



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**ANÁLISIS COMPARATIVO DE FOTOGRAMETRÍA Y
LIDAR PARA EL MONITOREO TEMPORAL DE
ESTRUCTURAS CIVILES AFECTADAS POR
SUBSIDENCIA: ESTUDIO DE CASO EN COAPA,
CIUDAD DE MÉXICO**

TESIS

Que para obtener el título de

Ingeniera Geofísica

P R E S E N T A

Gabriela Vidal García

DIRECTORA DE TESIS

Dra. Nelly Lucero Ramírez Serrato



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2024

Dedicatoria

A la Tierra, por su infinita belleza y misterios;
a la vida, por su danza entre desafíos y esperanzas;
a mi familia y amigos, por ser raíces y alas, por ser mi fuerza y refugio;
a Ceniza, por recordarme la ternura en cada rincón de este viaje.
y a todos los que creen en un futuro mejor, donde el amor, la libertad y la
paz guíen cada paso hacia el bien común.

Agradecimientos

Al Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT) por el respaldo económico brindado para la realización del proyecto IA101421.

A la Universidad Nacional Autónoma de México y a la Facultad de Ingeniería, por proporcionarme los recursos necesarios para mi formación académica.

A la doctora Nelly Lucero Ramírez Serrato, por la confianza, la orientación, la paciencia y los conocimientos compartidos, que me permitieron finalizar este proyecto.

A la Ing. Thalía Alfonsina Reyes Pimentel, a la Dra. Graciela Herrera Zamarrón, a la Dra. Mariana Patricia Jácome Paz y al Mtro. Néstor López Valdés por su invaluable apoyo en la revisión de este trabajo.

A mi mamá, Rocío García Arteaga, por todos sus cuidados, los abrazos, por su valentía, fuerza, amor y enseñanzas. A mi papá, Germán Vidal Mendoza, por toda su confianza y aliento constante. A mis hermanos, Germán y Valentina, por ser una guía para mí y por todos los buenos momentos compartidos. A mi sobrino, Donovan Medina Vidal, por ser una luz en mi vida, por todas las enseñanzas, risas y juegos que hemos compartido. Gracias por ser un niño tan tierno, valiente y gentil.

A Diana Ramírez, Vanessa Flores y Ana Paula Vázquez, por ser otra familia para mí, por su ejemplo, sus consejos, su compañía, y por tantos momentos de contención y reflexión.

A Ricardo Álvarez, Ana Daniela Sánchez, Víctor González, André Morales, Alejandro Reyes, Alan Contreras y a todos los amigos que estuvieron a mi lado brindándome su amistad y compañerismo durante estos años.

A Luis González, por alentarme durante este proceso.

A Ceniza, mi gata, por existir.

ÍNDICE

Dedicatoria	1
Agradecimientos.....	2
Resumen	10
Summary	11
1. Introducción	12
Hipótesis.....	15
Objetivos	15
Objetivo general	15
Objetivos específicos.....	15
2. Antecedentes	16
Antecedentes del área de estudio	16
3. Metodología	23
Objetos de estudio	24
Adquisición de datos	24
Levantamientos con dron	28
Toma de puntos con GPS	28
Toma de medidas físicas reales	29
Experimento en laboratorio.....	29
Experimento en campo.....	29
Medidas reales Edificio Palomares	31
Medidas reales Edificio Salmón.....	33
Reconstrucción 3D. Software utilizado.....	35
App Polycam para LIDAR.....	35
Red CORS	35
Agisoft Metashape Professional.....	36

Meshroom.....	36
Cloud Compare	36
Reconstrucción 3D. Procesado.....	37
Alineado de fotografías	37
Construcción de nubes de puntos	38
Construcción de malla.....	38
Construcción de textura.....	38
Escalado (Corrección geométrica)	39
Toma de medidas de los modelos 3D en Cloud Compare	40
Importación de nube de puntos	40
Segmentación de área de interés	40
Superposición de modelos 3D.....	40
Toma de medidas	40
4. Resultados	44
Comparación de softwares	44
Experimento en laboratorio.....	45
Experimento en campo.....	50
Aplicación a estructuras civiles.....	53
Edificio Palomares	53
Edificio Salmón.....	58
5. Discusión.....	65
Comparación de softwares	65
Experimentos controlados.....	65
Experimento en laboratorio.....	65
Experimento en campo.....	66
Aplicación a estructuras civiles.....	67

6. Conclusiones 68

7. Referencias 69

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Riesgo de inundaciones en Ciudad de México. Elaboración propia con los datos del Atlas de Riesgos de la Ciudad de México (SGIRP, revisado en 2023).....	17
Figura 2. Socavones registrados en la Ciudad de México. Elaboración propia con los datos del Atlas de Riesgos de la Ciudad de México (SGIRP, revisado en 2023).....	17
Figura 3. Geología de la Ciudad de México (SGIRP, revisado en 2023).	18
Figura 4. Peligro sísmico en Tlalpan. La estrella verde representa la zona de estudio. El cuadro muestra un acercamiento a dicha zona. Elaboración propia con los datos del Atlas de Riesgos de la Ciudad de México (SGIRP, revisado en 2023).....	19
Figura 5. Principales encharcamientos en Tlalpan. Elaboración propia con los datos del Atlas de Riesgos de la Ciudad de México (SGIRP, revisado en 2023).....	19
Figura 6. Grieta sobre avenida Acoxpa en 2016.	20
Figura 7. Desalojan a vecinos de Prados Coapa por la inundación en la zona en mayo de 2017 (Noticieros Televisa).....	20
Figura 8. La tienda en la esquina de Miramontes y Acoxpa presenta daños tras el sismo del 19 de septiembre de 2017.....	20
Figura 9. Socavón en Coapa. Agosto de 2023.	20
Figura 10. Hundimientos en Ciudad de México. Elaboración propia con los datos del Atlas de Riesgos de la Ciudad de México (SGIRP, revisado en 2023).....	21
Figura 11. Croquis del área de estudio en Coapa, Cuemanco en la alcaldía Tlalpan. A) Figura 9. Socavón. B) Figura 7. Inundación. C) Figura 6. Grieta. D) Figura 8. Daño por Sismo. E) Edificio Salmón. F) Edificio Palomares.....	21
Figura 12. Edificio Palomares 16, vista antes de ser demolido. A la Derecha edificio actual.....	22
Figura 13. Edificio Salmón. Notoria inclinación hacia el edificio que se encuentra a la izquierda en la foto.....	22
Figura 14. Diagrama de la metodología.	25
Figura 15. Señalamiento de circulación sobre calle Escolar en Ciudad Universitaria y caja completa.	27
Figura 16. Señalamiento de circulación sobre calle Escolar en Ciudad Universitaria y caja con altura de 20 cm.	27
Figura 17. Medidas reales. Altura: 16 cm.	29
Figura 18. Medidas reales. Altura: 20 cm.	29

Figura 19. Medidas reales del experimento en campo.	30
Figura 20. Medidas reales del Edificio Palomares.	33
Figura 21. Medidas reales del Edificio Salmón.	35
Figura 22. Procesado fotogramétrico	39
Figura 23. Medidas tomadas en nube de puntos generada por fotogrametría para el experimento en campo.	41
Figura 24. Medidas tomadas en nube de puntos generada por LiDAR para el experimento en campo.	42
Figura 25. Medición real y en nube de puntos del edificio Palomares.	43
Figura 26. Medición real y en nube de puntos del edificio Salmón.	43
Figura 27. Nubes de puntos de la reconstrucción 3D del edificio Palomares 16. A) Nube de puntos generada en Agisoft. B) Nube de puntos generada con Meshroom.	44
Figura 28. Grafica % de error de fotogrametría vs. LiDAR en laboratorio.	49
Figura 29. Grafica % de error de fotogrametría vs. LiDAR en campo.	52
Figura 30. Comparación entre nubes de puntos generadas en 2021 (a), en 2022 (b) y superposición de 2022 sobre 2021 (c) del edificio Palomares.	53
Figura 31. Comparación entre nubes de puntos generadas en 2021 (a), en 2022 (b) y superposición de 2022 sobre 2021 (c) del edificio Salmón.	58
Figura 32. Porcentaje de error en medidas tomadas en nube de puntos en reconstrucciones sin corrección vs. reconstrucciones con corrección geométrica.	63
Figura 33. Promedio de diferencia en [cm] en medidas tomadas en nube de puntos en reconstrucciones sin corrección vs. reconstrucciones con corrección geométrica.	64

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Síntesis de adquisición de datos.....	26
Tabla 2. Parámetros de vuelo en dron Parrot de Anafi.	28
Tabla 3. Parámetros utilizados en el procesamiento fotogramétrico.	37
Tabla 4. Comparación de número de puntos en nube de puntos generada por Agisoft y Meshroom.....	44
Tabla 5. Resultados obtenidos con fotogrametría para la caja de 16 cm de alto en el experimento en laboratorio.	45
Tabla 6. Resultados obtenidos con fotogrametría para la caja de 20 cm de alto en el experimento en laboratorio.	46
Tabla 7. Resultados obtenidos con LiDAR para la caja de 16 cm de alto en el experimento en laboratorio.	47
Tabla 8. Resultados obtenidos con LiDAR para la caja de 20 cm de alto en el experimento en laboratorio.	48
Tabla 9. Resultados obtenidos con fotogrametría en el experimento en campo.....	50
Tabla 10. Resultados obtenidos con LiDAR en el experimento en campo.....	51
Tabla 11. Resultados de mediciones obtenidas de la nube de puntos fotogramétrica del Edificio Palomares a partir de las fotografías tomadas con celular en los años 2021 y 2022, sin corrección geométrica.	54
Tabla 12. Resultados de mediciones obtenidas de la nube de puntos fotogramétrica del edificio Palomares a partir de las fotografías tomadas con celular en los años 2021 y 2022, con corrección geométrica.	55
Tabla 13. Resultados de mediciones obtenidas de la nube de puntos fotogramétrica del edificio Palomares a partir de los vuelos realizados con dron en el año 2022, sin corrección geométrica.....	56
Tabla 14. Resultados de mediciones obtenidas de la nube de puntos fotogramétrica del edificio Palomares a partir de los vuelos realizados con dron en el año 2022, con corrección geométrica....	57
Tabla 15. Resultados de mediciones obtenidas de la nube de puntos fotogramétrica del edificio Salmón a partir de las fotografías tomadas con celular en los años 2021 y 2022, sin corrección geométrica.	59
Tabla 16. Resultados de mediciones obtenidas de la nube de puntos fotogramétrica del edificio Salmón a partir de las fotografías tomadas con celular en los años 2021 y 2022, con corrección geométrica.	60

Tabla 17. Resultados de mediciones obtenidas de la nube de puntos fotogramétrica del edificio Salmón a partir de los vuelos realizados con dron en el año 2022, sin corrección geométrica. 61

Tabla 18. Resultados de mediciones obtenidas de la nube de puntos fotogramétrica del edificio Salmón a partir de los vuelos realizados con dron en el año 2022, con corrección geométrica. 62

Resumen

El monitoreo preciso de la deformación por subsidencia se ha convertido en un aspecto crítico para identificar zonas de riesgo y aplicar medidas de mitigación. En este contexto, la reconstrucción 3D a partir de datos fotogramétricos y LiDAR ha surgido como una herramienta fundamental para evaluar cambios locales en el terreno, pero su eficacia aún no ha sido comprobada completamente. La aplicación exitosa de la reconstrucción 3D mediante técnicas fotogramétricas y LiDAR no solo ofrecería una herramienta efectiva para identificar áreas de riesgo y estructuras afectadas, sino que también podría establecer la base para implementar estrategias de prevención y mitigación de riesgos en zonas propensas a fenómenos de hundimiento. El objetivo de este proyecto es la evaluación de la viabilidad de emplear esta metodología como una herramienta de monitoreo para estructuras civiles afectadas por la subsidencia. Se llevaron a cabo dos experimentos controlados (fotogrametría y LiDAR de rango corto) en Ciudad Universitaria y un experimento en campo no controlado (fotogrametría de rango corto y vuelos de dron), todos bajo una metodología de reconstrucción 3D. Para el experimento no controlado se consideró la problemática geológica en la colonia Coapa de la Ciudad de México, caracterizada por alto riesgo sísmico, formación de socavones y hundimiento. Para esto se seleccionaron dos edificios: Palomares y Salmón, ambos ubicados en la colonia Coapa. Estos edificios fueron objeto de monitoreo en dos momentos diferentes: abril de 2021 y abril de 2022. Los resultados obtenidos de las mediciones sobre los modelos 3D de estos edificios indican que es posible obtener información métrica confiable, con un margen de error mínimo del 0.02%, mediante el uso de software y parámetros apropiados. La corrección geométrica emerge como un factor crítico, ya que las reconstrucciones 3D que incorporaron esta corrección reflejaron mediciones más precisas y realistas. Con estos resultados se valida la utilidad práctica de esta técnica, resaltando su viabilidad y eficacia como método de monitoreo confiable para identificar, evaluar y gestionar la deformación por subsidencia. Este estudio proporciona una base sólida para futuras investigaciones y ofrece pautas prácticas para autoridades gubernamentales, urbanistas y expertos en geociencias, brindándoles una herramienta valiosa para abordar de manera proactiva los desafíos derivados de la subsidencia en áreas urbanas densamente pobladas.

Summary

Precise monitoring of subsidence-induced deformation has become a critical aspect in identifying risk zones and implementing mitigation measures. In this context, 3D reconstruction using photogrammetric and LiDAR data has emerged as a key tool for evaluating local changes in terrain, but its effectiveness has yet to be fully proven. The successful application of 3D reconstruction through photogrammetric and LiDAR techniques would not only provide an effective tool for identifying risk areas and affected structures, but it could also lay the groundwork for implementing prevention and mitigation strategies in areas prone to subsidence phenomena. The objective of this project is to assess the feasibility of employing this methodology as a monitoring tool for civil structures affected by subsidence. Two controlled experiments (short-range photogrammetry and LiDAR) were conducted at Ciudad Universitaria, Coyoacán and one uncontrolled field experiment (short-range photogrammetry and drone flights), all using 3D reconstruction methodology. For the uncontrolled experiment, the geological issues in the Coapa, Tlalpan neighborhood of Mexico City were considered, characterized by high seismic risk, sinkhole formation, and subsidence. Two buildings were selected for this: Palomares and Salmón, both located in the Coapa neighborhood. These buildings were monitored at two different times: April 2021 and April 2022. The results obtained from the measurements on the 3D models of these buildings indicate that reliable metric information can be obtained, with a minimal error margin of 0.02%, through the use of appropriate software and parameters. Geometric correction emerged as a critical factor, as 3D reconstructions incorporating this correction reflected more accurate and realistic measurements. These results validate the practical utility of this technique, highlighting its feasibility and effectiveness as a reliable monitoring method for identifying, evaluating, and managing subsidence-related deformation. This study provides a solid foundation for future research and offers practical guidelines for government authorities, urban planners, and geoscience experts, providing them with a valuable tool to proactively address the challenges posed by subsidence in densely populated urban areas.

