el control del entorno y la documentación precisa de los bienes patrimoniales, asegurando que la información sobre ellos se conserve para las futuras generaciones. A medida que los avances tecnológicos en digitalización han tomado relevancia, el uso de tecnologías como la fotogrametría y el modelado digital ha emergido como una herramienta clave para la preservación, ya que permite generar réplicas exactas de los bienes, lo que facilita su estudio sin comprometer la integridad del objeto original (Remondino et al., 2014).

Marco Referencial

El concepto contemporáneo de "patrimonio cultural" en la era actual se origina directamente de las corrientes de pensamiento del racionalismo y empirismo del siglo XVIII. Como resultado de estas influencias, los procesos de conservación y restauración han evolucionado a lo largo de los siglos, respaldados por avances en ciencia y tecnología. A pesar de esta conexión, existe una discrepancia con la esencia misma de la obra de arte, que se considera más intrínsecamente ligada a dimensiones antropológicas, sociológicas, artísticas y humanísticas, tal como lo afirma (Javier y Casas Pérez, 2011). Podemos decir que la conservación, en un sentido más abarcador, implica la práctica de preservar en condiciones óptimas lo que poseemos en la actualidad. En otras palabras, se trata de prevenir las posibles alteraciones futuras de un bien patrimonial de naturaleza cultural, (Muñoz Vivas, 2010).

La fotogrametría siendo una disciplina que permite realizar modelos 3D a partir de fotografías 2D, con el fin de obtener características geométricas de los objetos representados haciendo uso de modelos matemáticos establecidos, también permite realizar mediciones a distancia sin que haya contacto físico con el objeto (Jauregui, 2009), ha evolucionado como una metodología para documentar el patrimonio cultural arquitectónico, gracias al desarrollo de los algoritmos *Structure For Motion* (Simón Peña Villasenín, 2019).

A partir de esto, (Chacón y Ruiz, 2022) se preguntaron cuál es la mejor técnica fotogramétrica entre la aérea o la terrestre para el modelamiento tridimensional de una estructura tomando como caso de estudio el monumento Virgen La Milagrosa en San Francisco, Cundinamarca, para lo cual desarrollaron un análisis comparativo empleando una tecnología GNSS y metodología de modelamiento 3D que tiene como base la fotogrametría, adicionalmente se emplearon 4 placas para georreferenciar la información tomada y se eligió Agisoft Meta Shape 1.8.4 para el procesamiento, limpieza y tratamiento de las imágenes. Como resultado del estudio se obtuvo un modelo 3D de la estructura con metodología comparativa en la que se hicieron 3 modelos y de cada uno se observó la geometría, nitidez, color y textura.

Este proyecto fue de gran apoyo para establecer el método de limpieza del modelo con el software Photoshop, con el cual, según el autor se proporciona un ambiente de trabajo óptimo, reduciendo los tiempos en un 60% comparado con la limpieza realizada en Agisoft Meta Shape 1.8.4. Esta definición también llevó a los autores (Ramirez y Zakzuk, 2020) a investigar acerca de una manera rápida para realizar diagnósticos y análisis periódicos del

estado de las murallas de Cartagena de Indias que lograrán brindar soluciones integrales, esto con el objetivo de agilizar los procesos de conservación de la estructura mediante la elaboración de un modelo tridimensional a partir de una serie de etapas, comenzando con la recopilación de información secundaria integrando fotogrametría aérea y terrestre, seguida de la obtención de los permisos necesarios para llevar a cabo los sobrevuelos, que a su vez permitieron la creación del modelo 3D. La información proporcionada en este documento fue de vital importancia para plantear la fase de colocación de GCP que servirán para georreferenciar la estructura, además de tomar las recomendaciones de distribuir equitativamente dichos puntos de control.

En el centro del país los autores (Merchan y Cardenas, 2022) indagaron sobre una metodología que lograra inspeccionar lugares de difícil acceso y dar un concepto preliminar de los posibles problemas estructurales, es aquí donde lo planteado por (Jauregui, 2009) cobra una gran importancia, debido a que estos deciden emplear la fotogrametría con tecnología drone que para reconstruir el Santuario La Valvanera, en Chía, utilizando un dron DJI Mavic Air pro y el software de procesamiento de los datos Pix4D, con el cual se logró obtener el modelo que proporcionó información importante para inspecciones de las circunstancias de la capilla. Además, el autor resalta que a través de las fotografías tomadas con tecnología UAV's se logran identificar diferentes patologías estructurales como grietas, fugas o corrosión que la estructura pueda tener, tomando ventaja de la alta definición de las cámaras que poseen los dispositivos. Finalmente, este estudio permitió dar una idea de las aplicaciones a utilizar en el procesamiento de la información, que comprenden la generación de la nube de puntos densa, la limpieza de la estructura por máscara, siendo las opciones Pix4D y Agisoft Meta shape.

Otros autores como (Páez Cuervo, Gonzales Hernández y Upegui, 2020) plantearon la hipótesis de que a partir de la fotogrametría SfM se logran resultados prometedores que apoyen la conservación del patrimonio de la ciudad, con el fin de que este sea conocido por las generaciones venideras. Con base en dicha información desarrollaron su investigación en el monumento de La Rebeca en la ciudad de Bogotá, se apoyaron de la técnica fotogramétrica de estructura en movimiento, además se incorporó al estudio el software libre Regard 3D que tuvo lugar en la fase de creación del modelo 3D y Meshlab que es un sistema de código abierto que brindó limpieza, edición, inspección, renderización y texturización a las mallas creadas. Como resultado de esta investigación se obtuvo la virtualización del patrimonio cultural de la ciudad a

través tecnología libre e insumos de bajo costo, así como la integración de la fotogrametría SFM sin tener en cuenta el modo de captura de las imágenes. Esta investigación fue relevante en la constitución de este proyecto, debido a que suministró información de la técnica a implementar y recomendaciones importantes a seguir para llegar a mejores resultados.

Por su parte (Ochoa y Delgado, 2020) aborda una iniciativa que permite registrar el patrimonio edificado gráficamente del centro histórico de la ciudad de Cuenca. La metodología empleada tuvo énfasis en la captura de fotografías mediante cámaras fotográficas individuales y el procesamiento de están en el software Photomodeler para la orientación de las imágenes y generación del modelo tridimensional, encontrando que esta técnica a pesar de sus limitaciones, representa varias ventajas en diferentes aspectos como el bajo costo, la calidad y rapidez, además de proporcionar un alto potencial a la documentación, recuperación, mantenimiento y promoción dl patrimonio edificado.

A su vez, (Perugachi, 2023) mediante la obtención de modelos 3D buscaron rescatar el patrimonio cultural de la Iglesia Inmaculada Concepción de la parroquia Atahualpa aplicando técnicas de fotogrametría y reconstrucción en 3D, basando el flujo de trabajo en la planificación y selección de tecnologías adecuadas para recopilar fotografías utilizando drones y un dispositivo móvil. En cuanto al procesamiento de imágenes se realizó en el software Allison metal share que permitió crear objeto una nube de puntos y una malla tridimensional con lo que mostraron que a pesar de las limitaciones la fotogrametría proporciona resultados apropiados en términos de realismo y tiempo para la documentación de este tipo de estructuras.

En el 2021 Chacón y Ruiz (2022) analizaron y evaluaron las diferentes técnicas fotogramétricas aplicadas al monumento virgen la milagrosa ubicada en el municipio de san francisco Cundinamarca, que corresponde a uno de los monumentos culturales de esta ciudad, el cual contiene una connotación turística y económica importante en la zona, con el fin de suministrar material para difundir en un entorno web generando un impacto social a través de modelos tridimensionales. Las técnicas utilizadas por los autores incluyeron el uso de puntos de control para realizar un ajuste de datos efectuado con un levantamiento de tecnología GNSS y topografía convencional para apoyar el análisis y la precisión de los datos obtenidos, hallando que la fotogrametría puedes ser aplicada y aprovechada en diferentes ámbitos de estudio, para promover su utilización como un instrumento de restauración y conservación del patrimonio.

En cuanto a (Gutiérrez, 2021) tuvieron como objetivo preservar el patrimonio arquitectónico mediante la difusión de los productos obtenidos con software 3D en plataformas virtuales. Con la combinación de métodos cualitativos y cuantitativos en los que se incluyeron la investigación documental histórica y etnográfica del objeto de estudio y utilizando Autodesk Maya para crear los modelos trimestrales detallados, obteniendo como resultado el modelamiento de 3 casas patrimoniales y la creación de piezas publicitarias para la promoción del turismo local, adicionalmente los autores afirman que la metodología utilizada no solamente contribuye a la conservación del patrimonio sino que también aumenta la conciencia y el interés por los bienes culturales y la difusión mediante entornos virtuales permite llegar a un público que no puede visitar los sitios físicamente.

Según la investigación de (Morales, 2016) acerca de la restauración de la imagen de la Virgen de Carmen analizando los usos del 3D, empleando quipos como escáner laser como equipo de captura principal y fotogrametría como complemento de zonas de difícil acceso y verificación de los datos obtenidos, en esta metodología fue tomado en consideración el software de diseño y animación Blender para mejorar el aspecto visa de los productos generados, finalmente con este estudio lograron documentar de manera precisa y detallada sin tener contacto físico con los objetos, clasificando esta metodología como poco invasiva, además concluyen que las replican con alto nivel de exactitud podrían permitir la creación de replicas exactas y exposiciones que representen la estructura, destacando la variedad de alternativas que se pueden usar para la sostenibilidad del patrimonio a lo largo del tiempo.

Además, la combinación de fotogrametría aérea y terrestre ha demostrado ser una metodología de gran resultado para la documentación del patrimonio cultural tal como lo afirma el estudio realizado por (Lu et al., 2023) quienes aplicaron fotogrametría aérea y LiDAR para mapear los centros poblados de comunidades indígenas en Taiwán, empleando una metodología de captura de fotografías mediante vehículos aéreos no tripulados y escáner laser como herramienta de captura terrestre para documentar áreas como las casas de piedra en las que la densidad del bosque era menor, finalmente este estudio demostró que la combinación de estas tecnologías permite realizar una planificación de la preservación futura de estas culturas y la reconstrucción virtual para la divulgación de sus entornos.

Por su parte (Federman et al., 2018) encontraron esta combinación altamente beneficiosa para la evaluación de los daños post desastres de los templos Nyatapola y

Bhiarabnath en Nepal causados por del terremoto de Gorkha en 2015. Esto se realizó, utilizando capturando imágenes oblicuas desde diferentes ángulos con un dron, además de capturar imágenes de la parte baja con una cámara fotográfica para cubrir a mayor proporción ambas estructuras, posterior a esto procesaron la información en Pix4Dmapper generando nubes de puntos, malla y texturas, finalmente encontraron que la fusión de la fotogrametría aérea y terrestre es altamente útil en situaciones post desastre donde la disponibilidad y accesibilidad de equipos de alto costo puede ser un factor limitante, además permite evaluar rápidamente los daños facilitando intervenciones de restauración afectaciones causadas por desastres naturales.

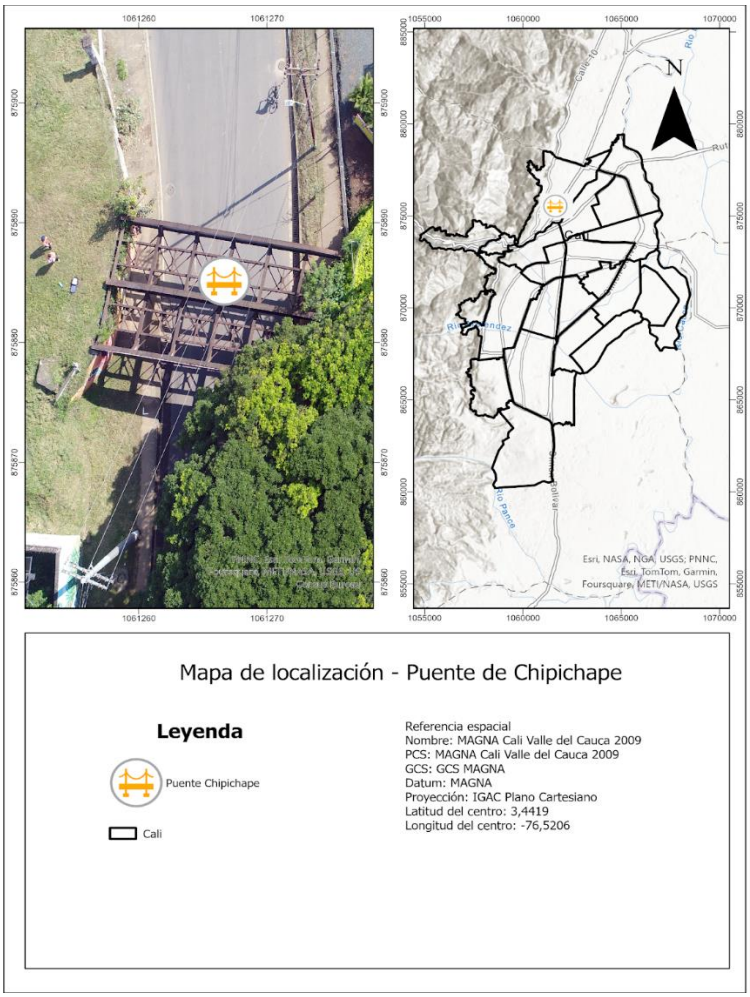
Área de Estudio

El presente proyecto tiene como área de estudio un sector específico en la ciudad de Santiago de Cali, precisamente en el barrio Santa Mónica Residencial, dentro de las coordenadas geográficas 3° 28' 25.96" de latitud Norte y 76° 31' 36.34" de longitud Oeste. Ver figura 1.

Este puente construido durante la década de 1930 es un referente histórico debido a que fueron las antiguas vías del ferrocarril, una infraestructura de 5 metros de altura y 20 metros de ancho aproximadamente y está construido principalmente de acero y concreto reforzado, además, es válido aclarar que en su momento fue clave para el desarrollo industrial y comercial de la ciudad.

Figura 1

Mapa de Localización



El presente proyecto tiene como área de estudio un sector específico en la ciudad de Santiago de Cali, precisamente en el barrio Santa Mónica Residencial, dentro de las coordenadas geográficas 3° 28' 25.96" de latitud Norte y 76° 31' 36.34" de longitud Oeste.

Este puente construido durante la década de 1930 es un referente histórico debido a que fueron las antiguas vías del ferrocarril, una infraestructura de 5 metros de altura y 20 metros de ancho aproximadamente y está construido principalmente de acero y concreto reforzado, además, es válido aclarar que en su momento fue clave para el desarrollo industrial y comercial de la ciudad. Ver figura 2.

Figura 2

Puente Chipichape vista adelante



Materiales

Para comenzar a documentar el puente, la primera herramienta empleada fue la cámara Reflex Nikon D3200. Esta cámara DSLR, equipada con un sensor CMOS de 24.2 megapíxeles, se utilizó principalmente para capturar imágenes detalladas de texturas y elementos específicos en el sitio. La Nikon D3200 permitió registrar detalles importantes a nivel de la fachada del puente, ajustando el ISO de acuerdo con las condiciones de luz y aprovechando su velocidad de obturación de hasta 1/4000 segundos para capturas nítidas.

Una vez documentados los detalles a nivel de textura, se utilizó el dron Phantom 4 Pro V2.0 para capturas aéreas. Este dron cuenta con una cámara de 20 megapíxeles y puede grabar en resolución 4K a 60 fps. El vuelo cubrió el área a una altura de 50 metros, generando imágenes aéreas que permitieron una perspectiva global del sitio. Las tomas aéreas complementaron los datos capturados en el suelo, proporcionando un panorama completo de la disposición espacial.

Para asegurar la precisión geoespacial de todos los datos, se empleó el sistema GNSS Topcon Hiper V. Este sistema de posicionamiento global permitió obtener coordenadas exactas de puntos de control en el terreno. El uso del GNSS garantizó que el modelo obtenido estuviera debidamente georreferenciado. Esta precisión en la ubicación fue esencial para asegurar que el modelo final reflejara fielmente la estructura espacial del sitio real.

La cámara Insta 360 se utilizó para capturar imágenes esféricas de 360 grados. Esta cámara fue particularmente útil para obtener una vista panorámica en áreas de difícil acceso y lograr una visión envolvente del sitio. Se utilizó la funcionalidad de captura a distancia a través de una conexión WiFi con la aplicación Insta360 Pro para tener visibilidad de las tomas mediante el celular y asegurar que se estaba abarcando completamente el entorno desde cada punto. (Ver figura 3).

Figura 3

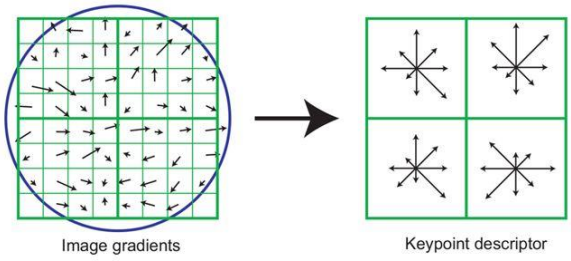
Capturas con cámara Insta 360



En la etapa de procesamiento, todas las imágenes capturadas fueron integradas usando Agisoft Metashape en la versión 1.8.4, este se utilizó con el licenciamiento educativo. Agisoft un software de fotogrametría que convierte las fotografías en modelos tridimensionales. Este software aplica algoritmos como el *SIFT y SURF* para alinear las imágenes, además de aplicar MVS para calcular la disparidad y las ecuaciones de Poisson y Delaunay para crear mallas (ver figura 4). Cada etapa de procesamiento en Metashape permitió transformar las imágenes que se integraron todos los datos visuales y geoespaciales obtenidos.

Figura 4

Algoritmos de SIFT y SURF



Nota. De What are SIFT and SURF?, por i2tutorials, s.f. (https://www.i2tutorials.com/what-are-sift-and-surf/).

Para realizar mediciones exactas en puntos delta que se marcaron en el sitio, se utilizó la estación total South N6. Este instrumento topográfico, ofrece una capacidad de medición de distancias de hasta 5000 metros y una precisión angular de 2 segundos. Su sistema de comunicación, que incluye Bluetooth y conexión USB, permite la transferencia de datos de manera rápida y sencilla. La South N6 también cuenta con un visor de alta definición que facilita la visualización de los puntos de medición, y su diseño robusto la hace adecuada para diversas condiciones de trabajo en campo (ver figura 5). Las coordenadas obtenidas con la estación total se usaron para validar y complementar la georreferenciación del GNSS, garantizando que el modelo 3D final tuviera dimensiones precisas y correspondiera adecuadamente con el espacio físico.

Figura 5

Estación total South N6



Se utilizó el software AutoCAD Civil 3D, en su versión 13.7.765.0 que nos permitió elaborar un plano de representación de la estructura del Puente Chipichape. El software permitió importar y procesar el modelo tridimensional realizado en Agisoft. Metashape, facilitando la conversión de la nube de puntos en geometrías vectoriales estructuradas. Para este software también se hace uso del licenciamiento educativo.

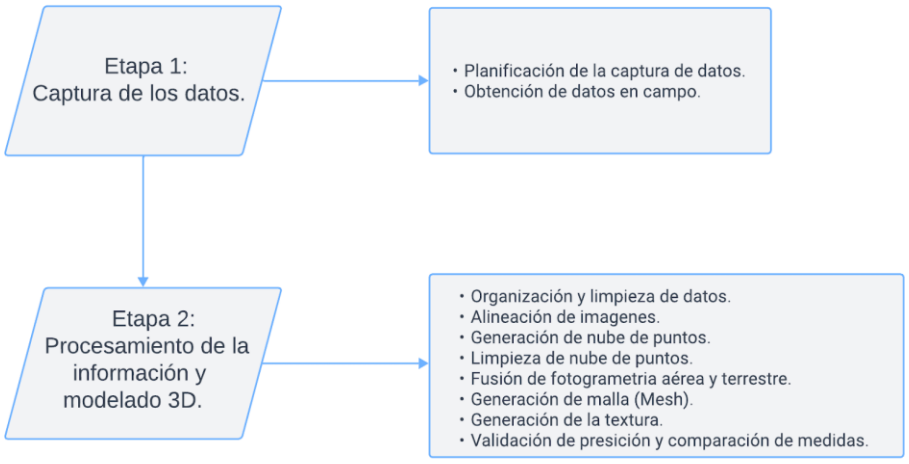
Finalmente se utilizó el programa Blender, que permite la creación de contenido 3D, este funciona bajo licencia GNU (Licencia Publica General). Esta es una herramienta que ofrece un objetivo desde el primer uso el cual es la manera practica y visual de cómo entender su interfaz que contiene un conjunto de ventanas distribuidas de un modo determinado en

donde cada ventana contiene en su interior un apartado del programa con una serie de herramientas destinadas a realizar una función determinada. Blender sirvió para trabajar el objeto final del modelado, ya que por medio de una superficie poligonal se pudo trabajar en el objetivo por una agrupación por superficies (*Mesh*).

Métodos

Figura 6

Flujo metodológico



En la figura 6 se evidencia la implementación de la metodología, esta se estructuró en dos etapas fundamentales, desde la captura inicial de los datos hasta la obtención del modelo 3D validado. En la etapa 1, se realizó una planificación de la captura de datos, seguida de la obtención de información en campo. A continuación, la etapa 2 se centró en el procesamiento y la organización de la información obtenida. Esta fase incluyó la alineación de imágenes, la generación de nubes de puntos y la limpieza de estas para mejorar el producto a obtener. Finalmente se realizó una validación de la precisión comparando las mediciones sobre el modelo y las obtenidas mediante topografía convencional.