1. Introducción

La subsidencia es un proceso natural e irreversible que actúa de forma gradual sobre la superficie terrestre en un área extensa causando hundimiento, que varía en un orden de magnitud de milímetros a centímetros al año. Según Herrera-García et al. (2021), alrededor del 8% de la superficie terrestre global, equivalente a 12 millones de km², corre un alto riesgo de subsidencia del suelo con una probabilidad mayor al 50%. Las áreas de mayor riesgo se encuentran en y cerca de áreas urbanas densamente pobladas, lo que provoca que este fenómeno pueda intensificarse con respecto a la escala de tiempo, aunado a otros procesos detonantes como lo es la actividad antropogénica, particularmente asociada a la extracción de fluidos como agua e hidrocarburos (Corapcioglu, 1984). Además, la subsidencia puede tener impactos significativos en la infraestructura y las comunidades en estas áreas, incluyendo daños a edificios, carreteras y puentes, aumento del riesgo de inundaciones y erosión costera, y pérdida de tierras cultivables y recursos hídricos (Herrera-García et al., 2021).

Las causas de este fenómeno pueden clasificarse, según la UNESCO, como "causas naturales" (como el movimiento tectónico y el aumento del nivel del mar), "causas inducidas por el hombre" (como la extracción intensiva de agua subterránea, fluidos geotérmicos, petróleo y gas, o la extracción de carbón, azufre, oro y otros sólidos a través de la minería, o construcción subterránea), o por "causas mixtas".

Además de la clasificación de la UNESCO, existen diversas aproximaciones para abordar el estudio de la subsidencia. Tal es el caso de Prokopovich (1979), que realiza una aproximación desde la naturaleza del fenómeno y del lugar donde tiene su origen y propone una clasificación en dos grupos: endógeno (procesos geológicos subterráneos) y exógeno (compactación de la cobertura superficial del suelo). Por su parte, Scott (1979) propone una clasificación de acuerdo con los mecanismos que lo desencadenan, mientras que González de Vallejo et al. (2002) hacen lo propio desde las causas que lo originan. Finalmente, Tomás et al. (2009), presentan una clasificación de acuerdo con las causas de origen, delimitando el marco de desarrollo en seis causales: disolución subterránea, construcción de obras subterráneas o galerías mineras, erosión subterránea (tubificación), flujo lateral, compactación y tectónica.

Estas deformaciones verticales del terreno, así como los cambios morfológicos que producen las subsidencias han sido ampliamente estudiados mediante diferentes técnicas como los Sistemas de

Posicionamiento Global, GPS (Zhao y Zhu, 2020), los levantamientos LIDAR (Laser Imaging Detection and Ranging), ya sea aéreos o terrestres (Yu et al., 2011) e interpretación de interferogramas diferenciales (Ferguson et al., 2015), con la cual se obtiene el resultado de comparar dos escaneos de diferente tiempo en el mismo sitio, por lo que se realizan varias comparaciones de dos momentos cada uno para obtener una serie de tiempo de cobertura amplia (Zhou et al., 2020).

En México, son varias las investigaciones que se han desarrollado bajo la temática de estudio de la evolución de las subsidencias, sin embargo, una de las zonas de mayor atención está en el centro del país, en donde se han realizado mapeos y estudios recopilatorios específicos para la caracterización del fenómeno (Comité-binacional. 1995; Ortiz-Zamora y Ortega-Guerrero, 2010; Carreón-Freyre et al., 2017) implementando Interferometría de Radar de Apertura Sintética Diferencial y GPS (Brudzinski et al., 2007; Osmanoglu et al., 2011) para la generación de mapas de peligro por subsidencias para la Ciudad de México (Cabral-Cano et al., 2011) en donde también se han realizado modelación matemática para caracterizar el acuífero subterráneo asociando las subsidencias a esta causal (Lezama et al., 2012) y análisis a partir de fotogeología (Ortiz-Zamora y Ortega-Guerrero, 2007). Durante años, se ha estudiado el estado de este acuífero, del cual se extraen 40 de los 60 m³/s de agua potable que se utilizan para abastecer la ciudad. Esta sobre extracción del acuífero causa el compactamiento de las arcillas superficiales, resultando en la deformación del terreno (Illades y Pérez, 2015). Existen otros estudios aplicados de mayor complejidad que demuestran una baja correlación lineal entre la velocidad de subsidencia del terreno con respecto a la caída del nivel estático por lo que se sugiere seguir investigando y caracterizando para descartar otras variables, como el espesor del acuitardo (Solano-Rojas et al., 2015). Sin embargo, es importante hacer notar que estos estudios en realidad no contradicen a los primeros porque en aquellos se estipula una relación no lineal entre la baja del nivel del agua subterránea y la subsidencia (caso en el que la correlación puede ser pequeña o nula). Además, en estudios anteriores se ha mostrado que el acuitardo y el acuífero se han desconectado en algunas zonas, lo que también justifica que no exista una relación entre ambas variables.

Son muchas las metodologías propuestas para determinar cuáles son las zonas que presentan subsidencia en la Ciudad de México, resaltando la parte noroeste de la ciudad con una subsidencia de hasta 423 mm/año hacia el estado de México (Fernández-Torres et al., 2021) y la parte cercana a Xochimilco (cerca del área de este estudio) con subsidencias de hasta 220 mm/año (Fernández-Torres et al., 2020) Así mismo, en diversas zonas de la Ciudad de México se han registrado daños, que pueden ser atribuibles a la subsidencia preexistente. Los daños ocasionados previamente por la

subsistencia se vieron intensificados después del sismo del 19 de septiembre de 2017 (Carreón-Freyre et al., 2017).

Aunado a eso, zonas de la colonia Coapa, enfrentan constantemente el problema de inundaciones y presencia de diversas fracturas y socavones en el pavimento de sus calles. Como ejemplo, este estudio se centra en desarrollo de una metodología para detección o monitoreo de posibles daños por subsidencia en dos edificios ubicados en esa colonia de la delegación de Tlalpan Ciudad de México.

Las subsidencias son un peligro que debe tomarse en cuenta, si bien, el número de fatalidades asociado es muy bajo, los daños económicos que conlleva pueden ser muy elevados, principalmente en zonas urbanizadas o en donde existe un importante despliegue de infraestructura crítica. Ésta se ha convertido en un problema cada vez más grave en todo el mundo, y se espera que se produzcan más áreas con subsidencia en las próximas décadas debido a la creciente demanda de recursos naturales para satisfacer las necesidades de la población y el desarrollo industrial

Hipótesis

La fotogrametría y el LiDAR, aplicados a través de cámaras de celulares y drones, permitirán realizar reconstrucciones 3D precisas y confiables para el monitoreo de cambios estructurales en edificios a lo largo del tiempo, con un margen de error reducido en ambientes controlados y en campo. La comparación de los resultados entre ambas técnicas demostrará que el uso de LiDAR ofrece mayor precisión en la detección de deformaciones causadas por subsidencia en entornos reales, mientras que la fotogrametría proporcionará una alternativa viable en términos de costo y accesibilidad.

Objetivos

Objetivo general

Evaluar y comparar el rendimiento de la fotogrametría y el LiDAR mediante reconstrucciones 3D precisas a partir de las imágenes capturadas con cámaras de celulares y cámaras de drones, y generar bases de datos para analizar los cambios en la estructura de los edificios a lo largo del tiempo.

Objetivos específicos

1. Definir la precisión de la metodología con la toma de datos en un ambiente controlado en laboratorio.
2. Definir la precisión de la metodología con la toma de datos en un experimento controlado en campo.
3. Aplicar la metodología establecida mediante los experimentos controlados en un entorno real.
4. Realizar un análisis diferencial entre dos momentos en el tiempo en entorno real para conocer si se están registrando daños por subsidencia.

2. Antecedentes

Antecedentes del área de estudio

De manera regional, la Ciudad de México es ampliamente reconocida por sufrir subsidencia del terreno, un fenómeno que afecta áreas urbanas y se origina en gran medida por la extracción excesiva de agua subterránea, lo que conlleva una reducción en la presión existente en los espacios porosos de los materiales granulares subyacentes, lo que a su vez provoca alteraciones y deformaciones en la estructura misma del terreno (Galloway & Hoffmann, 2007; Galloway & Burbey, 2011).

La Ciudad de México presenta un contexto geológico único debido a su asentamiento histórico en terrenos que originalmente estaban ocupados por los lagos de Texcoco, Xochimilco y Chalco (Solano-Rojas et al., 2015). A medida que la ocupación urbana actual redefine los límites urbanos previamente establecidos, se observa un aumento en la densidad de población en las áreas lacustres. Estudios geológicos e hidrogeológicos realizados por diversos investigadores han revelado la complejidad estratigráfica de la cuenca, incluyendo secuencias sedimentarias que presentan intercalaciones de rocas volcánicas y sedimentos lacustres, con una capa superior rica en arcillas (Mooser, 1975; Aguayo et al., 1989; Vázquez-Sánchez & Jaimes-Palomera, 1989; Santoyo et al., 2005; Solano-Rojas et al., 2015). Esta capa de sedimentos de arcilla y barro reposa sobre estratos de rocas calizas y depósitos volcánicos. Los procesos de sedimentación ocurridos simultáneamente a la formación de los depósitos volcánicos han generado suelos ricos en minerales como alófono e imogolita, lo que ha incrementado su capacidad para comprimirse. Además, la constante disminución de los niveles de agua subterránea en la región ha contribuido al hundimiento del terreno en esta área metropolitana (Carreón-Freyre et al., 2006).

Los datos proporcionados por el Atlas de la Ciudad de México brindan una comprensión más profunda del nivel de riesgo de inundaciones en la zona en cuestión. Según esta información, los niveles más altos de inundaciones, representados en color rojo en la

Figura 1 comienzan en el centro y sureste de la ciudad, abarcando las alcaldías de Tlalpan, Xochimilco y Tláhuac, con un impacto significativo en el noreste y el centro de la ciudad. Esto afecta a las alcaldías de Iztapalapa, Iztacalco, Venustiano Carranza, Cuauhtémoc, Azcapotzalco, Benito Juárez, el sur de Gustavo A. Madero y el este de Coyoacán.

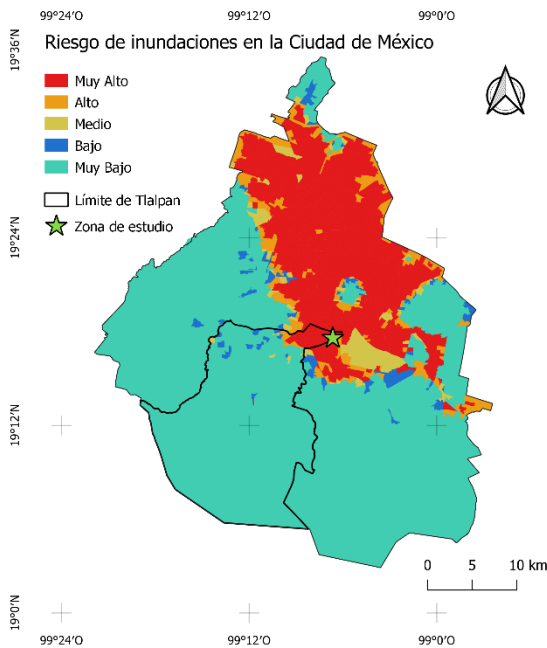


Figura 1. Riesgo de inundaciones en Ciudad de México. Elaboración propia con los datos del Atlas de Riesgos de la Ciudad de México (SGIRP, revisado en 2023).

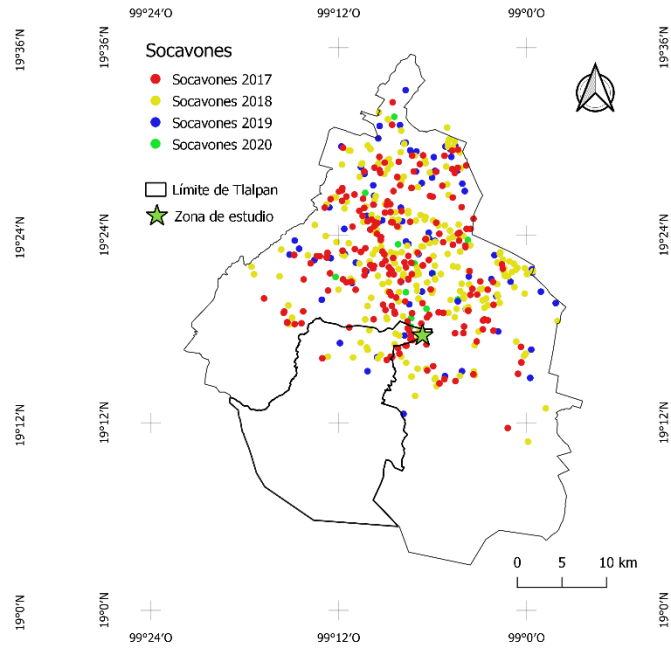


Figura 2. Socavones registrados en la Ciudad de México. Elaboración propia con los datos del Atlas de Riesgos de la Ciudad de México (SGIRP, revisado en 2023).

Asimismo, se observa una mayor concentración de socavones, como se muestra en la Figura 2, que también se origina en el centro y sureste, en las alcaldías de Tlalpan, Xochimilco y Tláhuac, y se extiende hacia el norte de la Ciudad de México. En las figuras anteriores, se delimita el área ocupada por la alcaldía de Tlalpan, con nuestra principal zona de estudio ubicada en la zona noreste. Aquí es donde se encuentran los edificios seleccionados para su reconstrucción 3D. Ambos mapas resaltan que el mayor riesgo de inundación y la concentración de socavones para esta alcaldía se encuentran precisamente en la porción noreste.

En el contexto local, la alcaldía Tlalpan se ubica en la parte suroeste de la Ciudad de México y se caracteriza por su diversa composición litológica. Para obtener una comprensión más completa de esta área de estudio, es esencial remontarnos al mapa geológico, representado en la Figura 3.

En este mapa, se observa una amplia variedad de suelos y rocas que abarcan desde rocas extrusivas básicas e intermedias, como andesitas y basaltos, hasta brechas volcánicas y suelos aluviales. También se identifican suelos residuales, toba y, en particular, el suelo lacustre en el que se encuentra la zona de interés.

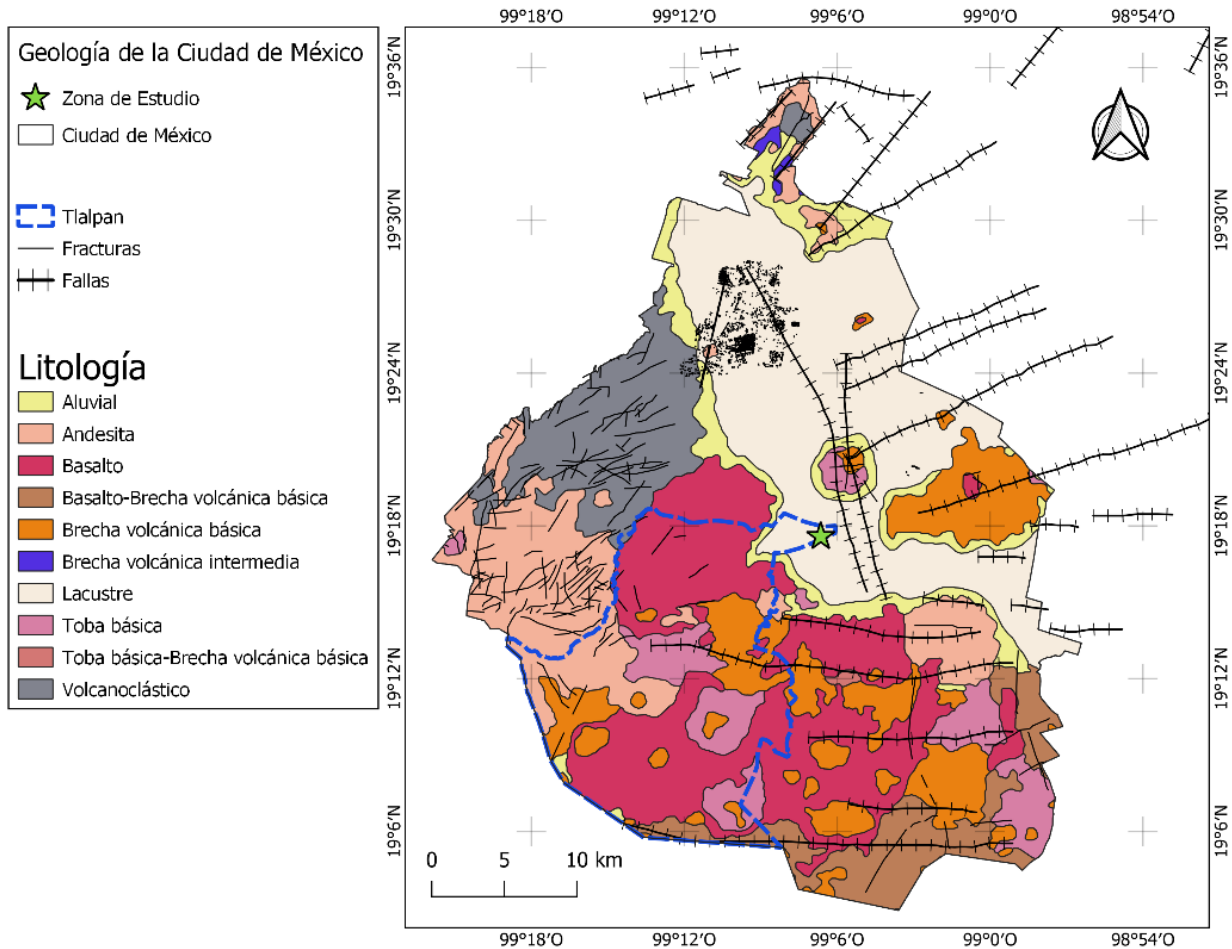


Figura 3. Geología de la Ciudad de México (SGIRP, revisado en 2023).

El noreste de Tlalpan constituye el foco de atención en esta investigación. “Según el Atlas de Riesgos de la Delegación Tlalpan, se identifica que el territorio más susceptible a hundimientos diferenciales se ubica en la porción noreste, específicamente en la zona de Coapa, colindante con las delegaciones Coyoacán y Xochimilco” (Carreón-Freyre et al., 2017). Esta área específica se considera de gran interés debido a su contexto geológico, que incluye la presencia de suelos lacustres, la clasificación de peligro alto y muy alto por sismos (Figura 4), riesgo de inundaciones muy alto (Figura 1), los principales encharcamientos de la alcaldía (Figura 5) y la aparición de

socavones. Dichas características convierten a esta región en un lugar de particular interés para la aplicación de una metodología destinada al monitoreo de estructuras civiles, ya que “*en esta zona se han vuelto perceptibles daños a todo tipo de construcciones e infraestructura entre las que se cuentan tuberías hidráulicas, banquetas y pavimentos*” (Carreón-Freyre et al., 2017).

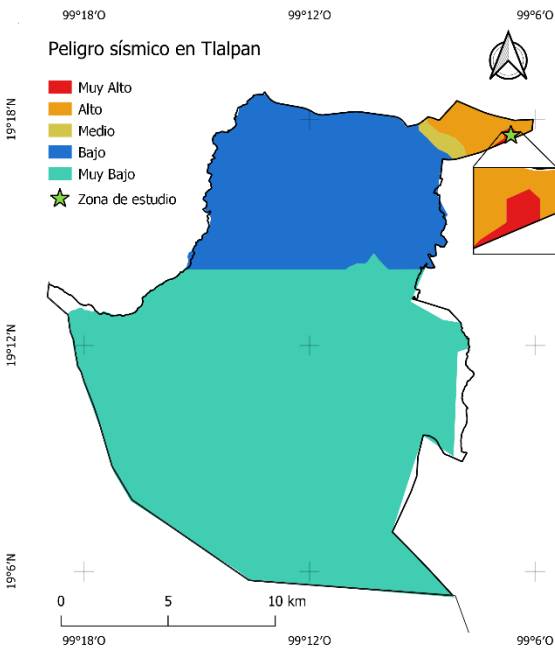


Figura 4. Peligro sísmico en Tlalpan. La estrella verde representa la zona de estudio. El cuadro muestra un acercamiento a dicha zona. Elaboración propia con los datos del Atlas de Riesgos de la Ciudad de México (SGIRP, revisado en 2023).

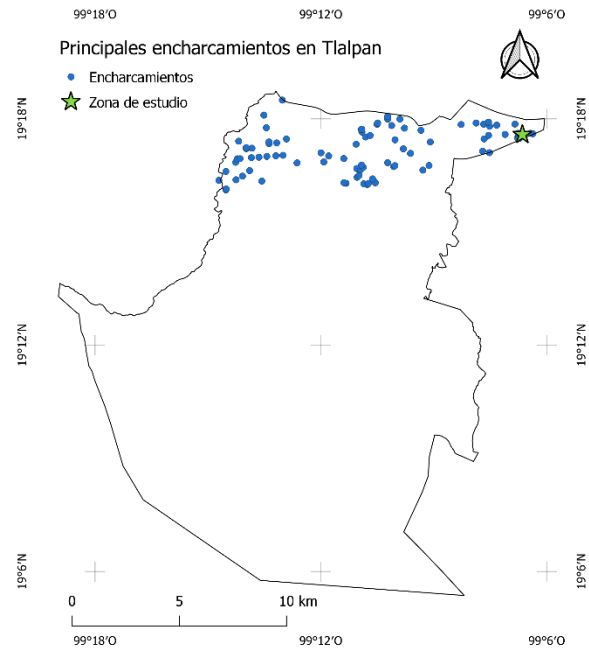


Figura 5. Principales encharcamientos en Tlalpan. Elaboración propia con los datos del Atlas de Riesgos de la Ciudad de México (SGIRP, revisado en 2023).

Ejemplos de estas afectaciones incluyen un agrietamiento de 60 metros de longitud en la Avenida Acoxpa en 2016 (Figura 6), inundaciones recurrentes en la zona, con especial mención de las ocurridas en mayo de 2017, cuando los habitantes del fraccionamiento Prado Coapa se vieron obligados a evacuar sus hogares en botes (Figura 7). Se suma a esto el significativo número de edificios afectados en la zona por el sismo de magnitud 7.1 del 19 de septiembre de 2017, con destacada gravedad del Colegio Enrique Rébsamen, la Plaza Galerías Coapa, ocho edificios en la Colonia Girasoles II, el Edificio Palomares y el complejo comercial Walmart-Suburbia (Figura 8). Por último, se han registrado socavones a lo largo de los años, siendo el más reciente el de agosto de 2023 (Figura 9). La ubicación de estas afectaciones se encuentra representada en el croquis de la Figura 11.



Figura 6. Grieta sobre avenida Acoxa en 2016.



Figura 7. Desalojan a vecinos de Prados Coapa por la inundación en la zona en mayo de 2017 (Noticieros Televisa)



Figura 8. La tienda en la esquina de Miramontes y Acoxa presenta daños tras el sismo del 19 de septiembre de 2017.



Figura 9. Socavón en Coapa. Agosto de 2023.

De acuerdo con un estudio de mecánica de suelos realizado por Grupo Rioboo (2004), se determinó que la tasa promedio de hundimiento en esta región es de 10 cm por año. Sin embargo, el Atlas de

Riesgos de la Delegación Tlalpan señala que en esta zona los hundimientos varían entre 2 y 10 cm por año, como se evidencia en la Figura 10.

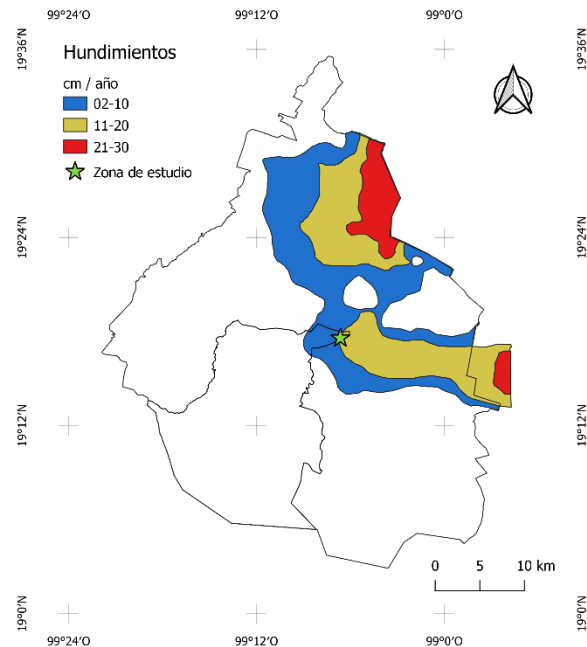


Figura 10. Hundimientos en Ciudad de México. Elaboración propia con los datos del Atlas de Riesgos de la Ciudad de México (SGIRP, revisado en 2023).

Considerando las particularidades del área, se han elegido dos inmuebles para su análisis detallado, tal como se muestra en el croquis de la Figura 11. Estos edificios son conocidos como "Palomares" (Figura 12), el cual ha sido objeto de una reconstrucción reciente tras haber sufrido daños significativos en el terremoto de 2017, y "Edificio Salmón" (Figura 13), ubicado entre las calles Cebadales y Cerezos.

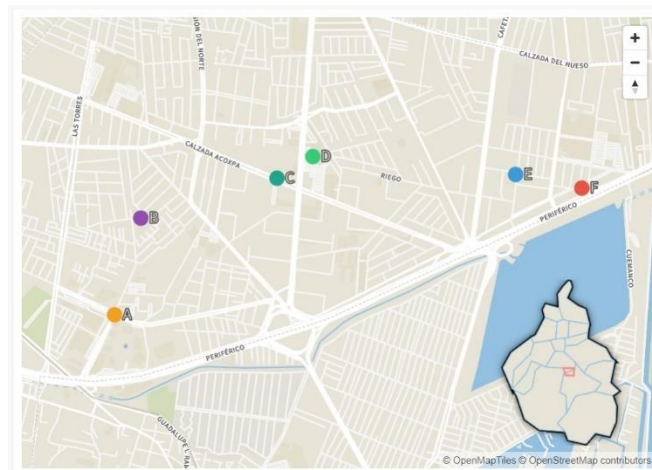


Figura 11. Croquis del área de estudio en Coapa, Cuemanco en la alcaldía Tlalpan. A) Figura 9. Socavón. B) Figura 7. Inundación. C) Figura 6. Grieta. D) Figura 8. Daño por Sismo. E) Edificio Salmón. F) Edificio Palomares.



Figura 12. Edificio Palomares 16, vista antes de ser demolido. A la Derecha edificio actual.



Figura 13. Edificio Salmón. Notoria inclinación hacia el edificio que se encuentra a la izquierda en la foto.

Tanto el edificio Salmón como el edificio Palomares exhiben atributos que revisten un gran interés en el contexto de su monitoreo mediante reconstrucciones en 3D. En el caso del edificio Salmón, destaca su notoria inclinación, mientras que el edificio Palomares sobresale debido a su reciente proceso de construcción. Estos factores, con su singularidad, hacen que ambos edificios sean objetos de estudio particularmente relevantes para este proyecto.

3. Metodología

Hasta el momento se ha estudiado el problema desde un punto de vista regional (Fernández-Torres et al., 2020), sin embargo, esto podría corroborarse con trabajo a escala local, con el mapeo de los daños en las estructuras civiles que podría ser ocasionado por subsidencias, lo que podría permitir corroborar los mapeos anteriores.

En los últimos años ha habido una evolución en el uso de las nuevas tecnologías en temas de competencia ambiental, tal es el caso de los vehículos aéreos no tripulados, comúnmente llamados drones, por lo que es importante definir y estandarizar nuevas metodologías de trabajo. Esta herramienta representa un sensor remoto fácil de usar y transportar, de bajo costo que permite obtener información de alta resolución, equiparables con lo obtenido con tecnología LiDAR terrestre sobre el mismo punto en diferentes momentos en el tiempo, con una desventaja referente a tener una cobertura limitada de escaneo lo que lo convierte en la técnica ideal para los estudios de casos específicos y una pieza clave para el establecimiento de un programa de monitoreo para observar la evolución espacial y temporal de los cambios morfológicos del terreno.

Los principales productos de la fotogrametría son las nubes de puntos, los cuales son vértices con coordenadas X, Y y Z que representan el entorno y son utilizados principalmente para la generación de representaciones 3D del terreno, la topografía multitemporal se ha utilizado para el monitoreo de subsidencias asociadas a: rellenos sanitarios (Gasperini et al., 2014), antiguos sumideros (Jia et al., 2018), minería subterránea (Dawei et al., 2020), abatimiento de acuíferos e inclusive es utilizado como un método de validación para las técnicas antes mencionadas (Razi et al., 2018). Para esto, es requerido un alto porcentaje de precisión, por lo que se necesita un procesado de homologación de los datos para que puedan compararse, utilizando métodos complementarios y puntos de control, siendo la componente de referencia geográfica vertical la que puede presentar mejores resultados de correlación después de la corrección (Yeh et al., 2016).

Por mucho se ha determinado que la implementación de drones para la obtención de modelos de elevación representa una técnica productiva, confiable y mucho más flexible que otras técnicas.

La exactitud y efectividad de técnicas como el LiDAR han sido puestas a prueba ampliamente, reconociendo su utilidad, pero evidenciando un alto tiempo de procesado y sus elevados costos son una barrera importante en algunos estudios. En contraste, técnicas de interferometría diferencial pueden llegar a ser de bajo costo, considerando las bases de datos puestas a disposición por diferentes entidades educativas o gubernamentales, tienen niveles de precisión milimétrica, se

utilizan para el mapeo de deformaciones abruptas del terreno asociadas a eventos específicos o a deformaciones lentas ocurridas en un intervalo amplio de tiempo y son aplicables sobre grandes escalas de trabajo, sin embargo, su resolución espacial horizontal no es suficiente para resolver o monitorear problemas específicos en escalas locales.

El objetivo de esta metodología es la reconstrucción 3D **para análisis de cambios de medidas o deformación del terreno a través de comparación de nubes de puntos**. Para el cual se realizó previamente una experimentación controlada para validación con un ejercicio en campo y uno dentro del laboratorio y una comparación de productos obtenibles en diferentes softwares fotogramétricos.

Objetos de estudio

Siguiendo el diagrama de flujo de la Figura 14, se llevaron a cabo dos experimentos controlados, uno en un entorno de campo y otro en laboratorio, utilizando una caja como muestra de estudio. Además, se aplicó la metodología propuesta a dos estructuras civiles ubicadas en la colonia Coapa, designadas como Edificio Salmón y Edificio Palomares. Este enfoque permitió una aplicación práctica de la metodología en diferentes contextos.