Etapa 1 Captura de Datos

Planificación de la captura

Para capturar la información aérea y terrestre se tuvo en cuenta los horarios en los cuales se iba a realizar dicha realizar el vuelo debido a que tal como lo menciona (Bustamante Agudelo y Montoya Alzate, 2014), la presencia de nubosidad puede afectar la calidad de las fotografías, adicionalmente la presencia de fuertes lluvias o vientos puede poner en peligro el equipo utilizado o impedir la ejecución del vuelo. Teniendo esto en cuenta se realizó una consulta meteorológica para conocer las mejores condiciones para el día de vuelo, así mismo haciendo uso del software Shademap fue posible realizar una simulación de sombras teniendo en cuanta la posición del sol como se observa en la figura 7.

Figura 7

Cálculo de sombra en Shademap



Nota. De *ShadeMap – Simulate sun shadows for any time and place on Earth*, por ShadeMap, s.f. https://shademap.app/

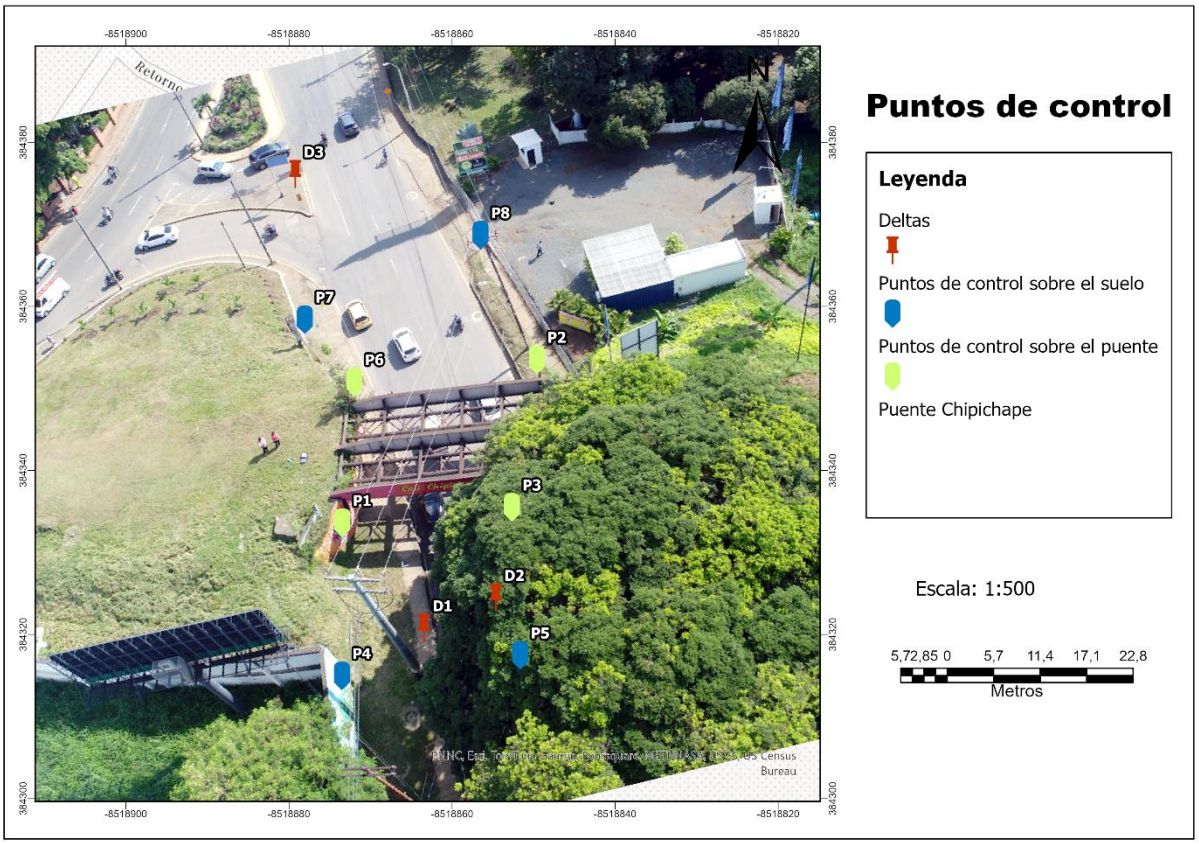
Obtención de datos de campo

(Páez Cuervo, Gonzales Hernández y Upegui, 2020) destacan que la implementación de una adecuada captura de datos es fundamental para elevar considerablemente la calidad de los productos obtenidos. En esta investigación, se llevó a cabo un proceso de recolección de información que inició con un levantamiento topográfico del área de estudio utilizando tecnologías como el GNSS y la estación total.

Para asegurar la precisión y la consistencia en el levantamiento topográfico, se marcaron deltas y puntos de control (Ver figura 8), dichas ubicaciones de los puntos se seleccionaron estratégicamente para cubrir de manera uniforme toda el área de estudio teniendo 3 Deltas, 4 puntos de control sobre el suelo y 4 puntos de control sobre el puente. Estos puntos sirven como referencias fijas y conocidas que permiten ajustar y validar las mediciones realizadas durante el levantamiento, así como también permite la georreferenciación del modelo tridimensional. Utilizando GNSS y la estación total, se midieron y registraron las coordenadas de cada punto con un rango de precisión de 1 a 5 cm, marcándolos físicamente en el terreno utilizando pintura, asegurando su visibilidad y accesibilidad, esto siguiendo las recomendaciones hechas por (Baque Solis, Cuadrado Torres, & Palacios Paredes, 2022) quienes afirman que el equipo GNNS RTK es el más adecuado para terrenos llanos beneficiando el levantamiento en aspectos como el tiempo, accesibilidad y precisión, además no necesita ser cambiado de posición debido a que cubre un rango de 3 a 5 km en terrenos despejados, en cuanto a la estación total el autor recomienda integrarla para complementar la información del GNSS en caso de presencia de edificaciones en el terreno que puedan interferir en la señal de satélites. Finalmente, el levantamiento fue un soporte para el control de calidad el modelado 3D.

Figura 8

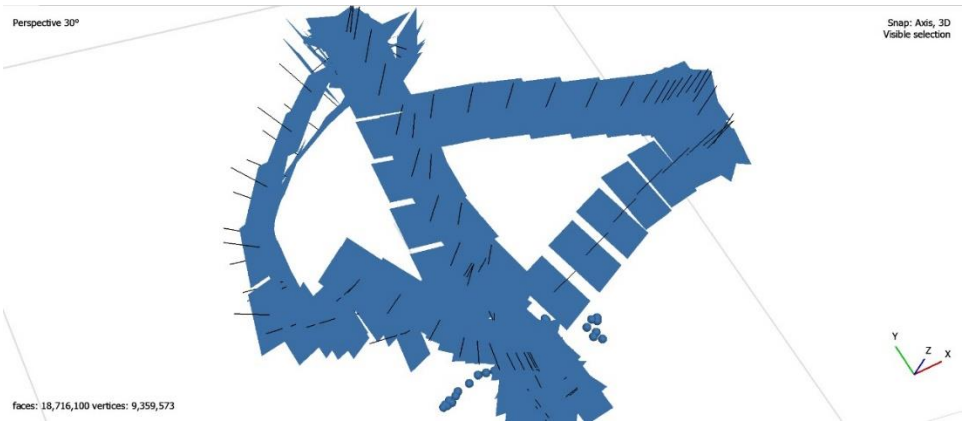
Mapa de distribución puntos de control



La captura de la fotogrametría aérea se llevó a cabo utilizando un dron DJI Phantom 4 Pro, recopilando fotografías cada 2 segundos con un traslape del 70% y una duración de 20 minutos de vuelo logrando cubrir la parte superior, frontal y posterior del puente. Dado que el sitio estudiado se encuentra cerca de la base aérea Marco Fidel Suárez, fue necesario gestionar los permisos pertinentes. A continuación, en la figura 9, se pueden observar las posiciones desde donde se tomaron cada una de las fotografías aéreas.

Figura 9

Posición de las fotografías tomadas con dron



Seguidamente se ejecutó la captura terrestre empleando una cámara réflex Nikon D3200 siguiendo recomendaciones realizadas por (Monstar, 2018) quien afirma que los resultados de fotogrametría son mejor obtenidos mediante cámaras réflex. En esta recopilación se registraron detalles estructurales considerando la iluminación y ángulos de para complementar la información. Además, se realizó la captura de las fotografías con la cámara Insta360 siguiendo por ambas aceras haciendo tomas de ida y regreso para asegurar la cobertura de la zona como se observa en la figura 10. Para este fin, se estableció una captura a intervalos regulares de dos metros a lo largo de toda la zona. En la figura 11, también se puede observar el esquema con la posición utilizada para la toma de las fotografías con la cámara Nikon D3200.

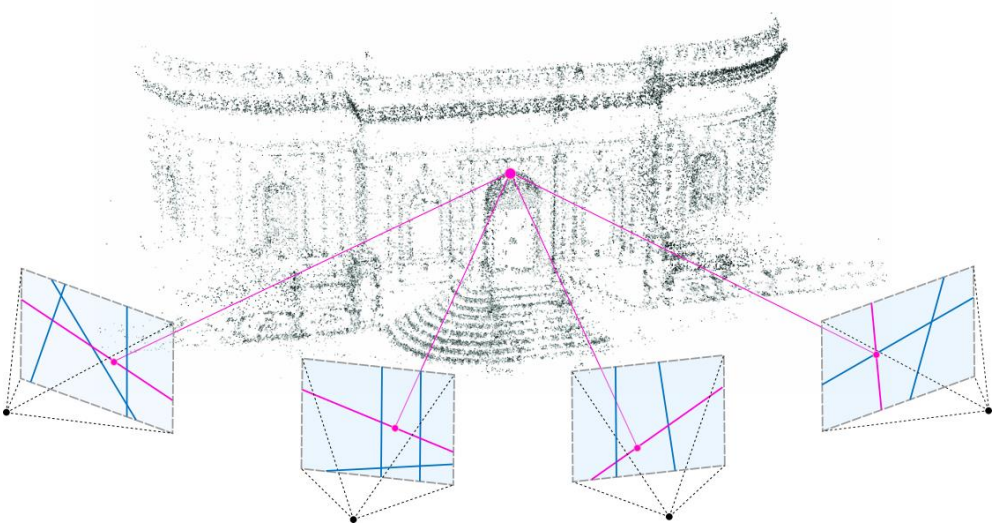
Figura 10

Captura de fotografías con cámara Insta360



Figura 11

Esquema de posición de la cámara

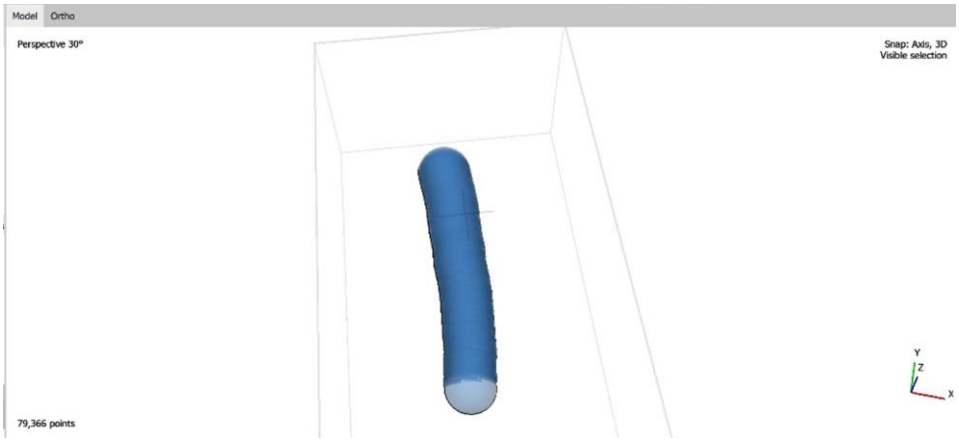


Nota: "Privacy Preserving Structure-from-Motion" por Geppert, M., Larsson, V., Speciale, P., Schönberger, J. L., & Pollefeys, M., 2020, en European Conference on Computer Vision (ECCV).