Adquisición de datos

Teniendo en cuenta lo anterior, la adquisición de datos se diseñó cuidadosamente para cada experimento y su aplicación, adaptándose a las particularidades de cada contexto (Tabla 1). En el experimento en laboratorio, se emplearon 10 grupos de fotografías y 10 grupos de LiDAR para las cajas de 16 cm y 20 cm de altura, asegurando una captura integral desde diferentes perspectivas. En el experimento en campo, la caja completa de 36 cm y la de 20 cm de altura se estudió con un grupo de fotografías y un grupo de LiDAR. Para la aplicación a edificios, se utilizó una variedad de fuentes, incluyendo fotografías tomadas con celular en abril de 2021 y abril de 2022, y fotografías tomadas con dron en vuelo en malla y en vuelo circular en 2022 para los Edificios Palomares y Salmón.

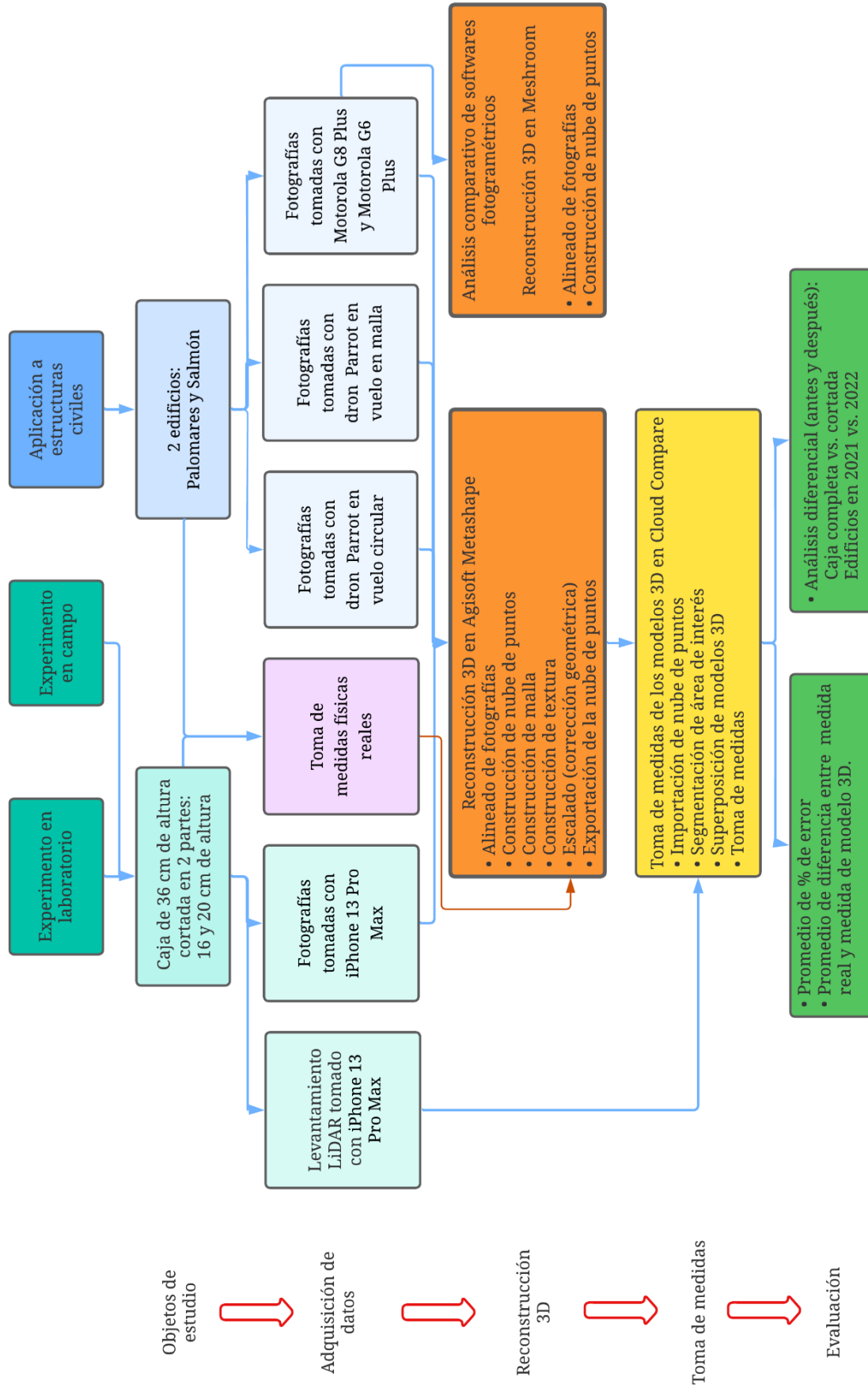


Figura 14. Diagrama de la metodología

Tabla 1. Síntesis de adquisición de datos.

<i>Experimento/ Aplicación</i>	<i>Equipo utilizado</i>	<i>Objetos de estudio</i>	<i>Adquisición de datos</i>	<i>Medidas reales tomadas con cinta métrica [cm]</i>
Experimento en laboratorio	iPhone 13 Pro-Max versión 15.4.1	Caja con altura 16 cm Caja con altura 20 cm	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 10 grupos de fotografías 10 grupos de LiDAR 	<p>Medida X: 40 Medida Y: 35 Medida Z: 16</p>
			<ul style="list-style-type: none"> ▪ 10 grupos de fotografías 10 grupos de LiDAR 	<p>Medida X: 40 Medida Y: 35 Medida Z: 20</p>
Experimento en campo	iPhone 13 Pro-Max versión 15.4.1	Caja completa (con 36 cm de altura)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 1 grupo de fotografías 	<p>Medida 1: 140 Medida 2: 70 Medida 3: 30 Medida 4: 40 Medida 5: 36 Medida 6: 20 Medida 7: 16</p>
		Caja con altura de 20 cm	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 1 grupo de LiDAR 	
Aplicación a edificios	Motorola G6 Plus Motorola G8 Plus Parrot de Anafi	Edificio Palomares	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 1 grupo de fotografías tomadas con celular en 2021 	<p>Medida 1: 52 Medida 2: 147</p>
			<ul style="list-style-type: none"> ▪ 1 grupo de fotografías tomadas con celular en 2022 	<p>Medida 3: 234.5 Medida 4: 177.5 Medida 5: 68.0</p>
			<ul style="list-style-type: none"> ▪ 1 grupo de fotografías tomadas con dron en vuelo en malla en 2022 	<p>Medida 6: 130.0 Medida 7: 60.0 Medida 8: 150.0 Medida 9: 158.0</p>
			<ul style="list-style-type: none"> ▪ 1 grupo de fotografías tomadas con dron en vuelo circular en 2022 	<p>Medida 10: 326.0 Medida 11: 205.5 Medida 12: 60.0</p>
Aplicación a edificios	Motorola G6 Plus Motorola G8 Plus Parrot de Anafi	Edificio Salmón	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 1 grupo de fotografías tomadas con celular en 2021 	
			<ul style="list-style-type: none"> ▪ 1 grupo de fotografías tomadas con celular en 2022 	<p>Medida 1: 42.5 Medida 2: 189.0 Medida 3: 232</p>
			<ul style="list-style-type: none"> ▪ 1 grupo de fotografías tomadas con dron en vuelo en malla en 2022 	<p>Medida 4: 116 Medida 5: 321.0 Medida 6: 321.0 Medida 7: 226.0</p>
			<ul style="list-style-type: none"> ▪ 1 grupo de fotografías tomadas con dron en vuelo circular en 2022 	

Para obtener los datos de fotogrametría, se aseguró un traslape del 60% entre cada fotografía, con el objetivo de abarcar de manera efectiva el área de interés. En el proceso de adquisición de datos LiDAR, se empleó la aplicación móvil Polycam, la cual ofrece recomendaciones antes de iniciar la captura, como la para la planificación previa de la ruta, mejorando así la eficacia al documentar nuestro objeto de estudio. La aplicación también aconseja la minimización del tiempo entre la captura de secciones superpuestas, sugiriendo un movimiento en patrón en forma de "S" en lugar de realizar grandes bucles.

Para el experimento de laboratorio, el enfoque fue únicamente de las cajas con altura de 16 y 20 cm, siguiendo las recomendaciones anteriores. Para el experimento en campo se ubicó la estación geodésica 07DF del INEGI, se capturaron las fotografías de la caja completa (Figura 15), de la caja con altura de 20 (Figura 16) y se amplió el enfoque para abarcar un señalamiento de circulación de Ciudad Universitaria (UNAM, CDMX), el cual cuenta con un banco de nivel de INEGI.



Figura 15. Señalamiento de circulación sobre calle Escolar en Ciudad Universitaria y caja completa.



Figura 16. Señalamiento de circulación sobre calle Escolar en Ciudad Universitaria y caja con altura de 20 cm.

La adquisición de datos para de la aplicación de la metodología a edificios se realizó en dos momentos en el tiempo: durante los años 2021 y 2022. En 2021 se llevó a cabo la captura de fotografías utilizando los teléfonos celulares Motorola G6 Plus y Motorola G8 Plus. La primera fase consistió en la identificación de los edificios de interés, la captura de fotografías del Edificio Salmón

y posteriormente, la captura de fotografías del Edificio Palomares. En el año 2022, se replicó el procedimiento empleado en 2021, incorporando la captura de imágenes con un dron.

Levantamientos con dron

Previo al inicio de cada vuelo, se llevó a cabo una prueba preliminar con el propósito de establecer una programación apropiada que abarcara cada uno de los edificios objeto de estudio. Los vuelos se ejecutaron siguiendo una planificación específica en modalidades de vuelo en malla y circular, ajustando los parámetros de vuelo de acuerdo con lo detallado en la Tabla 2.

Tabla 2. Parámetros de vuelo en dron Parrot de Anafi.

<i>Parámetros de vuelo</i>	
Configuración automática	Actualmente, 80 % de superposición frontal y 80 % de superposición lateral, con velocidad, dirección y captura 3D optimizadas.
Evitación de obstáculos	Habilitado si hay sensores disponibles.
Disponible fuera de línea	1/10 planes seleccionados para vuelos fuera de línea.
Mostrar mapa existente	Habilitado.
Luz baja	Habilitado
Cámara de planificación	Phantom 4

Toma de puntos con GPS

Para el experimento en campo, se adquirió un único punto GPS para comparar la información de este punto con lo que arroja el banco de nivel del INEGI ya que este punto se tomó en el banco de nivel del INEGI ubicado en la zona de estudio. Respecto a los edificios, se instalaron puntos visuales estratégicos, los cuales fueron meticulosamente medidos con el GPS. Estos puntos visuales se designaron como referencias para el posterior procesamiento de los datos. Estos puntos se tomaron con un GPS vinculado a la red de estaciones de referencia CORS.

Toma de medidas físicas reales

Con el propósito de contrastar los resultados adquiridos en el entorno digital mediante nubes de puntos, se llevaron a cabo mediciones in situ. Estas mediciones tienen como objetivo validar la exactitud de los datos obtenidos posteriormente.

Experimento en laboratorio

El objeto de estudio en este experimento fue una caja con una altura inicial de 36 cm. La caja fue dividida en dos partes para llevar a cabo la investigación. Se tomaron medidas de los ejes X, Y y Z para ambas secciones, resultando en alturas de 16 cm y 20 cm para cada parte, como se muestra en la Figura 17 y la Figura 18, respectivamente.

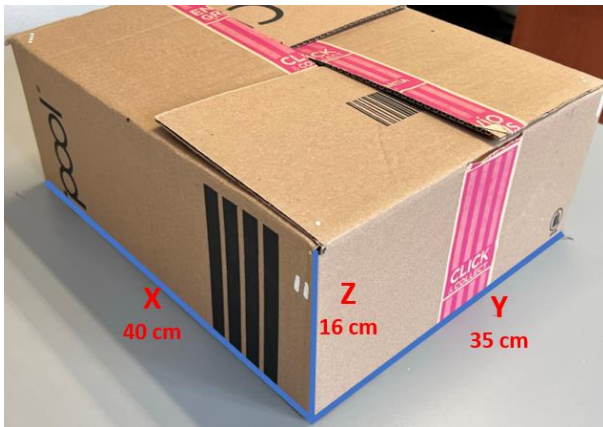


Figura 17. Medidas reales. Altura: 16 cm.

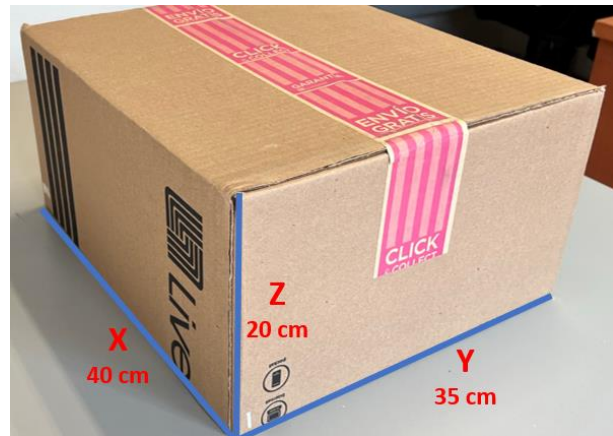
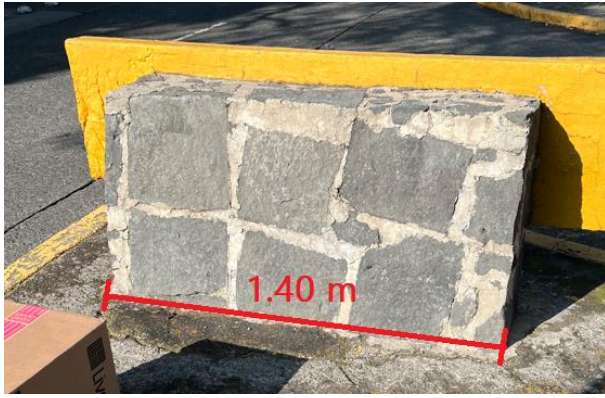


Figura 18. Medidas reales. Altura: 20 cm.

Experimento en campo

En este experimento, se realizaron mediciones que abarcan un objeto circundante (un letrero de circulación) en relación con nuestro objeto de estudio principal, que es la caja. Este letrero actúa como un preámbulo, ya que es un elemento inalterable en el tiempo y puede servir como referencia de escala. Aquí, se siguió un procedimiento donde se colocó inicialmente la caja completa y luego, en el mismo sitio, la caja con una altura de 20 cm. Las mediciones tomadas pueden visualizarse en la Figura 19.



Medida 1



Medida 2



Medida 3



Medida 4



Medida 5



Medida 6

Figura 19. Medidas reales del experimento en campo.

Medidas reales Edificio Palomares

Debido a que se realizó un levantamiento fotogramétrico en dos momentos en el tiempo (en 2021 y en 2022) para el edificio Palomares, se obtuvieron medidas de objetos que se consideran perdurables en el tiempo en este sitio, así como se hizo en el experimento en campo para el señalamiento de circulación. En el edificio palomares se consideraron elementos como las dimensiones del portón, rejas, coladeras y contenedores de basura. Las medidas se muestran en la Figura 20.