Finalmente, se tomaron 78 fotografías 360°, 112 con la cámara Nikon D3200 y 173 con el dron DJI Phantom 4 Pro V2.0, distribuidas estratégicamente para cubrir el área de interés como se muestra en la figura 12. La captura de toda la información se realizó durante un período de 4 días, que incluyó el levantamiento topográfico, la toma de fotografías y el vuelo de dron.

Figura 12

Posición fotografías tomadas con cámara insta360



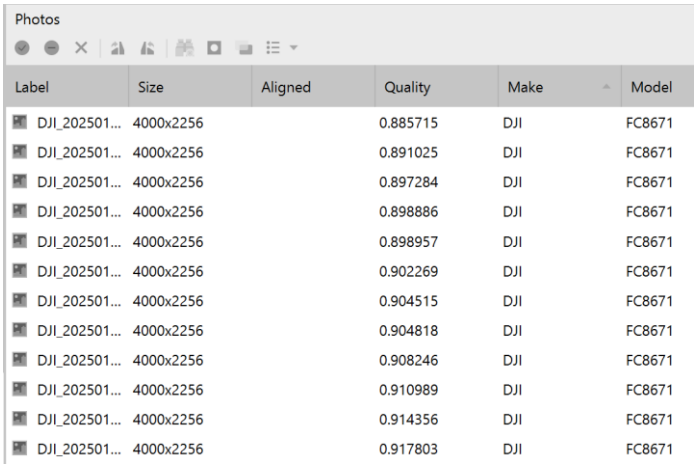
Etapa 2 Procesamiento de la información y modelado 3D

Organización y selección de datos

Para iniciar se creó un proyecto en Agisoft Metashape 1.8.4 para cada procesamiento y se importaron las fotografías de la captura aérea y terrestre respectivamente, esto posterior a una revisión para descartar posibles fotografías consideradas de baja calidad o que estuvieran borrosas para no afectar la calidad del modelo final, este proceso se realizó con todas las imágenes que se capturaron, adicionalmente para tomar provecho del software se estimó la calidad de las imágenes con la herramienta estimar calidad de imagen y de acuerdo a esta estimación solo se tuvieron en cuenta las imágenes con una calidad mayor a 0,5 como se muestra en la figura 13.

Figura 13

Clasificación según la calidad de las imágenes



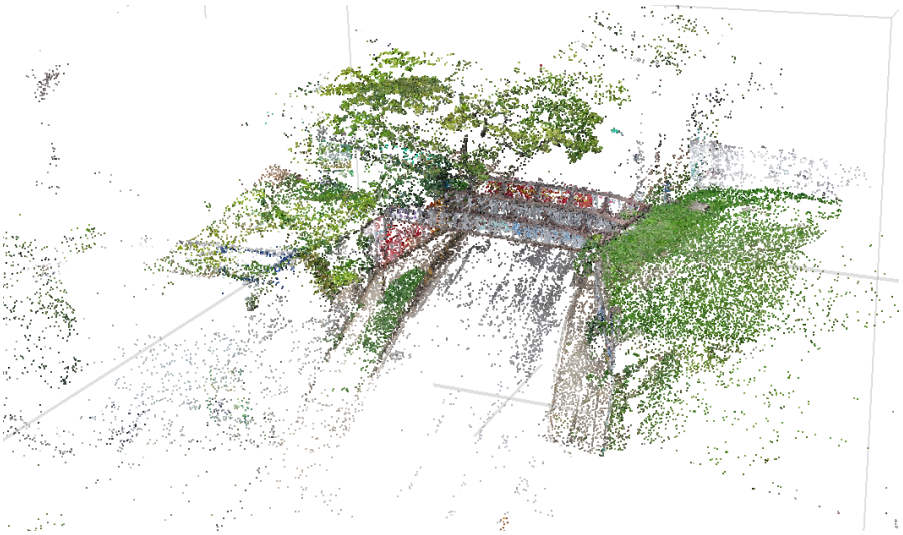
Label	Size	Aligned	Quality	Make	Model
DJI_202501...	4000x2256		0.885715	DJI	FC8671
DJI_202501...	4000x2256		0.891025	DJI	FC8671
DJI_202501...	4000x2256		0.897284	DJI	FC8671
DJI_202501...	4000x2256		0.898886	DJI	FC8671
DJI_202501...	4000x2256		0.898957	DJI	FC8671
DJI_202501...	4000x2256		0.902269	DJI	FC8671
DJI_202501...	4000x2256		0.904515	DJI	FC8671
DJI_202501...	4000x2256		0.904818	DJI	FC8671
DJI_202501...	4000x2256		0.908246	DJI	FC8671
DJI_202501...	4000x2256		0.910989	DJI	FC8671
DJI_202501...	4000x2256		0.914356	DJI	FC8671
DJI_202501...	4000x2256		0.917803	DJI	FC8671

Alineación de fotografías

El siguiente paso fue la alineación de las cámaras, para este procedimiento se le indico al software realizarlo de manera secuencial debido a que de esta manera fueron capturadas las fotografías, es así como el software compara y posiciona cada una de las imágenes de acuerdo con la posición en que fueron tomadas (ver figura 14). Además, se seleccionó la opción de realizar el proceso con la más alta calidad y se repitió el proceso con las imágenes que no terminaron la alineación correctamente siguiendo las recomendaciones de (Ramirez y Zakzuk, 2020), debido a que el software puede fallar y alinear incorrectamente las imágenes cuando se utilizan muchas y provienen de diferentes fuentes. Una vez terminado el proceso de alineación se visualizará el *tiled model*.

Figura 14

Tiled model generado por la alineación de imágenes



Generación de nube de puntos densa

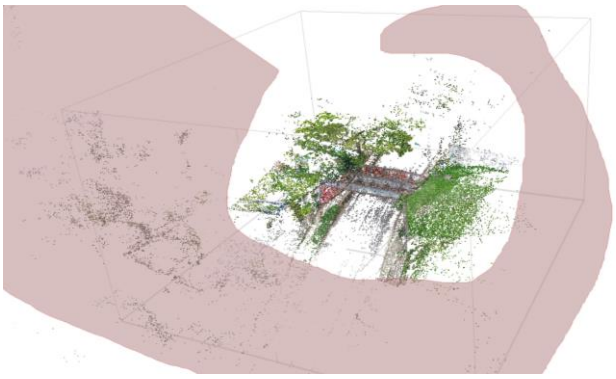
Una vez alineadas las fotografías se llevó a cabo con la generación de la nube de punto para la cual se eligió el parámetro para obtener una calidad muy alta y el tipo de filtrado *mild*, debido a que (Agisoft, 2021) afirma que el software utiliza diferentes tipos de filtro dependiendo de la complejidad de cada proyecto, además este tipo de filtrado se define como el adecuado para procesamientos aéreos con pequeños detalles que desean ser distinguidos en la reconstrucción.

Limpieza de la nube de puntos

Para el proceso de limpieza de nubes de puntos se utilizó la herramienta forma de selección libre para seleccionar los puntos dispersos y alejados del objetivo que se consideran totalmente innecesarios para la reconstrucción final (ver figura 15), finalmente con un poco más de detalle se realizó una revisión de los puntos del área de interés para mejorar algunas zonas con la precaución de no eliminar zonas importantes del modelo.

Figura 15

Limpieza de nube de puntos



Fusión de las nubes de puntos

Para la fusión de las nubes de puntos se empleó la herramienta de *append* para agregar el proyecto existente del procesamiento terrestre, una vez agregado con la herramienta *marge chunks* o combinar datos, se integran las nubes de puntos para complementar las diferentes vistas o perspectivas que posee el modelo mejorando la densidad y el detalle del producto final.

Creación de malla y textura

Para la creación de la malla se seleccionó la herramienta *build mesh* en la cual se establecieron los parámetros de datos de entrada como la nube puntos fusionada para la superficie se elige *arbitrary* 3d debido a que estamos trabajando con información en XYZ. Al concluir este paso se procede con la creación de la textura que permite recrear los diferentes tipos de material a partir de las fotografías alineadas. Y de esta manera finaliza la reconstrucción 3D.

Adicionalmente, se realizó un ajuste somero en la geometría del modelo, particularmente en los bordes de algunas estructuras donde la reconstrucción presentaba ligeras irregularidades. Mediante la edición de la malla, se suavizaron ciertas superficies para evitar deformaciones perceptibles y lograr una representación más fiel a la realidad. Este proceso no alteró significativamente la estructura general del modelo, pero contribuyó a mejorar

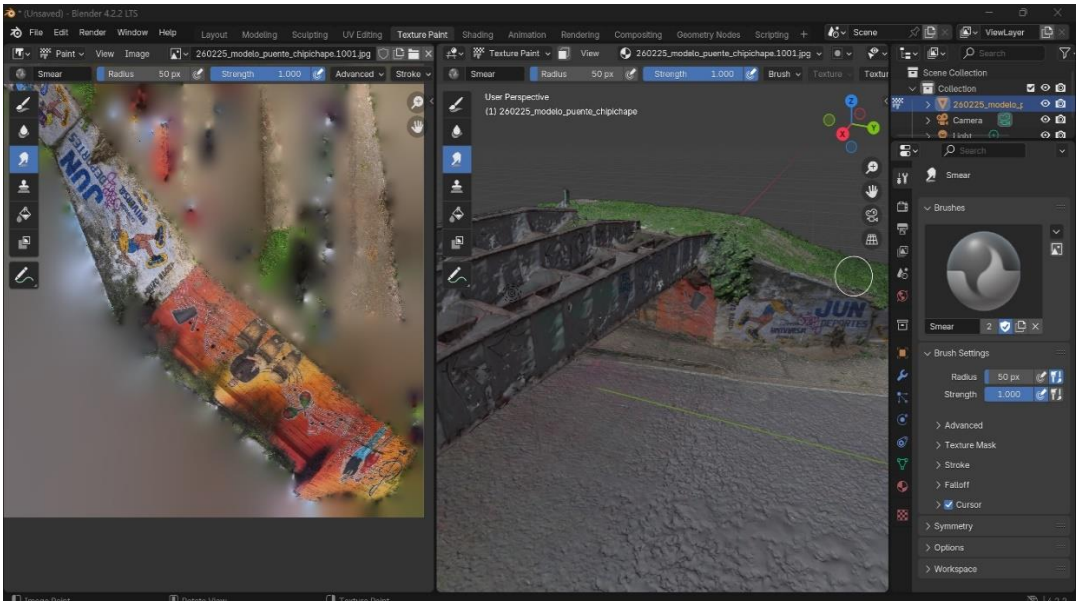
la calidad de visualización y a garantizar una mejor integración del modelo en futuras aplicaciones.

Blender

Para mejorar la calidad visual y la precisión del modelo 3D del puente, se llevó a cabo un proceso de edición en Blender. El modelo en formato OBJ fue importado junto con su respectiva textura en formato JPEG, permitiendo modificar posibles inconsistencias en la representación tridimensional. Durante la revisión inicial, se identificaron áreas donde la textura presentaba imperfecciones, tales como diferencias de color y zonas de baja definición causadas por sombras o variaciones en la iluminación de las imágenes originales. Para corregir estos detalles, se aplicó la herramienta de pintura de texturas, lo que permitió homogenizar los colores y mejorar la continuidad visual en ciertas secciones del puente.

Figura 16

Edición de modelo 3D en Blender



Resultados

La estrategia de captura de información para la documentación del puente se estableció mediante la metodología Structure from Motion (SfM). Este método permitió registrar el estado del puente a partir de un proceso de captura planificado para cubrir la totalidad de la estructura y reducir las limitaciones del área de estudio elegida, integrando técnicas de fotogrametría aérea y terrestre que consistieron básicamente en capturar desde múltiples posiciones para obtener registros de zonas con acceso restringido, incluyendo imágenes nadirales y oblicuas con superposición del 80% para la reconstrucción mediante SfM. La combinación de este método ha permitido que el puente se registre en detalle, asegurando que tanto las áreas disponibles como la visualización compleja se presenten con precisión. Además, el uso de SfM, en comparación con los métodos de elevación manuales tradicionales, han contribuido a un modelo tridimensional detallado con menos tiempo de procesamiento y mayor precisión.

Durante la ejecución, se presentaron dificultades en sectores del puente donde la vegetación interfería en la visibilidad. Se ajustaron las posiciones de las tomas terrestres y se redefinió la trayectoria del dron para obtener registros de todas las áreas. Por otro lado, la ausencia de georreferenciación en algunas imágenes aéreas también fue un limitante al momento de fusionar los datos. En este sentido, la elección de estas técnicas fotogramétricas especificas fue crucial para abordar estas cuestiones: las imágenes nadirales facilitaron la captura de estructura desde una perspectiva cenital, lo que dio al modelo una base, mientras que las imágenes oblicuas permitieron capturar detalles estructurales orientados lateralmente y áreas de difícil acceso. La información se complementó con fotografías terrestres, que registraron texturas cercanas y daños en la superficie. Adicionalmente, la estrategia aplicada confirma la viabilidad de combinar técnicas de captura aérea y terrestre para la documentación de bienes culturales y proporciona una metodología replicable. Este enfoque metodológico no solo permitió obtener un modelo 3D con un nivel de detalle, sino que también demostró lo crucial que es elegir técnicas de captura adecuadas en función de las condiciones del entorno y los objetivos del estudio.

Asimismo, a partir de dicha estrategia implementada, se logró reconstruir la geometría y textura de la estructura, permitiendo identificar diversas condiciones superficiales y estructurales. En la figura 17 se presenta una vista general del modelo obtenido.

Figura 17

Modelo en vista general



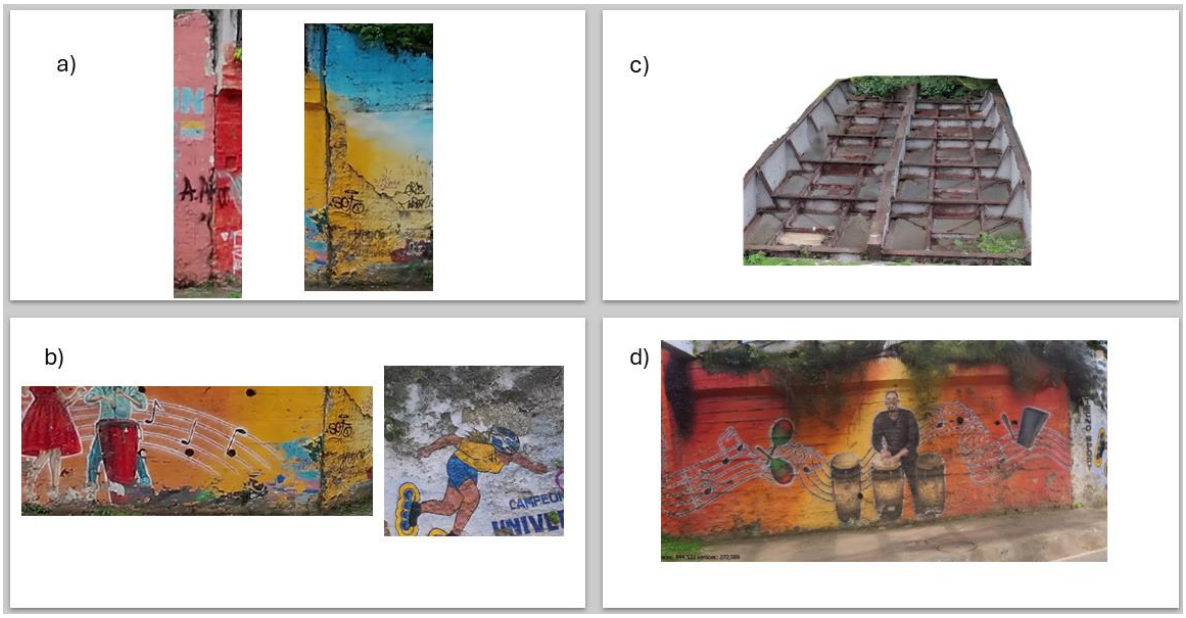
Tras la edición en Blender, el modelo 3D del puente presentó una notable mejora en su apariencia visual y en la uniformidad de su textura. La corrección de color permitió eliminar diferencias abruptas causadas por variaciones en la iluminación original, generando una superficie más homogénea y realista. Las áreas que anteriormente mostraban sombras pronunciadas o cambios bruscos en la textura fueron suavizadas mediante la pintura digital, lo que optimizó la percepción del modelo sin comprometer su precisión geométrica. En cuanto a la geometría, los ajustes realizados en ciertos bordes y superficies irregulares ayudaron a eliminar pequeñas imperfecciones generadas durante el proceso de fotogrametría. Esto resultó en una estructura más continua y mejor definida, sin distorsiones notorias que pudieran afectar la interpretación del modelo. En general, las modificaciones aplicadas permitieron obtener un modelo tridimensional más coherente visualmente, sin alterar la integridad de los datos espaciales originales, lo que garantiza su utilidad para futuras aplicaciones en análisis y documentación del puente.

Además, a partir la modelación 3D realizada, se identificaron diversos hallazgos, coincidentes en gran parte con las condiciones documentadas en la ficha de actualización del estado de los bienes culturales inmuebles de 2009.

Los principales deterioros observados incluyen, grietas en el tablero y apoyos, desprendimiento del acabado y pintura principalmente en la parte inferior y superior de las paredes**,** oxidación de elementos metálicos que corresponde a la parte superior del puente y presencia de vegetación en fisuras y juntas (ver figura 18).

Figura 18

Deterioros observados en el puente



Nota: (a) grietas en el tablero y apoyos, (b) desprendimiento del acabado y pintura en la parte inferior y superior de las paredes, (c) oxidación de elementos metálicos en la parte superior del puente y (d) presencia de vegetación.

En la tabla 1 se presenta un resumen de las características determinadas a partir del análisis visual del modelo 3D en comparación con los registros previos de 2009.

Tabla 1

Comparación estado del Puente Chipichape (2009 vs. Actualidad)

Tipo de afectación	Ficha 2009 - Estado	Estado actual (Modelo 3D)	Cambio identificado
Grietas en tablero y apoyos	No documentado	Presentes	Aumento del deterioro
Desprendimiento de pintura	Moderado	Severo	Empeoramiento evidente
Oxidación estructural	Leve	Moderada	Avance del deterioro
Vegetación en fisuras	No reportado	Crecimiento significativo	Nuevo deterioro

En la tabla 2 se presenta un conjunto de imágenes de 2009 comparadas con capturas extraídas del modelo 3D generado, donde se visualizan algunos cambios en el paso del tiempo.

Tabla 2

Imágenes comparativas entre la ficha de 2009 y el modelo actual

Imágenes Comparativas Entre la Ficha de 2009 y el Modelo Actual	
Ficha de actualización 2009	Modelo 3D generado
	









El análisis comparativo entre la información documentada en 2009 y los resultados actuales sugieren un avance en el deterioro del puente Chipichape, adicional a esto, la falta de mantenimiento ha permitido que condiciones leves evolucionen hacia estados más avanzados, comprometiendo la integridad estructural del bien patrimonial. Los resultados obtenidos respaldan la utilidad del modelo tridimensional como herramienta para el monitoreo del puente a largo plazo, ya que su precisión para identificar patologías estructurales hace más fácil detectar nuevos daños de manera temprana y seguir su progresión a lo largo del tiempo.

Desde el punto de vista metodológico, la implementación de la estrategia SfM para la captura y reconstrucción de la información permitió obtener el modelo tridimensional realista del puente a partir de la información integrada en cada proceso de adquisición tanto aérea como terrestre (Caro Herrero, 2012). Adicionalmente se logró corroborar lo afirmado por (Peinado

Checa, Fernández Morales y Agustín Hernández, 2014) que la fotogrametría aérea a baja altura en combinación con la fotogrametría terrestre es el proceso idóneo para la documentación global de estructuras, recopilando información de difícil acceso y en algunos casos oculta. La integración de ambas técnicas fue esencial para producir un modelo de alta calidad porque la fotogrametría aérea permitió capturar la morfología general del rio, mientras que la fotogrametría terrestre proporciono información sobre la superficie y las patologías visibles a nivel de la superficie. Sin embargo, para evaluar el impacto de esta integración en la preservación a largo plazo se sugiere establecer métricas de comparación entre modelos generados en distintos periodos de tiempo, analizando la evolución de los signos de deterioro, cuantificando las variaciones encontradas en cada momento. Por otro lado, la evaluación del impacto generado por los modelos fotogramétricos también puede abordarse mediante la comparación de los resultados obtenidos con técnicas tradicionales de registro como levantamientos manuales, fichas de actualización o planos históricos, lo que permite validar la eficacia del método en términos de resolución y nivel de detalle alcanzado. Se recomienda utilizar tecnologías complementarias como LiDAR o termografía infraestructural para mejorar la caracterización de daños estructurales que no son visibles en el espectro de luz convencional, optimizando así las estrategias de documentación tridimensional.