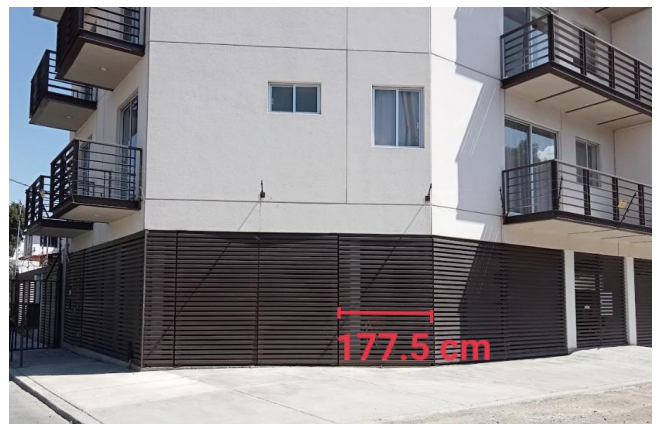
Medida 1



Medida 2



Medida 3



Medida 4



Medida 5



Medida 6



Medida 7

60 cm



Medida 8

150 cm



Medida 9



Medida 10



Medida 11



Medida 12

Figura 20. Medidas reales del Edificio Palomares.

Medidas reales Edificio Salmón

El segundo edificio utilizado en este proyecto es el Edificio Salmon, el cual presenta una inclinación visualmente reconocible producto de la deformación del terreno. En este edificio también se tomaron medidas reales con las consideraciones hechas en el Edificio Palomares, las cuales se muestran en la Figura 21.



Medida 1



Medida 2



Medida 3



Medida 4



Medida 5



Medida 6



Medida 7

Figura 21. Medidas reales del Edificio Salmón.

Reconstrucción 3D. Software utilizado

Para generar las reconstrucciones 3D se utilizaron diversos softwares, así como la Red CORS en la adquisición de datos, estos softwares son los siguientes:

App Polycam para LIDAR

Polycam es una aplicación para dispositivos iOS que utiliza la tecnología LiDAR (Light Detection and Ranging) para crear modelos 3D de alta calidad y precisión. La aplicación utiliza la cámara LiDAR del iPhone o iPad Pro para escanear objetos y entornos en 3D. Luego, el software de la aplicación procesa los datos obtenidos y genera modelos 3D de alta resolución. Polycam es útil para una amplia gama de aplicaciones, como el modelado arquitectónico, la ingeniería civil, la producción de contenido de realidad virtual y aumentada, la planificación urbana y la conservación del patrimonio cultural. La app Polycam ofrece tanto una versión gratuita como opciones de suscripción de pago (Polycam Learn, 2023).

Red CORS

La red CORS (siglas en inglés de Continuously Operating Reference Stations) es una red global de estaciones de referencia GPS/GNSS que se utilizan para proporcionar correcciones precisas de posición y tiempo en tiempo real. Una de sus principales ventajas es que se proporcionan coordenadas georeferenciadas y válidas para trabajos de topografía y geodesia, ya que están ligadas

al sistema y normativas del INEGI. La Red CORS es útil para la investigación científica, el monitoreo de deformación, ingeniería y topografía geodésica (Geometrix, 2023).

Agisoft Metashape Professional

El software Agisoft utiliza varios algoritmos matemáticos en su proceso de fotogrametría para crear modelos 3D a partir de imágenes. Uno de los algoritmos principales es el algoritmo de alineación, el cual identifica las características en las imágenes y determina la posición 3D de cada punto en el espacio a partir de la posición de la cámara y la posición del punto en cada imagen, asimismo, utiliza técnicas de iluminación, sombreado y texturización para crear modelos realistas y detallados. Puede ser utilizado en creación de contenido, análisis de terreno, ingeniería y arquitectura. Es un software de paga (Agisoft Helpdesk Portal, 2023)

Meshroom

Meshroom es una aplicación de Reconstrucción 3D gratuita y de código abierto que se basa en el marco AliceVision, un marco fotogramétrico de visión por computadora que ofrece algoritmos para la reconstrucción tridimensional y el seguimiento de cámaras. AliceVision se destaca por su sólida base de software y avanzados algoritmos de visión por computadora, fruto de la colaboración con el objetivo de proporcionar soluciones de vanguardia que cumplan con los estándares de robustez y calidad requeridos para su implementación en entornos de producción. Al igual que Agisoft puede ser utilizado en creación de contenido, análisis de terreno, ingeniería y arquitectura (Meshroom manual, 2023).

Cloud Compare

Cloud Compare es un software gratuito para procesamiento de nubes de puntos, que se utiliza para visualizar, analizar y procesar datos 3D generados a partir de escaneos láser, fotogrametría y otros métodos de adquisición de datos. Su fundamento matemático se basa en la geometría computacional y el análisis de datos. Una de las características principales de Cloud Compare es su capacidad para realizar cálculos de geometría computacional, que permiten analizar y comparar diferentes nubes de puntos para extraer información útil, como es en el caso de este proyecto, el realizar mediciones de longitud de los objetos de estudio. Esto se logra utilizando algoritmos matemáticos para realizar operaciones como la segmentación de nubes de puntos, la eliminación de ruido y la detección de formas. Con el tiempo, ha evolucionado hacia un software más versátil para el procesamiento de

nubes de puntos, incorporando una variedad de algoritmos avanzados, como registro, remuestreo, gestión de campos de color/normales/escalares, cálculo de estadísticas, manejo de sensores, segmentación interactiva o automática, y mejoras visuales, entre otras funciones (Girardeau-Montaut, D, 2023).

Reconstrucción 3D. Procesado

Una vez realizada la adquisición de datos, Cada set de imágenes tiene sus limitaciones y ventajas, para obtener el mejor resultado de cada una fue importante separar cada grupo de imágenes para su posterior procesado. El procesado inició con el uso del software Agisoft, al cual se importaron los grupos de fotografías capturadas, como se observa en la Figura 22 a).

Los parámetros aplicados para este paso y el resto del procesado se encuentran en la Tabla 3.

Tabla 3. Parámetros utilizados en el procesamiento fotogramétrico.

Parámetro	Ajuste
Alinear fotografías	
Precisión	Alta
Preselección de pareja	Referencia
Límite de puntos clave	40000
Límite de puntos de amarre	1000
Construcción de nube densa	
Calidad	Alta
Filtrado de profundidad	Agresivo
Construir malla	
Tipo de superficie	Arbitraria
Datos de origen	Nube densa
Recuento de rostros	Medio
Construir textura	
Modo de mapeo	Genérico
Modo de fusión	Mosaico
Tamaño/recuento de textura	4096 x 1

Alineado de fotografías

Las fotografías de cada grupo se importaron sin un orden específico preestablecido, por lo que fue importante que éstas se encontraran alineadas. Esto lo realizó Agisoft mediante la creación de puntos de control comunes en las imágenes, lo que le permitió determinar la posición y orientación relativa de las fotos en el espacio tridimensional, como se puede observar en la Figura 22 b).

Construcción de nubes de puntos

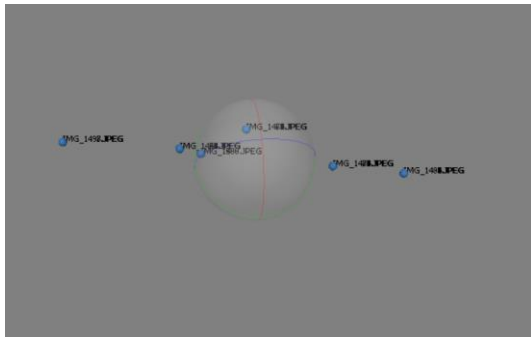
Con las imágenes alineadas, se procedió a la creación y densificación de la nube de puntos. En este paso, se utilizó la información de las imágenes para generar puntos adicionales entre los ya existentes en la nube dispersa. Esto aumentó la densidad de la nube y proporcionó más detalles en la reconstrucción 3D. La nube densa de puntos y la nube densa de puntos por clases se ilustran en la Figura 22 c) y en la Figura 22 d), respectivamente.

Construcción de malla

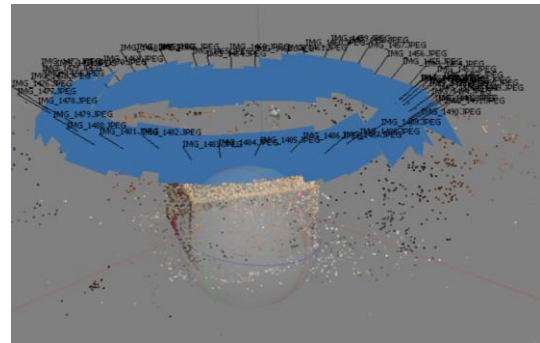
La malla es una superficie tridimensional continua que se ajusta a la forma del objeto. Fue generada por Agisoft utilizando algoritmos de triangulación para conectar los puntos en la nube de puntos. Durante este proceso, se crearon polígonos que conectaron los puntos y definieron la superficie del modelo. La malla ya generada se ilustra en la Figura 22 d).

Construcción de textura

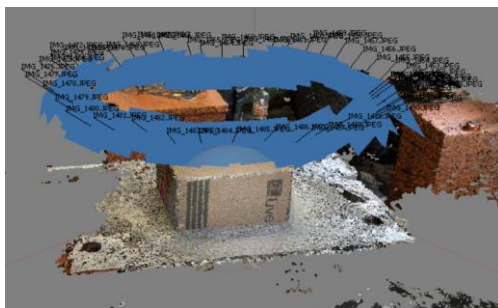
La generación de texturas implicó la proyección de las imágenes originales sobre la malla para agregar detalles visuales realistas. Cada punto en la superficie de la malla ahora se asoció con un área correspondiente en las imágenes capturadas como se aprecia en la Figura 22 f).



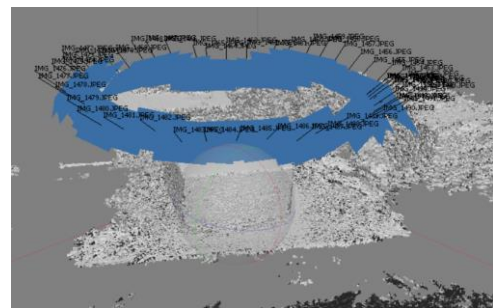
a) Importación de fotografías



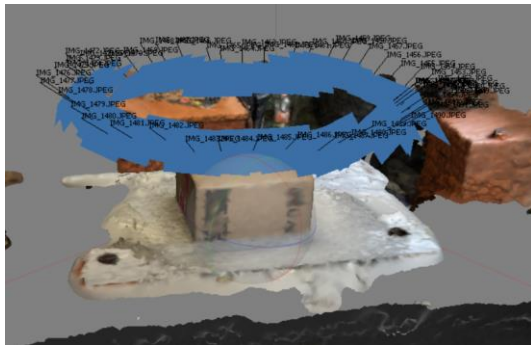
b) Alineado de fotos



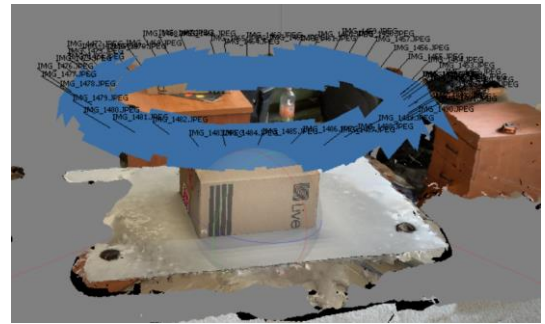
c) Nube densa de puntos



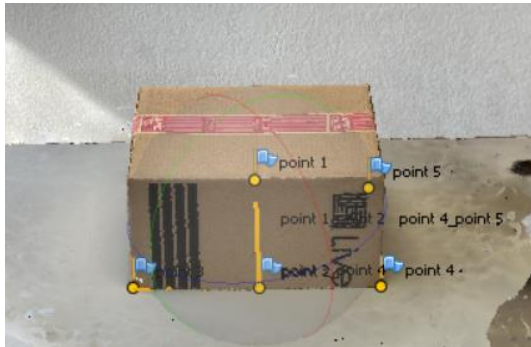
d) Nube densa de puntos por clases



e) Generación de malla



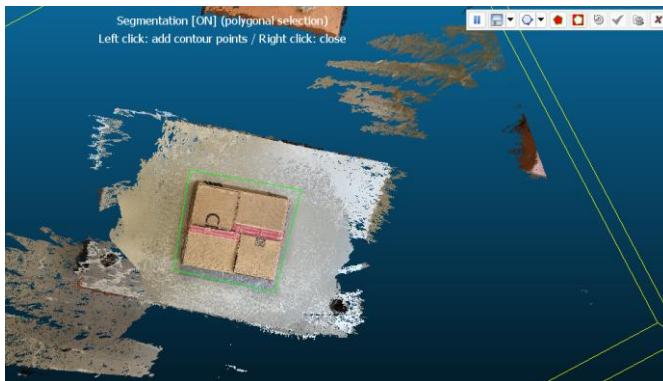
f) Construcción de texturas



g) Corrección geométrica



h) Nube de puntos en Cloud Compare



i) Segmento de puntos seleccionados para remover ruido



j) Nube de puntos sin ruido

Figura 22. Procesado fotogramétrico

Escalado (Corrección geométrica)

La corrección geométrica se realizó asignando los valores reales a los segmentos inalterables que previamente seleccionamos. Para comenzar se inició colocando dos marcadores que fueron los puntos que conectaron a nuestro segmento. Teniendo estos marcadores se generó un segmento escalado al que posteriormente se le asignó el valor real. Este procedimiento se repitió hasta tener al menos tres segmentos que permitieran hacer el escalado general del modelo 3D (Figura 22 g). Teniendo el modelo 3D escalado, se exportó la nube de puntos de este modelo en formato .las.

Toma de medidas de los modelos 3D en Cloud Compare

Importación de nube de puntos

La nube generada en Agisoft guardada en el archivo .las, se importó a Cloud Compare como se observa en la Figura 22 h).

Segmentación de área de interés

Cloud Compare posee la herramienta *Segmentar*, con la cual se seleccionó el polígono que abarcó los puntos de interés (Figura 22 i), después se seleccionó la opción de *Segmentar dentro* para obtener únicamente los puntos dentro del polígono y una vez teniendo este volumen de puntos aceptamos este cambio y se generó la nube de puntos únicamente del objeto de estudio (Figura 22 j).

Superposición de modelos 3D

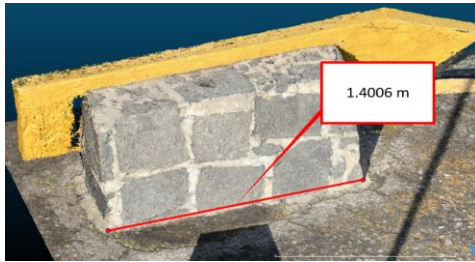
De los diversos modelos que se generaron, en aquellos en los que la comparación entre la altura (realizada como parte del experimento en campo) o la comparación temporal (realizada en la aplicación a edificios) era esencial, se empleó la herramienta *Trasladar/Rotar* de Cloud Compare. Este procedimiento permitió mantener cerca las dos nubes de puntos e identificar los puntos que podían ser tomados como referencia, después se seleccionó la herramienta *Alinear dos nubes eligiendo (al menos 4) pares de puntos equivalentes*, esta herramienta nos permitió tener mayor precisión al momento de hacer la superposición de las nubes eligiendo individualmente cada vértice de los objetos de estudio reconstruidos en cada una de las nubes, posibilitando así la superposición de ambos conjuntos de datos. Un ejemplo concreto de este proceso se puede observar detalladamente en la Medida 7, tanto en la Figura 23 como en la Figura 24.

Toma de medidas

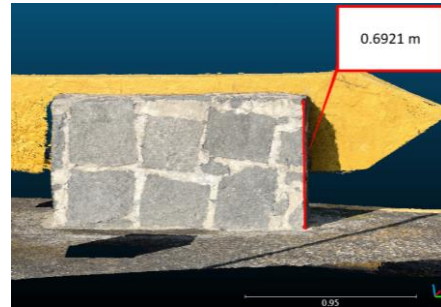
Utilizando las nubes de puntos se logró realizar las mediciones pertinentes, las cuales se obtuvieron utilizando la herramienta *Selección de puntos*, en ella se empleó la opción *Seleccione 2 puntos y muestre información del segmento (longitud, etc.)*. De esta manera se pudieron elegir los dos puntos que formarían cada segmento de interés. La toma de medidas se ejemplifica en la Figura 23. Para este ejemplo se observan las imágenes correspondientes a la nube de puntos generada para el experimento controlado en campo.

Para el experimento controlado en laboratorio y el experimento controlado en campo, además de las nubes de puntos generadas por fotogrametría, se generaron nubes de puntos mediante LIDAR, como se puede observar en la Figura 24 para el experimento controlado en campo.

Tanto las medias de fotogrametría para los experimentos controlados y la aplicación a edificios, así como las medidas de LIDAR para los experimentos controlados se registraron en tablas para su análisis.



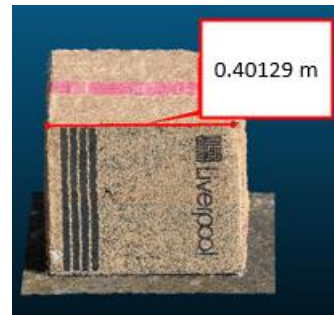
Medida 1



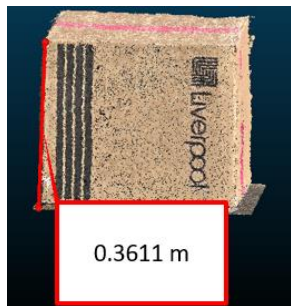
Medida 2



Medida 3



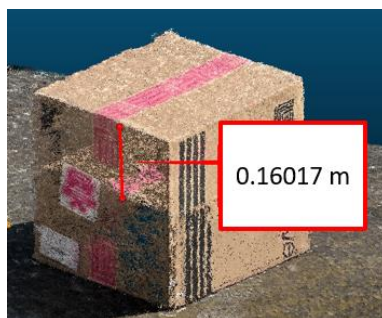
Medida 4



Medida 5

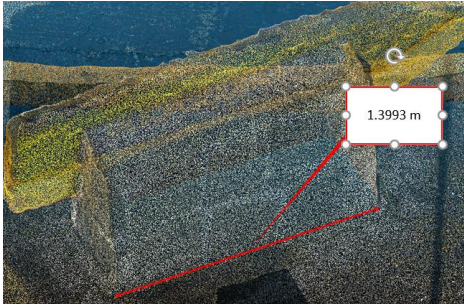


Medida 6

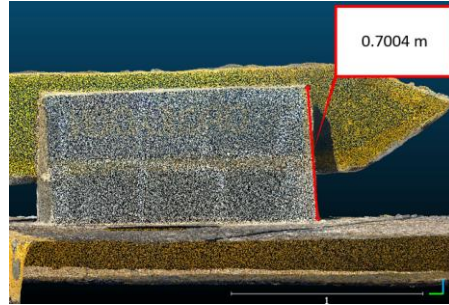


Medida 7
Diferencia de altura entre
caja original y caja cortada.

Figura 23. Medidas tomadas en nube de puntos generada por fotogrametría para el experimento en campo.



Medida 1



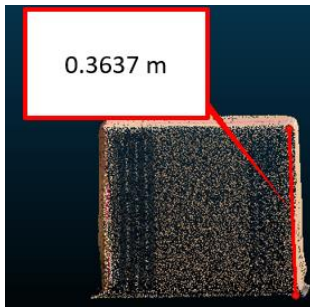
Medida 2



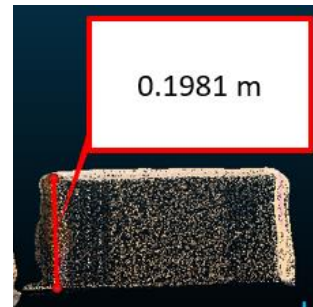
Medida 3



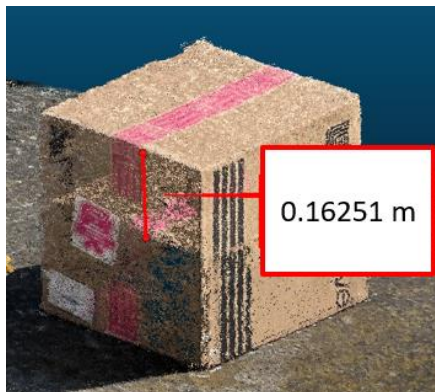
Medida 4



Medida 5



Medida 6



Medida 7

Diferencia de altura entre
caja original y caja cortada.

Figura 24. Medidas tomadas en nube de puntos generada por LiDAR para el experimento en campo.

Algunos ejemplos de mediciones para el Edificio Palomares se muestran en la Figura 25 y para el edificio Salmón en la Figura 26.



Tomadas en campo.



2021

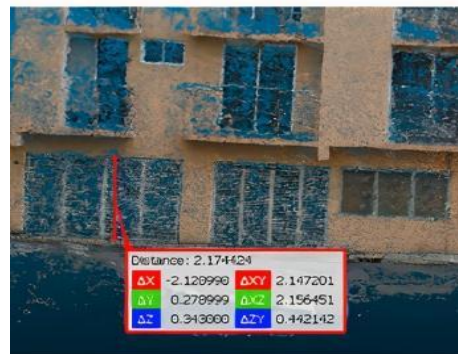


2022

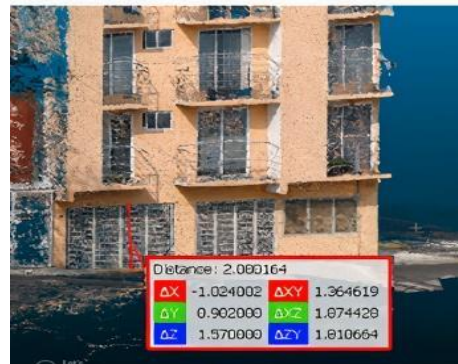
Figura 25. Medición real y en nube de puntos del edificio Palomares.



Tomadas en campo.



2021



2022

Figura 26. Medición real y en nube de puntos del edificio Salmón.

4. Resultados

Comparación de softwares

En esta sección, se llevó a cabo una comparación entre los resultados de dos softwares diferentes utilizando un conjunto idéntico de fotografías. Se generaron dos modelos 3D, uno por cada software empleado, facilitando la evaluación de la cantidad de puntos en ambas nubes de puntos (Figura 27).

La Tabla 4 presenta el resultado obtenido al comparar el número de puntos en las nubes generadas por los programas Agisoft y Meshroom, siendo un punto de partida crucial para la selección del software fotogramétrico en las siguientes reconstrucciones 3D. Ambos softwares fueron evaluados utilizando un conjunto de 87 fotografías. Agisoft demostró una notable capacidad de generación de puntos, logrando una nube de puntos considerablemente más extensa con un total de 2,271,777 puntos. Por otro lado, Meshroom, utilizando la misma cantidad de imágenes, produjo una nube de puntos más limitada, registrando un total de 41,906 puntos. Este análisis comparativo inicial destacó la diferencia significativa en las capacidades de generación de puntos entre Agisoft y Meshroom, lo que nos proporcionó la información esencial para tomar la decisión de utilizar Agisoft en las siguientes reconstrucciones 3D.

Tabla 4. Comparación de número de puntos en nube de puntos generada por Agisoft y Meshroom.

<i>Software</i>	<i>Número de fotografías</i>	<i>Número de puntos generados</i>
Agisoft	87	2271777
Meshroom	87	41906

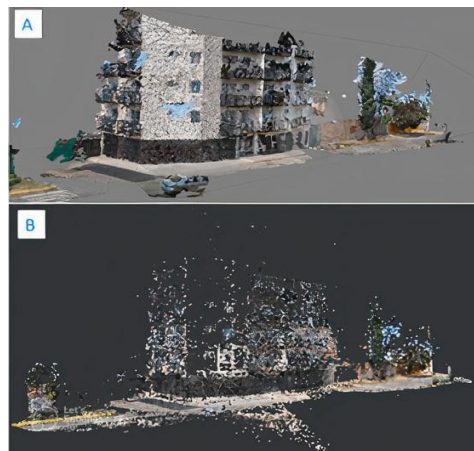


Figura 27. Nubes de puntos de la reconstrucción 3D del edificio Palomares 16. A) Nube de puntos generada en Agisoft. B) Nube de puntos generada con Meshroom.

Experimento en laboratorio

Se crearon 20 conjuntos de datos en forma de nubes de puntos para llevar a cabo este experimento, utilizando la técnica de fotogrametría. De estos conjuntos, 10 corresponden a una caja con una altura de 16 cm, mientras que los otros 10 corresponden a una caja con una altura de 20 cm. Además, se generaron otros 20 conjuntos de datos mediante la tecnología LiDAR, con la misma distribución de alturas para las cajas (10 para 16 cm y 10 para 20 cm). En cada una de estas nubes de puntos, se realizaron mediciones de las dimensiones X, Y y Z de las respectivas cajas. Las medidas reales de este experimento se aprecian en la Figura 17 y la Figura 18.

Los resultados de la Tabla 5 y la Tabla 6 corresponden a las medidas tomadas a las nubes de puntos generadas con fotogrametría para la caja con 16 cm y 20 cm de altura, respectivamente, junto con los porcentajes de error correspondientes (%error X, %error Y, %error Z) por cada modelo, el promedio general y la medida real de la caja. La incertidumbre de estos datos es de 0.1017 cm, es decir, la desviación estándar que existe entre varias tomas de un mismo segmento del mismo modelo.

En la Tabla 5, se aprecia variabilidad en cada medición individual (de 16_1 a 16_10) con respecto a la medida real de las dimensiones X, Y y Z en los distintos grupos. Los promedios de estas mediciones son 40.15, 35.10 y 15.43 cm para las dimensiones X, Y y Z, respectivamente. Los errores asociados a las dimensiones X, Y y Z son 0.42, 0.32 y 3.59 %, respectivamente, siendo la medición en Z la que presenta el mayor error.

Tabla 5. Resultados obtenidos con fotogrametría para la caja de 16 cm de alto en el experimento en laboratorio.

<i>Grupo</i>	<i>Medida X</i>	<i>Medida Y</i>	<i>Medida Z</i>	<i>%error X</i>	<i>%error Y</i>	<i>%error Z</i>
	<i>cm</i>	<i>cm</i>	<i>cm</i>			
16_1	40.23	35.19	15.56	0.57	0.54	2.76
16_2	40.17	35.29	15.36	0.42	0.83	4.01
16_3	40.30	35.18	15.35	0.76	0.51	4.06
16_4	40.13	34.98	15.42	0.32	0.06	3.64
16_5	40.08	35.13	15.52	0.21	0.36	3.00
16_6	40.37	35.11	15.54	0.93	0.33	2.86
16_7	40.17	34.98	15.24	0.42	0.06	4.74
16_8	40.07	35.06	15.40	0.18	0.17	3.74
16_9	40.08	34.96	15.55	0.20	0.12	2.81
16_10	39.93	35.08	15.31	0.17	0.23	4.31
Promedio	40.15	35.10	15.43	0.42	0.32	3.59
Medida Real	40	35	16			

En la Tabla 6, también se aprecia variabilidad en cada medición individual (de 20_1 a 20_10) con respecto a la medida real de las dimensiones X, Y y Z en los distintos grupos. Los promedios de estas mediciones son 39.96, 35.09 y 19.75 para las dimensiones X, Y y Z, respectivamente. Los errores asociados a las dimensiones X, Y y Z son 0.21, 0.39 y 1.23, respectivamente, siendo la medición en Z la que presenta el mayor error.

Tabla 6. Resultados obtenidos con fotogrametría para la caja de 20 cm de alto en el experimento en laboratorio.

<i>Grupo</i>	<i>Medida X</i>	<i>Medida Y</i>	<i>Medida Z</i>	<i>%error X</i>	<i>%error Y</i>	<i>%error Z</i>
	<i>cm</i>	<i>cm</i>	<i>cm</i>			
20_1	40.05	35.25	19.68	0.14	0.72	1.59
20_2	39.91	35.04	19.77	0.22	0.11	1.14
20_3	39.98	35.26	19.74	0.04	0.75	1.28
20_4	39.89	35.18	19.67	0.27	0.52	1.63
20_5	40.01	34.92	19.68	0.02	0.22	1.61
20_6	39.84	34.91	19.73	0.39	0.27	1.37
20_7	39.98	35.19	19.74	0.05	0.55	1.31
20_8	39.99	35.15	19.91	0.02	0.44	0.45
20_9	39.79	35.05	19.82	0.52	0.14	0.91
20_10	40.16	34.95	19.80	0.41	0.14	1.00
Promedio	39.96	35.09	19.75	0.21	0.39	1.23
Medida Real	40	35	20			

Los resultados de la Tabla 7 y la Tabla 8 corresponden a las medidas tomadas a las nubes de puntos generadas con LiDAR para la caja con 16 cm y 20 cm de altura, respectivamente, junto con los porcentajes de error correspondientes (%error X, %error Y, %error Z) para cada grupo, el promedio general y la medida real de la caja.

En la Tabla 7, hay variabilidad en cada medición individual (de 16_1 a 16_10) con respecto a la medida real de las dimensiones X, Y y Z en los distintos grupos. Los promedios de estas mediciones son 39.65, 34.92 y 15.64 para las dimensiones X, Y y Z, respectivamente. Los errores asociados a las dimensiones X, Y y Z son 1.06, 1.18 y 2.28, respectivamente, siendo la medición en Z la que presenta el mayor error. En comparación con la caja de las mismas dimensiones cuya nube de puntos se obtuvo con fotogrametría, se observa que el porcentaje de error para las dimensiones X y Y obtenido mediante LiDAR es mayor con respecto al porcentaje de error obtenido con fotogrametría. Lo contrario ocurre con el porcentaje de error de la dimensión Z, ya que ésta presenta mayor porcentaje de error con fotogrametría que con LiDAR. Las comparaciones de estos porcentajes de error se aprecian en la Figura 28.

Tabla 7. Resultados obtenidos con LiDAR para la caja de 16 cm de alto en el experimento en laboratorio.