Además, los resultados obtenidos resaltan la importancia de considerar estrategias para mejorar la captura de imágenes en entornos con obstáculos naturales. La combinación de fotogrametría aérea y terrestre permitió obtener una representación detallada, aunque la ausencia de georreferenciación inicial requirió ajustes adicionales en el procesamiento. Para futuras aplicaciones se recomienda el uso de puntos de control geométricos distribuidos estratégicamente en la estructura, lo que facilitaría la fusión de datos y mejoraría la precisión del modelo final. Estos aspectos metodológicos pueden servir como referencia para futuras aplicaciones de modelación tridimensional en estructuras similares.

El modelo generado también ofrece la posibilidad de ser utilizado en herramientas interactivas para su análisis en entornos digitales, como realidad aumentada o virtual como Unity o Vuforia. Estas aplicaciones pueden contribuir a la divulgación y gestión de la información sobre el estado de la estructura en el contexto de su conservación.

También, se sugiere que futuras investigaciones se enfoquen en el monitoreo temporal del puente mediante la comparación de modelos generados en distintos periodos. Asimismo, la

incorporación de tecnologías complementarias, como LiDAR o termografía infrarroja, podría aportar información adicional para mejorar la caracterización del estado de la estructura y optimizar las estrategias de documentación tridimensional en proyectos de conservación patrimonial. La incorporación del modelo tridimensional en sistemas de monitoreo remoto permitiría la detección de cambios estructurales en tiempo real, facilitando el proceso de toma de decisiones para intervenciones de conservación. Esta comparación posibilita el análisis de las variaciones en la geometría del puente, detectando características diferenciales o deformaciones que podría comprometer su estabilidad. Asimismo, la integración del modelo tridimensional facilita la implementación de técnicas de monitoreo remoto mediante la identificación de fisuras, perdida de material y desgaste de puntos críticos, todo esto con el fin de preservar el patrimonio cultural. De este modo, el producto generado se convierte en una herramienta útil para garantizar la sostenibilidad del puente a lo largo del tiempo.

A partir del orto-mosaico obtenido como resultado del procesamiento de las imágenes, se generó un plano de representación con una vista en planta del puente (ver figura 19, 20 y 21), junto con perspectivas en el sentido del eje vial y en sentido contrario, con el fin de entregar una base gráfica detallada de la estructura geométrica, que definiera principalmente los contornos de este, incluyendo el tablero, apoyos y barandas. Estos productos cartográficos pueden ser componentes esenciales para futuras intervenciones de restauración y mantenimiento, ofreciendo referencias precisas del estado actual de la estructura.

Figura 19

Representación cartográfica de vista en planta

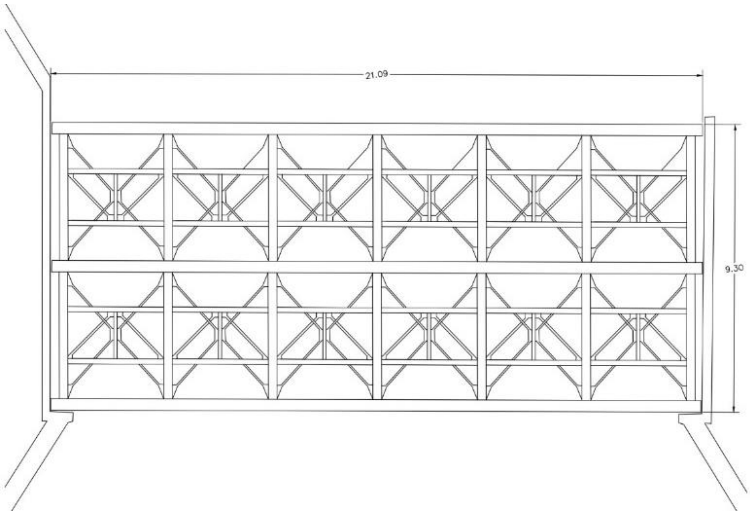


Figura 20

Representación cartográfica en sentido del eje vial

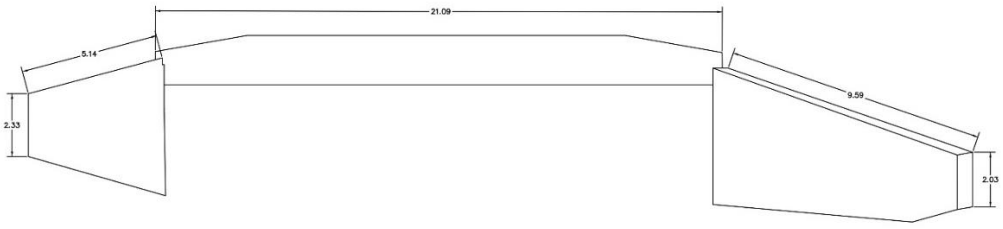


Figura 21

Representación cartográfica en sentido del eje vial



Los detalles de la información cartográfica pueden consultarse en los anexos (Anexo 1 y 2), donde se incluyen los planos y el modelado 3D.

Para evaluar la precisión y el nivel de detalle de las zonas críticas identificadas en la estructura, se realizó una comparación entre las coordenadas obtenidas en campo mediante instrumentación topográfica y las coordenadas extraídas del modelo tridimensional generado a partir de la fotogrametría. Además, se generó una nube densa con 72.82.809 puntos y un error de reproyección 0.246793 (0.615024 pix) de con un tiempo de procesamiento de 175 minutos y 16 segundos. La tabla 3 indica las coordenadas de los puntos obtenidos en campo, estos representan una desviación estándar de 7.40 cm en x, 69.01 cm en y y 33.50 cm en z, lo que indica una alta dispersión en la componente y, posiblemente debido a errores sistemáticos o humanos en la captura. A su vez el error medio cuadrático en los datos de campo fue de 7.26 cm x, 65.50 cm en y y 32.90 cm en z, lo que reafirma una mayor variabilidad de los datos del componente y en comparación los otros ejes.

Por otro lado, la tabla 4 muestra las coordenadas tomadas sobre el modelo 3D. En este caso, la desviación estándar en x, y y z fue de 7.37 cm, 24.21 y 16.48 cm respectivamente, evidenciando una menor dispersión en la coordenada y en comparación con los valores originales. De manera similar, el error medio cuadrático en el modelo 3D alcanzó valores de 7.25 cm x, 11.97 cm en y y 10.81 cm en z, lo que refleja una diferencia considerable.

Tabla 3

Coordenadas de puntos tomados en campo

Punto	X	Y	Z
1	1061246.75	875885.8125	969.00
2	1061264.375	875894.125	968.22
3	1061264.875	875902.6875	969.36
4	1061264.75	875904.3125	968.82
5	1061252	875890.75	969.35
6	1061264.5	875899.1875	968.86
7	1061251.875	875893.3125	969.11
8	1061250.75	875899.375	969.14
9	1061250.5	875902.625	969.34
10	1061264.5	875896.375	968.97
11	1061249.125	875905.4375	968.86
12	1061250.625	875889.5625	969.34
13	1061264.5	875897.9375	968.98
14	1061264	875901.25	968.75
15	1061264.375	875888.9375	969.32
16	1061249.25	875887.75	968.70
17	1061249.875	875888.5625	969.18
18	1061264.125	875902.375	969.23
19	1061265.25	875886.6875	968.71
20	1061265.25	875887.625	968.79
21	1061265.375	875885.375	968.75

22	1061252	875896.5	969.24
23	1061264.75	875892.375	968.92
24	1061264.5	875891.0625	969.09
25	1061248.625	875886.5625	969.25

Tabla 4

Coordenadas de puntos tomados sobre el modelo

Punto	X	Y	Z
1	1061246.8	875886	969.132
2	1061248.5	875887	969.181
3	1061249.2	875905	968.708
4	1061249.2	875888	968.854
5	1061249.8	875889	969.029
6	1061250.4	875903	969.227
7	1061250.7	875890	969.451
8	1061250.8	875899	969.155
9	1061251.9	875893	969.203
10	1061251.9	875891	969.197
11	1061252.1	875896	969.233
12	1061263.9	875901	968.687
13	1061264.1	875902	969.267
14	1061264.4	875889	969.169
15	1061264.4	875894	968.37
16	1061264.4	875891	968.942

17	1061264.5	875896	969.125
18	1061264.5	875898	968.983
19	1061264.6	875899	968.89
20	1061264.8	875893	968.882
21	1061264.9	875904	968.937
22	1061265	875903	969.214
23	1061265.2	875887	968.681
24	1061265.3	875887	968.702
25	1061265.4	875885	968.824

Discusiones

El modelado 3D del Puente Chipichape permitió obtener una visión detallada de su estado actual y contrastarla o compararla con los registros previos de 2009, a partir de esta comparación, se identifica un deterioro sucesivo en su estructura, lo que plantea algunas preguntas sobre los factores que contribuyen a esta degradación y las posibles estrategias para su conservación y preservación. Es por ello por lo que a continuación, se expondrá un análisis detallado de los principales hallazgos en relación con estudios previos, sus implicaciones en el mantenimiento y estabilidad del puente, buscando establecer la diferencia entre lo hallado en el trabajo presente y lo planteado por otras antes realizadas.

Disponer de una estrategia para la captura de información de bienes culturales, mediante técnicas fotogramétricas ha demostrado ser una herramienta efectiva y accesible para el análisis y documentación de los bienes de interés patrimoniales. En este caso se integran las imágenes terrestres y aéreas que permitieron generar un modelo tridimensional, facilitando la evaluación de su estado actual. Los resultados obtenidos en este trabajo coinciden con los hallazgos presentados por (Benavides et al., 2019) en el levantamiento arquitectónico del Castillo de Piñar, donde se destaca que la fotogrametría multi-imagen basada en UAVs ha resultado ser unas las herramientas más eficientes para la adquisición de datos espaciales.

Sin embargo, la fotogrametría no solo se ha afianzado como una herramienta para la documentación visual, sino que también como un medio para el análisis y la interpretación arquitectónica, como lo señala Calvadillo Ardila, los modelos 3D permiten realizar mediciones precisas y generar planimetrías que facilitan la evaluación (Calvadillo et al., 2021).