<i>Grupo</i>	<i>Medida X</i>	<i>Medida Y</i>	<i>Medida Z</i>	<i>%error X</i>	<i>%error Y</i>	<i>%error Z</i>
	<i>cm</i>	<i>cm</i>	<i>cm</i>			
16_1	38.63	33.64	14.68	3.42	3.89	8.26
16_2	39.96	35.02	16.01	0.11	0.06	0.08
16_3	39.52	35.20	15.92	1.20	0.56	0.49
16_4	39.87	35.24	15.77	0.33	0.70	1.44
16_5	39.64	34.74	15.52	0.90	0.75	2.97
16_6	40.36	35.83	15.82	0.89	2.38	1.14
16_7	39.46	34.49	15.41	1.36	1.46	3.71
16_8	39.94	35.39	15.88	0.14	1.11	0.78
16_9	39.33	34.77	15.81	1.69	0.65	1.22
16_10	39.80	34.93	15.57	0.50	0.21	2.72
Promedio	39.65	34.92	15.64	1.06	1.18	2.28
Medida Real	40	35	16			

En la Tabla 8 también hay variabilidad en cada medición individual (de 20_1 a 20_10) con respecto a la medida real de las dimensiones X, Y y Z en los distintos grupos. Los promedios de estas mediciones son 39.56, 34.63 y 19.98 para las dimensiones X, Y y Z, respectivamente. Los errores asociados a las dimensiones X, Y y Z son 1.97, 1.35 y 1.23, respectivamente, siendo la medición en Z la que presenta el mayor error. En comparación con la caja de las mismas dimensiones cuya nube de puntos se obtuvo con fotogrametría, se observa que el porcentaje de error para las dimensiones X y Y obtenido mediante LiDAR es mayor con respecto al porcentaje de error obtenido con fotogrametría. Con el porcentaje de error de la dimensión Z, se obtuvo el mismo valor para la medición con fotogrametría y con LiDAR. Las comparaciones de estos porcentajes de error se aprecian en la Figura 28.

Con excepción de la medida de la dimensión Z de fotogrametría para la caja con 16 cm de altura, en general se puede apreciar que se obtiene un mayor porcentaje de error en las medidas tomadas en las nubes de puntos generadas por LiDAR.

Tabla 8. Resultados obtenidos con LiDAR para la caja de 20 cm de alto en el experimento en laboratorio.

<i>Grupo</i>	<i>Medida X</i>	<i>Medida Y</i>	<i>Medida Z</i>	<i>%error X</i>	<i>%error Y</i>	<i>%error Z</i>
	<i>cm</i>	<i>cm</i>	<i>cm</i>			
20_1	38.30	33.70	19.49	4.26	3.73	2.53
20_2	38.86	33.94	19.69	2.85	3.04	1.53
20_3	39.17	34.62	20.17	2.07	1.08	0.84
20_4	39.66	35.03	20.38	0.86	0.07	1.91
20_5	39.19	34.71	19.79	2.03	0.82	1.05
20_6	40.51	35.23	20.27	1.27	0.67	1.36
20_7	39.73	34.70	20.05	0.67	0.84	0.26
20_8	40.62	35.28	20.04	1.54	0.79	0.18
20_9	38.92	34.25	19.71	2.69	2.13	1.46
20_10	40.60	34.88	20.24	1.49	0.35	1.19
Promedio	39.56	34.63	19.98	1.97	1.35	1.23
Medida real	40	35	20			

Experimento con caja en laboratorio

Con altura de 16 y 20 cm

16X 16Y 16Z 20X 20Y 20Z

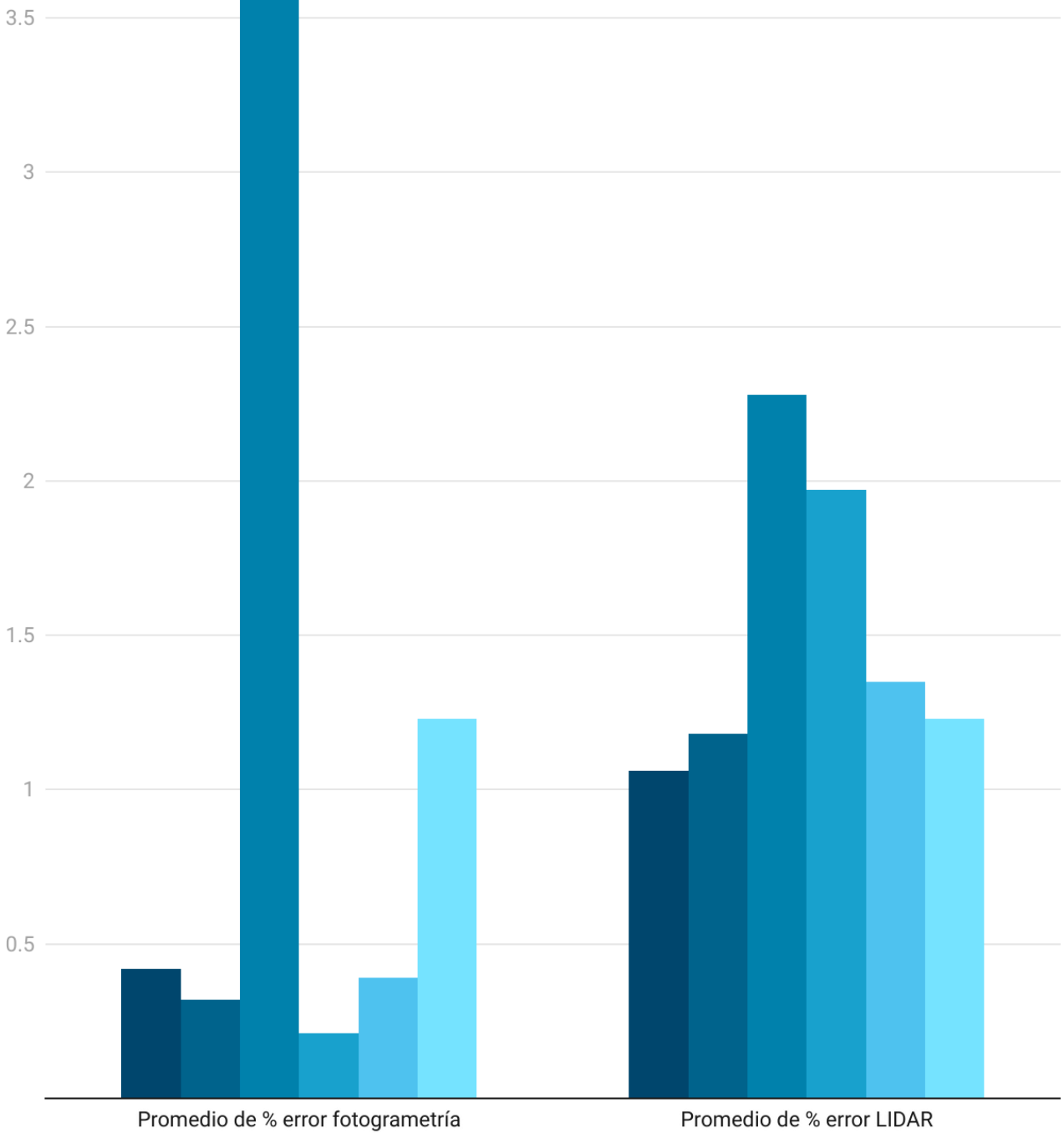


Figura 28. Grafica % de error de fotogrametría vs. LiDAR en laboratorio.

Experimento en campo

Se crearon 2 conjuntos de datos en forma de nubes de puntos para llevar a cabo este experimento. De estos conjuntos de datos, uno fue generado con fotogrametría y uno fue generado con LiDAR.

En ambos conjuntos aparecen los objetos cuyas medidas reales se aprecian en la Figura 19.

Los resultados de la Tabla 9 y la Tabla 10 corresponden a las medidas tomadas en las nubes de puntos generadas con fotogrametría y LiDAR, respectivamente, junto con los promedios de porcentajes de error, error mínimo y máximo y el promedio de la diferencia en centímetros para caja conjunto. La incertidumbre de estos datos es de 0.668 cm, es decir, la desviación estándar que existe entre varias tomas de un mismo segmento del mismo modelo.

En la Tabla 9, se aprecia variabilidad en cada medición individual (de Medición 1 a Medición 7) con respecto a la medida real. La variabilidad en las diferencias sugiere que la precisión de la fotogrametría puede depender de la magnitud de las dimensiones medidas. El porcentaje de error varía entre 0.04% y 2.80%, indicando en general una precisión aceptable en las mediciones de fotogrametría. Las discrepancias más notables se observan en la Medida 6, donde el %error alcanza el 2.80%. El promedio de diferencia entre las medidas reales y las obtenidas por fotogrametría es de 0.30 cm, sugiriendo en general una buena concordancia entre ambas. La Medida 6 destaca como la única con un %error significativamente alto (2.80%), lo que podría indicar una dificultad específica en la captura de esa dimensión.

Tabla 9. Resultados obtenidos con fotogrametría en el experimento en campo.

<i>ID</i>	<i>Medida Real</i>	<i>Medida obtenida en software</i>	<i>%error</i>	<i>Diferencia Medida Real - Medida obtenida en software</i>
	<i>cm</i>	<i>cm</i>		<i>cm</i>
Medida 1	140	140.06	0.04	0.06
Medida 2	70	69.21	1.13	0.79
Medida 3	30	30.43	1.43	0.43
Medida 4	40	40.13	0.32	0.13
Medida 5	36	36.11	0.31	0.11
Medida 6	20	20.56	2.80	0.56
Medida 7	16	16.02	0.11	0.02
Promedio de % error			0.88	
Error mínimo			0.04	
Error máximo			2.80	
Promedio de diferencia [cm]				0.30

En la Tabla 10, las mediciones presentan discrepancias en comparación con las medidas reales, algunas positivas y otras negativas. La magnitud de las diferencias varía entre las mediciones, sugiriendo cierta inconsistencia en la precisión de LiDAR para diferentes dimensiones. Los porcentajes de error oscilan entre 0.05% y 12.13%, indicando una variabilidad significativa en la precisión de las mediciones realizadas con LiDAR. La Medida 3 destaca con un %error notablemente alto del 12.13% (Figura 29). El promedio de diferencia entre las medidas reales y las obtenidas por LiDAR es de 0.62 cm, mostrando una variabilidad moderada en la precisión de las mediciones.

Tabla 10. Resultados obtenidos con LiDAR en el experimento en campo.

<i>ID</i>	<i>Medida Real</i> <i>cm</i>	<i>Medida obtenida en software</i> <i>cm</i>	<i>%error</i>	<i>Diferencia Medida Real - Medida obtenida en software</i> <i>cm</i>
Medida 1	140	139.93	0.05	0.07
Medida 2	70	70.04	0.06	0.04
Medida 3	30	26.36	12.13	3.64
Medida 4	40	40.05	0.13	0.05
Medida 5	36	36.11	0.31	0.11
Medida 6	20	19.81	0.95	0.19
Medida 7	16	16.25	1.57	0.25
Promedio de % error			2.17	
Error mínimo			0.05	
Error máximo			12.13	
Promedio de diferencia [cm]				0.62

Tanto la fotogrametría como el LiDAR muestran resultados similares en términos de % de error como se muestra en la Figura 29. Sin embargo, LiDAR presenta una mayor variabilidad, especialmente evidenciada por el error máximo en una medición específica (Medida 3).

Experimento con caja en campo

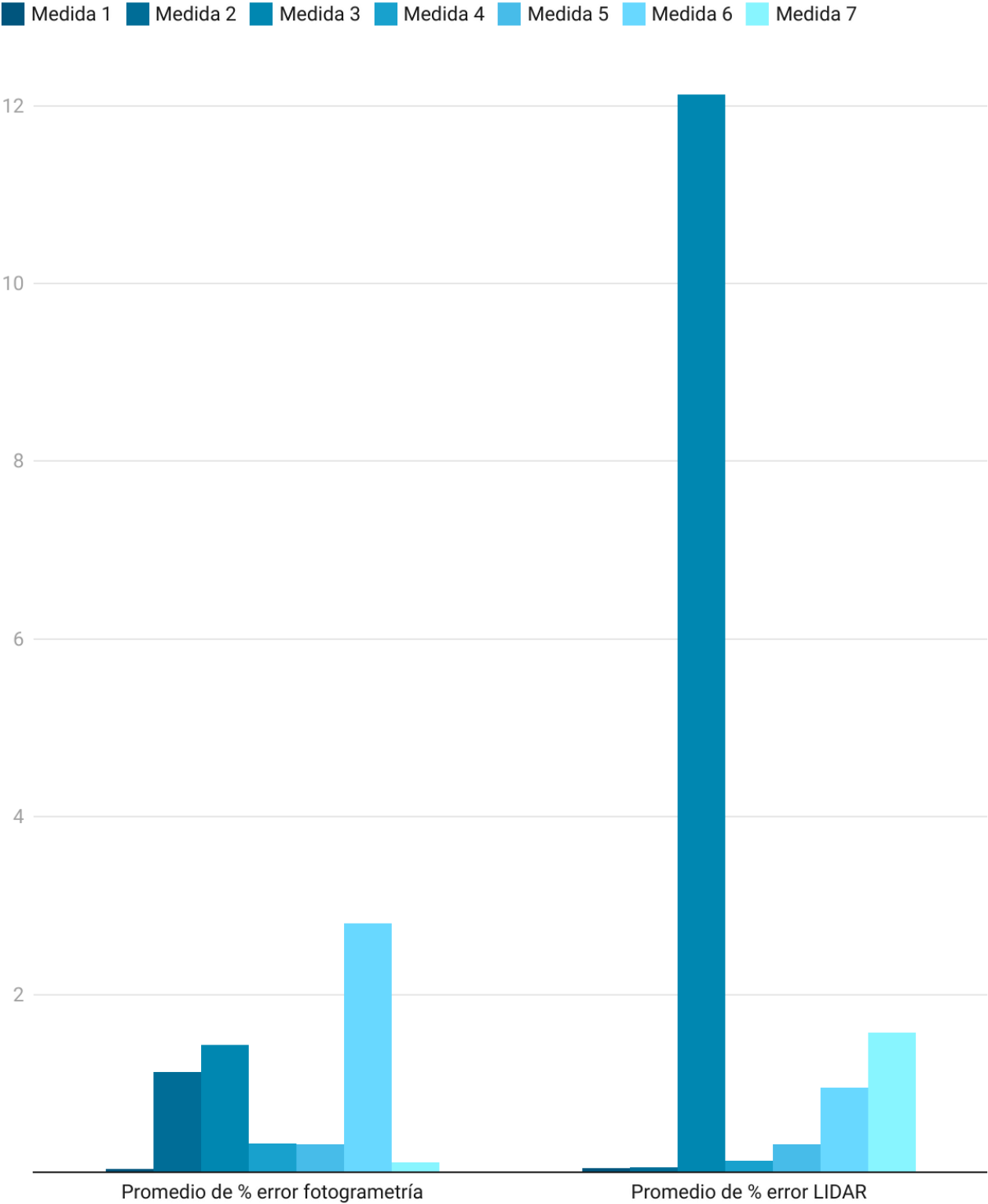


Figura 29. Grafica % de error de fotogrametría vs. LiDAR en campo.

Aplicación a estructuras civiles

Un fin de conocer estos resultados es el de comprobar si estos métodos pueden ser utilizados para monitorear estructuras civiles afectadas por la subsidencia. Para este proceso, se compararon las medidas de dos edificios reconstruidos con fotogrametría en dos momentos en el tiempo: 2021 y 2022. Se busca reconocer algún tipo de movimiento en la nube de puntos que pueda identificarse como consecuencia de la deformación del terreno o de la estructura civil. Así también es importante conocer las diferencias en cuanto al resultado generado por el tipo de herramienta de adquisición: celular y dron, así como las diferencias de aplicar, o no, corrección geométrica a los resultados.