Combinar modelos fotogramétricos aéreos y terrestres ha demostrado ser una planificación efectiva para documentar y preservar el patrimonio cultural, debido a que proporciona un nivel de detalle suficiente para la identificación de áreas críticas de conservación. En el caso de este trabajo la fotogrametría permitió que se generar un modelo tridimensional detallado que facilitara la comparación con registros previos y la detección de deterioros progresivos en la estructura. Los resultados obtenidos encajan con los hallazgos presentados con (Salinas Niacato, 2019), que destaca que la alianza de la fotogrametría terrestre y aérea perfecciona la precisión en la reconstrucción de modelados 3D al nivelar las limitaciones de cada técnica por separado.

Evaluar la precisión y el detalle de las zonas críticas identificadas en el Puente Chipichape fue posible gracias a la unión de ambos modelos fotogramétricos permitiendo una caracterización detallada de los daños estructurales. Los resultados obtenidos muestran que la metodología proporciono información confiable para identificación del deterioro de la estructura, facilitando la planificación de estrategias de conservación. Estos análisis coinciden con los que se planteó en el estudio de Pulido (2017), donde se enfatiza la importancia de la precisión en el levantamiento de datos para la correcta interpretación del estado estructural de los bienes patrimoniales. Según estos autores, el uso de estas técnicas fotogramétricas permite que se generen modelos tridimensionales con una alta resolución, lo que a su vez permite que se pueda evaluar la evolución con el tiempo.

Conclusiones

Mediante la combinación de técnicas fotogramétricas aéreas y terrestres, fue posible identificar con detalle el estado actual del Puente Chipichape y crear un modelo tridimensional de gran precisión. La validez de este modelo a través de mediciones comparativas con levantamientos topográficos tradicionales demostró que la desviación estándar obtenida se encuentra dentro de un margen de error aceptable, lo que garantiza su utilidad como herramienta para la conservación del puente. Este nivel de detalle permite identificar de manera temprana las áreas críticas, lo que facilita la toma de decisiones que servirán de base para futuras intervenciones.

A través del uso de drones y cámaras de alta resolución, se logró combinar datos fotogramétricos obtenidos desde diferentes perspectivas. La implementación de la metodología de Structure-from-Motion (SfM) fue adecuada para este tipo de reconstrucción de alto detalle, permitiendo una visualización precisa y completa del puente. De esta forma, fue posible identificar con claridad escenarios críticos como grietas, corrosión y otros signos de degradación en su estructura, lo cual es esencial para definir estrategias de conservación. Además, el modelado tridimensional generado no cumple una función documental, sino que también representa una base sólida para estudios adicionales, como simulaciones estructurales, análisis de carga y evaluación de estratégicas de rehabilitación.

Los resultados obtenidos indican que el deterioro del puente ha avanzado significativamente desde la última actualización documentada en el año 2009. Comparaciones con los registros previos permitieron que se identificaran nuevos problemas en cuanto a la estructura. Esto también nos muestra que el modelo tridimensional del Puente Chipichape es preciso, con un margen de error mínimo validado por mediciones comparativas con levantamientos topográficos tradicionales (GNSS y estación total). Esta validación corrobora la solidez del modelo 3D para su uso en conservaciones de bienes culturales, así como en la planificación de acciones de preservación de estructuras de manera poco invasiva.

Se concluye que la mayor parte de las zonas críticas encontradas en el Puente Chipichape pueden ser manejadas con intervenciones de conservación planificadas, basadas en los datos proporcionados por el modelo tridimensional. Al menos el 35% de las áreas del puente presenta un deterioro significativo que requerirá acciones de intervención. Sin embargo, la implementación de estrategias de mantenimiento preventivo, apoyadas en los datos

generados, puede mitigar los riesgos de deterioro y asegurar la preservación del puente a largo plazo.

A pesar de los logros, la investigación enfrentó algunos desafíos, como la interferencia de la vegetación en la captura de imágenes y la falta de georreferenciación en algunas fotografías aéreas. Los desafíos exigieron una metodología de ajustes en el proceso de documentación, lo que pone de relieve la necesidad de una planificación más precisa en estudios futuros en el proceso de documentación, destacando la necesidad de una planificación más precisa en los estudios futuros. En este sentido, la combinación de fotografía aérea y terrestre resultó ser un método eficaz y reproducible con potenciales aplicaciones en la conservación de otros bienes patrimoniales.

La metodología utilizada en este proyecto muestra la eficacia de la combinación de técnicas fotogramétricas para la conservación del patrimonio cultural. La metodología puede utilizarse como guía para proyectos comparables que involucren otros bienes culturales, dando como resultado una conservación más precisa, documentada y sostenible. Además, la precisión y utilidad de los modelos tridimensionales dependen de la actualización continua de los modelos que dependen de la actualización continua de los datos y de la participación de las autoridades locales. Este El proyecto destaca la necesidad de enfoques integrados que enfoques que involucren la participación de diversos actores para garantizar la preservación oportuna de los bienes culturales la participación de diversos actores para garantizar la preservación oportuna de los bienes culturales.

Recomendaciones

Para futuros estudios y observaciones fotogramétricas, se recomienda establecer un programa de monitoreo periódico del Puente Chipichape con el fin de evaluar la evolución de su estado estructural. La creación de modelos tridimensionales a intervalos regulares permitirá identificar cambios en el estado del puente y aplicar medidas preventivas de conservación antes de que la degradación alcance niveles críticos.

Se sugirió complementar la metodología fotogramétrica con tecnologías complementarias como LiDAR o termografía infrarroja. Las herramientas pueden proporcionar información más detallada sobre la estructura del puente al identificar problemas que no son fácilmente evidentes desde el exterior, como irregularidades internas o áreas donde se ha perdido material estructural. La combinación de estas Estas técnicas fortalecerían la documentación y la toma de decisiones para la preservación del puente.

Para futuros trabajos se recomienda evaluar la afluencia o congestión vehicular de la zona debido a que este fue un factor limitante a la hora de la captura dado que se cruzaba con la hora adecuada en cuanto a luz solar para una mejor obtención de las fotografías, adicionalmente se recomienda realizar pruebas de vuelo que permitan conocer factores que puedan alterar la calidad de levantamiento.

Además, se recomienda abarcar al menos 3 m adicionales al área de estudio, esto para cubrir completamente el espacio deseado y hacer posibles modificaciones o recortes en el momento de limpieza y depuración de la nube de puntos.

Para el procesamiento de las fotografías se recomienda realizar todos los procesos dentro de un mismo proyecto dado que los formatos de salida de algunos softwares no son compatibles al momento de la unión lo que podría causar inconvenientes al momento de la integración.

Para la integración entre la fotogrametría aérea y terrestre se recomienda tomar las fotografías con una cámara que posea GPS integrado, esto para evitar inconvenientes con los bloques que no se encuentran referenciados al momento de fusionar las nubes de puntos o los modelos tridimensionales.

Se recomienda realizar un mantenimiento a la estructura del puente específicamente en las zonas que presentan agrietamiento, corrosión, oxidación y deterioro, con el fin de mantener

el bien de interés cultural en el mejor estado posible para evitar que la estructura se convierta a futuro en un peligro para los habitantes de la zona o puede hacer el causante de un accidente sobre la vía en la cual se encuentra situado.

Desde el punto de vista patrimonial, se aconseja que las organizaciones o los organismos responsables de la conservación del puente incorporen el modelo 3D en plataformas de acceso para facilitar a los profesionales del sector su consulta y concienciar sobre la importancia de preservarlos. La gestión de los bienes culturales es la digitalización del patrimonio a través de modelos tridimensionales, lo que permite su análisis y estudio sin necesidad de intervenciones físicas que puedan comprometer su integridad.

Finalmente se recomienda que las intervenciones de conservación prioricen las áreas más críticas identificadas en el modelo tridimensional, asegurando el uso de materiales y técnicas compatibles con la estructura original. Adicionalmente, se sugiere tomar medidas para reducir la vegetación, evitando que estos factores aceleren el deterioro. La combinación de estrategias de monitoreo continuo y mantenimiento preventivo garantizará la protección a largo plazo del puente, evitando que su condición se deteriore hasta el punto de comprometer la estabilidad estructural y la seguridad.

Bibliografía

Agisoft. (2021). *Metashape Professional 1.8: User manual*. Recuperado de https://www.agisoft.com/pdf/metashape-pro_1_8_en.pdf

Alcaldía de Cali. (2023). *Chipichape y Avenida Sexta: Civilización de pueblos, maquinaria de sueños y emblemas de ciudad*. Recuperado de https://www.cali.gov.co/infraestructura/publicaciones/159416/chipichape-y-avenida-sexta-civilizacion-de-pueblos-maquinaria-de-suenos-y-emblemas-de-ciudad/

Baque Solis, J. E., Cuadrado Torres, L. M., & Palacios Paredes, B. G. (2022). *Análisis comparativo topográfico sobre levantamientos altimétricos con RTK GNSS, Estación Total y Drone en Manta*. https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=9227632

Bustamante Agudelo, D., y Montoya Alzate, M. (2014). *Fotogrametría digital con uso de vehículos aéreos no tripulados en terrenos de la Escuela de Ingeniería de Antioquia (Sede Las Palmas)*. Universidad EIA. Recuperado de https://repository.eia.edu.co/handle/11190/2027

Calvillo Ardila, J. A., Calvillo Risco, J. A., & Lagóstena Barrios, L. G. (2021). La aplicación de técnicas fotogramétricas para la documentación del patrimonio: el caso de la Noria de Autrán (Puerto Real, Cádiz). *Matagorda: Revista de estudios puertorrealeños*, *3*, 13-40.

Caro Herrero, J. L. (2012). *Fotogrametría y modelado 3D: un caso práctico para la difusión del patrimonio y su promoción turística*. Recuperado de https://riuma.uma.es/xmlui/bitstream/10630/5134/1/fotogrametria_turitec_jlcaro_UTF8.pdf

Chacón, S., & Ruiz, M. (2022). *Análisis comparativo de técnicas fotogramétricas para el modelamiento tridimensional del patrimonio*. Recuperado de http://hdl.handle.net/11349/29392

del Río Santana, O., Gómez Córdova, F. de J., López Carrillo, N. V., Saenz Esqueda, J. A., & Espinoza Fraire, A. T. (2020). *Análisis comparativo de levantamiento topográfico tradicional y tecnología de Drones*. Revista de Arquitectura e Ingeniería, 14(2), 1–10. https://www.redalyc.org/journal/1939/193963490001/193963490001.pdf

Departamento Administrativo de Planeación Municipal. (2009). *Bienes inmuebles de interés cultural de Santiago de Cali: Puente Chipichape*. Recuperado de www.cali.gov.co

Echavez Rocha, L y Poveda Atencia, J. (2022). Modelación 3D del Cordón Amurallado de la ciudad de Cartagena De Indias caso de estudio: tramo comprendido entre el Baluarte de Santo Domingo hasta el Baluarte de San Ignacio. Universidad de Cartagena. Disponible en: https://hdl.handle.net/11227/15530

El País. (2023). *El patrimonio histórico de Cali: Pura fachada, esto dicen arquitectos, historiadores y veedores*. El País. Recuperado de https://www.elpais.com.co/cali/el-patrimonio-historico-de-cali-pura-fachada-esto-dicen-arquitectos-historiadores-y-veedores-1214.html

Federman, A., Shrestha, S., Quintero, M. S., Mezzino, D., Gregg, J., Kretz, S., & Ouimet, C. (2018). *Unmanned Aerial Vehicles (UAV) Photogrammetry in the Conservation of Historic Places: Carleton Immersive Media Studio Case Studies. Drones, 2*(2), 18. https://doi.org/10.3390/drones2020018

Flores Tenza, M. (2018). *Desarrollo de algoritmos de odometría visual mediante una cámara de 360 grados*. Recuperado de http://hdl.handle.net/11000/5303

Flórez Cardona, L., Herrera Valencia, A. C., & Sevilla Cadavid, G. (2023). *La sensibilización como estrategia de enseñanza-aprendizaje en la valoración del Patrimonio Cultural*. Revista Oblicua, 16, 8–27. https://www.fadp.edu.co/wp-content/uploads/2023/12/OBLICUA-16-2023B-1-8-27.pdf

Fundación de Estudios Internacionales. (2021). *La destrucción del patrimonio cultural: Un repaso histórico*. Fundación de Estudios Internacionales. Recuperado de https://www.fei.org.es/2021/05/05/la-destruccion-del-patrimonio-cultural-un-repaso-historico/

Furukawa, Y., & Hernández, C. (2015). *Multi-View Stereo: A tutorial*.

Gómez Ávalos, J. C. (2020). *Levantamiento topográfico mediante fotogrametría aérea con dron y mediciones GPS de Alto Larán y Río Chico, Ica*. Recuperado de https://sigrid.cenepred.gob.pe/sigridv3/storage/biblioteca/13821_levantamiento-

topografico-mediante-fotogrametria-aerea-con-dron-y-mediciones-gps-de-alto-laran-y-rio-chico-ica.pdf

García Pérez de Arce, I. (2017). *Documents or events? Ephemeral works of the Museum of Solidarity 1971-1973* [Tesis doctoral, Pontificia Universidad Católica de Chile].

Gutiérrez Pozo, J. P. (2021). *Modelado 3D mediante el programa Autodesk Maya para la conservación y difusión del Patrimonio arquitectónico en la ciudad de San Gabriel* [Tesis de pregrado, Universidad Técnica del Norte]. Recuperado de https://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/11583 9

Javier, Q. V., & Casas Pérez, M. del C. (2011). Antecedentes y consideraciones para la conservación del patrimonio cultural en el siglo XXI. *Tlatemoani*, 11, 1-11. Recuperado de https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7320919

Jauregui, L. (2009). *Introducción a la fotogrametría*.

Kraus, K., Harley, I. A., & Kyle, S. (2007). *Photogrammetry: Geometry from images and laser scans*. De Gruyter.

López, A., Ortiz, B., y Sánchez, C. (2022). *Caracterización de los predios del casco urbano para la identificación del patrimonio arquitectónico por medio de un inventario predial utilizando SIG y fotogrametría digital. Caso de estudio Cepitá para los años 2013 y 2022*. Recuperado de http://repositorio.uts.edu.co:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/10519/F-DC-125%20%20Proyecto%20FINAL%20Lopez%2C%20Ortiz%20y%20Sanchez%20para%20repositorio.pdf?sequence=2&isAllowed=y

Lu, H.-M., Yao, L.-C., Lin, J.-T., & Liu, S. S. (2023). *Digital heritage and preservation: Aerial photogrammetry and LiDAR applied to the mapping of Kapayuwanan, indigenous Paiwan settlements, Taiwan*. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLVIII-M-2-2023, 985–993. https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-M-2-2023-985-2023

Merchan, J. S. & Cardenas, M. (2022). *Reconstrucción 3d e inspección visual estructural mediante el uso de tecnología dron del santuario la Balvanera, patrimonio cultural y turístico del municipio de chía*. Recuperado de: http://hdl.handle.net/11371/5020

Monstar. (2018). De lo real lo virtual desde un celular: Fotogrametría básica. *CG Challenge*. Recuperado de https://cg-challenge.com/2018/05/07/de-lo-real-lo-virtual-desde-un-celular-fotogrametria-basica/

Morales González, M. V. (2016). *Digitalización de una imagen de la Virgen del Carmen y usos del 3D en la Conservación y Restauración* [Trabajo de fin de grado, Universidad de La Laguna]. Repositorio Institucional de la Universidad de La Laguna. https://riull.ull.es/xmlui/bitstream/915/3451/1/DIGITALIZACION%20DE%20UNA%20IMAGEN%20DE%20LA%20VIRGEN%20DEL%20CARMEN%20Y%20USOS%20DEL%203D%20EN%20LA%20CONSERVACION%20Y%20RESTAURACION.pdf

Murillo Muñoz, A. Z. C. (2018). Mtro. Juan Antonio García Ugalde: "Fotogrametría digital como herramienta de documentación del patrimonio cultural edificado". *Historia Y Conservación Del Patrimonio Edificado*, *1*(1), 81–90. https://doi.org/10.32870/rhcpe.v1i1.28

Nicolalde Perugachi, J. (2023). Modelado 3D utilizando fotogrametría del patrimonio arquitectónico de la iglesia "Inmaculada Concepción" de la parroquia Atahualpa. Quito : UCE. Disponible en: http://www.dspace.uce.edu.ec/handle/25000/28893

Ochoa-Arias, P., & Delgado-Pinos, O. A. (2020). *Modelo de registro fotogramétrico 2D y 3D del patrimonio edificado de Cuenca*. Repositorio Institucional de la Universidad Politécnica Salesiana. https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/19243

Páez Cuervo, A., Gonzales Hernández, J. D., y Upegui, E. S. (2020). Fotogrametría SfM como herramienta para la preservación del patrimonio cultural de Bogotá (Colombia): Caso de estudio La Rebeca. *UD y la Geomática*, (15). https://doi.org/10.14483/23448407.15252

Paredes Giler, J. F. (2019). *Modelos de gestión para la conservación de puentes tipo fábrica* [Trabajo Fin de Máster, Universidad Politécnica de Madrid]. Archivo Digital UPM. https://oa.upm.es/56905/1/TFM_JIMMY_FERNANDO_PAREDES_GILER.pdf

Peinado Checa, Z., Fernández Morales, A., & Agustín Hernández, L. (2014). Combinación de fotogrametría terrestre y aérea de bajo coste: El levantamiento tridimensional de la iglesia de San Miguel de Ágreda (Soria). *Virtual Archaeology Review, 5*(10), 51. Recuperado de https://doi.org/10.4995/var.2014.4210

Pulido Sierra, L. M. (2017). *Técnicas para un levantamiento arquitectónico*. Revista Oblicua, 11, 19–27. https://www.fadp.edu.co/wp-content/uploads/2018/06/revista-oblicua-11-2.pdf

Quenta Amones, R. (2022). *Aplicación de la metodología BIM para la gestión y conservación del patrimonio cultural: Prefectura y cárcel pública de Tacna*. Recuperado de https://repositorio.upt.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12969/2661/Quenta_Amones_Roger-P01.pdf?sequence=2&isAllowed=y

Ramírez Cardona, I y Zakzuk Falquez, N. (2020). Modelación en 3d, identificación y georreferenciación de patologías de un tramo del cordón amurallado de la ciudad de Cartagena Caso de estudio: Baluarte Santa catalina - Baluarte la Merced. Universidad de Cartagena. Recuperado de https://hdl.handle.net/11227/10316

Salinas Niacato, L. F. (2023). *La fotogrametría en el levantamiento del patrimonio edificado. Caso de estudio: ciudad de Latacunga*. Repositorio UTIC. Recuperado de https://repositorio.uti.edu.ec/bitstream/123456789/7289/1/Salinas%20Niacato%20Luis%20Fernando.pdf

Savarese, S., & Fei-Fei, L. (2007). 3D generic object categorization, localization and pose estimation. Recuperado de https://doi.org/10.1109/ICCV.2007.4408987

Schönberger, J. L., & Frahm, J.-M. (2016). Structure-from-Motion Revisited. Recuperado de https://ieeexplore.ieee.org/document/7785089

Simón Peña Villasenín, E. (2019). *Aplicaciones de la fotogrametría de bajo coste al estudio de patrimonio arqueológico y arquitectónico*. Recuperado de https://minerva.usc.es/rest/api/core/bitstreams/23e7d75d-03c9-4068-ba98-7343977b063b/content

Soto Suárez, M., Muñoz Castillo, M. T., y Morcate Labrada, F. (2014). La conservación del patrimonio edificado, una responsabilidad social desde la universidad. *Arquitectura y Urbanismo*, *35*(2), 100-111. Recuperado el 17 de enero de 2025, de http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1815-58982014000200010&lng=es&tlng=es

Tareen, S. K., & Saleem, Z. (2018). A comparative analysis of SIFT, SURF, KAZE, AKAZE, ORB, and BRISK. En *2018 International Conference on Computing, Mathematics and*

Engineering Technologies. Recuperado de https://doi.org/10.1109/ICOMET.2018.8346440

Terán Bonilla, J. A. (2004). *Consideraciones que deben tenerse en cuenta para la restauración arquitectónica*. Conserva, (8), 101–122. https://www.cncr.gob.cl/sites/www.cncr.gob.cl/files/2023-01/7.%20Consideraciones%20restauraci%C3%B3n%20arquitect%C3%B3nica.pdf

Triggs, B., McLauchlan, P., Hartley, R., & Fitzgibbon, A. (2000). *Bundle adjustment – A modern synthesis*. Recuperado de http://ugweb.cs.ualberta.ca/~vis/courses/CompVis/readings/3DReconstruction/bundleadjustment.pdf

UNESCO. (s. f.). Patrimonio mundial. Recuperado de https://www.unesco.org/es/world-heritage

UNESCO. (s. f.). ¿Qué es el patrimonio inmaterial? Recuperado de https://ich.unesco.org/es/que-es-el-patrimonio-inmaterial-00003

Villar, F. A., Candelario, S. y Díaz, J. (2023). Drones, fotogrametría y sistemas de información geográfica: Algunos aportes a la arqueología de contextos industriales. *Comechingonia, 27*(1), 21-30. https://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1851-00272023000100021

Wajjari, A. (2023). *Modelado 3D de una escultura mediante fotogrametría de objeto cercano*. Recuperado de https://m.riunet.upv.es/handle/10251/209618

Apéndice

Apéndice 1

Apéndice 2