Edificio Palomares

Nube de puntos de Edificio Palomares



a) 2021



b) 2022



c) 2021 y 2022

Figura 30. Comparación entre nubes de puntos generadas en 2021 (a), en 2022 (b) y superposición de 2022 sobre 2021 (c) del edificio Palomares.

Los resultados obtenidos a partir de las nubes de puntos sin corrección geométrica generadas para el Edificio Palomares con las imágenes capturadas con celular en 2021 y 2022 se muestran en la Tabla 11. La incertidumbre de estos datos es de 1.9945 cm, es decir, la desviación estándar que existe entre varias tomas de un mismo segmento del mismo modelo. Las medidas reales para este experimento pueden ser apreciadas en la Figura 20.

En la Tabla 11 se observa un %error promedio del 25.14% para el año 2021 y del 60.48% para el año 2022. El promedio de diferencia es de 44.25 cm para el año 2021 y de 93.25 cm para el año 2022. La variabilidad en los porcentajes de error y diferencias sugiere una falta de precisión consistente en ambas mediciones. El error mínimo es de 11.54 cm para el año 2021 y de 57.69 cm para el año 2022. El error máximo es de 38.03 cm para el año 2021 y de 62.25 cm para el año 2022. Las mediciones del año 2022 muestran, en promedio, un mayor porcentaje de error y diferencias más grandes en comparación con el año 2021.

Tabla 11. Resultados de mediciones obtenidas de la nube de puntos fotogramétrica del Edificio Palomares a partir de las fotografías tomadas con celular en los años 2021 y 2022, sin corrección geométrica.

<i>ID</i>	<i>Medida Real</i> <i>cm</i>	<i>Medida obtenida en software Celular 2021</i> <i>cm</i>	<i>%error</i>	<i>Diferencia Medida Real - Medida obtenida en software</i> <i>cm</i>	<i>Medida obtenida en software Celular 2022</i> <i>cm</i>	<i>%error</i>	<i>Diferencia Medida Real - Medida obtenida en software</i> <i>cm</i>
Medida 1	52.0	46.00	11.54	6.00	22.00	57.69	30.00
Medida 2	147.0	120.00	18.37	27.00	57.00	61.22	90.00
Medida 3	234.5	158.00	32.62	76.50	92.00	60.77	142.50
Medida 4	177.5	110.00	38.03	67.50	67.00	62.25	110.50
Promedio de % error			25.14			60.48	
Error mínimo			11.54			57.69	
Error máximo			38.03			62.25	
Promedio de diferencia [cm]				44.25			93.25

Los resultados obtenidos a partir de las nubes de puntos con corrección geométrica generadas para el Edificio Palomares con las imágenes capturadas con celular en 2021 y 2022 se muestran en la Tabla 12.

En la Tabla 12 se observa un %error promedio del 0.45% para el año 2021 y del 0.27% para el año 2022. El promedio de diferencia es de 0.67 cm para el año 2021 y de 0.43 cm para el año 2022.

Estos valores indican una mayor precisión en las mediciones con la aplicación de corrección geométrica. El error mínimo es de 0.14 cm para el año 2021 y de 0.08 cm para el año 2022. El error máximo es de 1.13 cm para el año 2021 y de 0.47 cm para el año 2022. Las mediciones del año 2022, en promedio, presentan un %error y diferencias más pequeñas en comparación con el año 2021.

Tabla 12. Resultados de mediciones obtenidas de la nube de puntos fotogramétrica del edificio Palomares a partir de las fotografías tomadas con celular en los años 2021 y 2022, con corrección geométrica.

ID	Medida Real	Medida obtenida en software Celular 2021	%error	Diferencia Medida Real - Medida obtenida en software	Medida obtenida en software Celular 2022	%error	Diferencia Medida Real - Medida obtenida en software
	cm	cm		cm	cm		cm
Medida 1	52.0	52.09	0.17	0.09	52.10	0.18	0.09
Medida 2	147.0	148.66	1.13	1.66	147.70	0.47	0.70
Medida 3	234.5	234.17	0.14	0.33	233.74	0.32	0.76
Medida 4	177.5	176.88	0.35	0.62	177.65	0.08	0.15
Promedio de % error			0.45			0.27	
Error mínimo			0.14			0.08	
Error máximo			1.13			0.47	
Promedio de diferencia [cm]				0.67			0.43

Para la Tabla 13 y la Tabla 14, que son en las que se registraron las mediciones de las nubes de puntos de imágenes capturadas con dron, se utilizó la siguiente nomenclatura:

Nomenclatura por levantamiento:

Dron Parrot vuelo malla 2022: DN_M_2022

Dron Parrot vuelo circular 2022: DN_C_2022

Los resultados de la comparación con la nube de puntos del Edificio Palomares obtenida con dron en vuelo planeado como malla (*DN_M_2022*) y circular (*DN_C_2022*) en 2022 sin corrección geométrica se muestran en la Tabla 13. Los datos medidos sobre la nube de puntos con corrección geométrica se muestran en la Tabla 14.

En la Tabla 13 se observa que las mediciones reflejan variabilidad en la precisión, con diferencias considerables entre la medida real y la obtenida por el software, tanto para vuelos en forma de malla (*DN_M_2022*) como para vuelos en forma circular (*DN_C_2022*). El %error promedio es del 1.86% para *DN_M_2022* y del 2.31% para *DN_C_2022*. La diferencia promedio es de 2.30 cm para *DN_M_2022* y de 2.76 cm para *DN_C_2022*. Se observa un error mínimo de 0.27 cm para *DN_M_2022* y de 0.04 cm para *DN_C_2022*. El error máximo es de 5.22 cm para *DN_M_2022* y de 13.43 cm para *DN_C_2022*. No hay una diferencia significativa en el %error promedio entre los vuelos en forma de malla y circular.

Tabla 13. Resultados de mediciones obtenidas de la nube de puntos fotogramétrica del edificio Palomares a partir de los vuelos realizados con dron en el año 2022, sin corrección geométrica.

ID	Medida Real <i>cm</i>	Medida obtenida en software <i>DN_M_2022</i> <i>cm</i>	%error	Diferencia Medida		%error	Diferencia Medida
				Real - Medida obtenida en software <i>cm</i>	Medida obtenida en software <i>DN_C_2022</i> <i>cm</i>		
Medida 1	52.0	52.52	1.00	0.52	51.54	0.89	0.46
Medida 2	147.0	148.16	0.79	1.16	146.35	0.44	0.65
Medida 3	234.5	243.94	4.02	9.44	234.63	0.06	0.13
Medida 4	177.5	178.07	0.32	0.57	178.63	0.63	1.13
Medida 5	68.0	70.32	3.41	2.32	69.29	1.90	1.29
Medida 6	130.0	126.59	2.62	3.41	112.54	13.43	17.46
Medida 7	60.0	56.87	5.22	3.13	56.45	5.92	3.55
Medida 8	150.0	148.34	1.11	1.66	151.00	0.66	1.00
Medida 9	158.0	156.74	0.79	1.26	158.06	0.04	0.06
Medida 10	326.0	323.71	0.70	2.29	325.79	0.07	0.21
Medida 11	205.5	206.05	0.27	0.55	198.47	3.42	7.03
Medida 12	60.0	58.75	2.08	1.25	60.18	0.30	0.18
Promedio de % error			1.86			2.31	
Error mínimo			0.27			0.04	
Error máximo			5.22			13.43	
Promedio de diferencia [cm]				2.30			2.76

En la Tabla 14 las mediciones muestran una variabilidad en la precisión, con diferencias entre la medida real y la obtenida por el software para ambos tipos de vuelo (DN_M_2022 y DN_C_2022). El %error promedio es del 2.31% para DN_M_2022 y del 1.15% para DN_C_2022. La diferencia promedio es de 2.79 cm para DN_M_2022 y de 1.36 cm para DN_C_2022. Estos valores indican mejoras en la precisión en comparación con mediciones sin corrección geométrica. El error mínimo es de 0.03 cm para DN_M_2022 y de 0.04 cm para DN_C_2022. El error máximo es de 13.27 cm para DN_M_2022 y de 5.92 cm para DN_C_2022. El %error promedio es mayor para DN_M_2022 en comparación con DN_C_2022. La corrección geométrica parece tener un impacto más positivo en las mediciones de DN_M_2022.

Tabla 14 Resultados de mediciones obtenidas de la nube de puntos fotogramétrica del edificio Palomares a partir de los vuelos realizados con dron en el año 2022, con corrección geométrica.

ID	Medida Real	Medida obtenida en software DN_M_2022	%error	Diferencia Medida Real - Medida obtenida en software	Medida obtenida en software DN_C_2022	%error	Diferencia Medida Real - Medida obtenida en software
	cm	cm		cm	cm		cm
Medida 1	52.0	53.95	3.75	1.95	52.21	0.40	0.21
Medida 2	147.0	145.68	0.90	1.32	147.64	0.44	0.64
Medida 3	234.5	236.37	0.80	1.87	235.25	0.32	0.75
Medida 4	177.5	178.66	0.66	1.16	177.90	0.23	0.40
Medida 5	68.0	65.91	3.08	2.09	68.45	0.66	0.45
Medida 6	130.0	112.75	13.27	17.25	131.80	1.38	1.80
Medida 7	60.0	60.89	1.48	0.89	56.45	5.92	3.55
Medida 8	150.0	149.96	0.03	0.04	151.00	0.66	1.00
Medida 9	158.0	159.89	1.20	1.89	158.06	0.04	0.06
Medida 10	326.0	327.97	0.60	1.97	325.79	0.07	0.21
Medida 11	205.5	202.91	1.26	2.59	198.47	3.42	7.03
Medida 12	60.0	60.42	0.70	0.42	60.18	0.30	0.18
Promedio de % error			2.31			1.15	
Error mínimo			0.03			0.04	
Error máximo			13.27			5.92	
Promedio de diferencia [cm]				2.79			1.36

Nube de puntos de Edificio Salmón



a) 2021



b) 2022



c) 2021 y 2022

Figura 31. Comparación entre nubes de puntos generadas en 2021 (a), en 2022 (b) y superposición de 2022 sobre 2021 (c) del edificio Salmón.

Los resultados obtenidos a partir de las nubes de puntos sin corrección geométrica generadas para el Edificio Salmón con las imágenes capturadas con celular en 2021 y 2022 se muestran en la Tabla 15. La incertidumbre de estos datos es de 0.114 cm, es decir, la desviación estándar que existe entre varias tomas de un mismo segmento del mismo modelo. Las medidas reales para este experimento pueden ser apreciadas en la Figura 21.

En la Tabla 15 se observa que el promedio de error para ambas fechas es significativamente alto, indicando una diferencia considerable entre las medidas reales y las obtenidas mediante el software. El valor promedio de % error es del 12.32% para el año 2021 y del 6.41% para el año 2022. Se

observa una variabilidad considerable en los errores, desde un mínimo del 3.02% hasta un máximo del 27.06% en el año 2021, y del 1.72% al 15.29% en el año 2022. La diferencia promedio entre las medidas reales y las obtenidas en el software es notable, siendo de 21.64 cm para el año 2021 y 10.36 cm para el año 2022.

Tabla 15. Resultados de mediciones obtenidas de la nube de puntos fotogramétrica del edificio Salmón a partir de las fotografías tomadas con celular en los años 2021 y 2022, sin corrección geométrica.

ID	Medida Real cm	Medida obtenida en software Celular 2021	%error	Diferencia Medida Real - Medida obtenida en software	Medida obtenida en software Celular 2022	%error	Diferencia Medida Real - Medida obtenida en software
		cm		cm	cm		cm
Medida 1	42.5	54.00	27.06	11.50	49.00	15.29	6.50
Medida 2	189.0	217.00	14.81	28.00	208.00	10.05	19.00
Medida 3	232	239.00	3.02	7.00	236.00	1.72	4.00
Medida 4	116	125.00	7.76	9.00	119.00	2.59	3.00
Medida 5	321.0	342.00	6.54	21.00	328.00	2.18	7.00
Medida 6	321.0	368.00	14.64	47.00	333.00	3.74	12.00
Medida 7	226.0	254.00	12.39	28.00	247.00	9.29	21.00
Promedio de % error			12.32			6.41	
Error mínimo			3.02			1.72	
Error máximo			27.06			15.29	
Promedio de diferencia [cm]				21.64			10.36

Los datos indican que los datos de 2022 proporcionan medidas más precisas en comparación con el los datos del 2021. Sin embargo, aún existen diferencias entre las medidas reales y las medidas obtenidas en software en ambos casos.

Los resultados de la Tabla 16, que corresponden a mediciones obtenidas de la nube de puntos fotogramétrica del edificio Salmón a partir de fotografías tomadas con celular en los años 2021 y 2022 con corrección geométrica, muestran una mejora sustancial en la precisión de las medidas en comparación con los datos sin corrección geométrica.

Con la aplicación de la corrección geométrica, se observa una disminución significativa en el promedio de % error, siendo del 0.60% para el año 2021 y del 0.46% para el año 2022. Esto sugiere una mayor concordancia entre las medidas reales y las obtenidas en el software. Los valores de error mínimo y máximo también disminuyen con la corrección geométrica, mostrando una mayor consistencia en las mediciones. El error mínimo es del 0.11%, y el error máximo es del 1.65% para el año 2021, mientras que para el año 2022, el error mínimo es del 0.15%, y el error máximo es del 0.82%. La diferencia promedio entre las medidas reales y las obtenidas en el software se reduce considerablemente con la corrección geométrica. El promedio de diferencia es de 0.90 cm para el año 2021 y 0.75 cm para el año 2022.

Tabla 16. Resultados de mediciones obtenidas de la nube de puntos fotogramétrica del edificio Salmón a partir de las fotografías tomadas con celular en los años 2021 y 2022, con corrección geométrica.

ID	Medida Real cm	Medida obtenida en software Celular 2021	%error	Diferencia Medida Real - Medida obtenida en software cm	Medida obtenida en software Celular 2022	%error	Diferencia Medida Real - Medida obtenida en software cm
		cm		cm	cm		cm
Medida 1	42.5	42.10	0.94	0.40	42.85	0.82	0.35
Medida 2	189.0	185.88	1.65	3.12	189.71	0.38	0.71
Medida 3	232	232.32	0.14	0.32	232.98	0.42	0.98
Medida 4	116	117.17	1.01	1.17	115.11	0.77	0.89
Medida 5	321.0	320.66	0.11	0.34	320.52	0.15	0.48
Medida 6	321.0	320.47	0.16	0.53	321.98	0.31	0.98
Medida 7	226.0	225.54	0.21	0.46	226.89	0.39	0.89
Promedio de % error			0.60			0.46	
Error mínimo			0.11			0.15	
Error máximo			1.65			0.82	
Promedio de diferencia [cm]				0.90			0.75

Para la Tabla 17 y la Tabla 18, que son en las que se registraron las mediciones de las nubes de puntos de imágenes capturadas con dron, se utilizó la siguiente nomenclatura:

Nomenclatura por levantamiento:

Dron Parrot vuelo malla 2022: DN_M_2022

Dron Parrot vuelo circular 2022: DN_C_2022

Los resultados de la comparación con la nube de puntos del Edificio Salmón obtenida con dron en vuelo planeado como malla (**DN_M_2022**) y circular (**DN_C_2022**) en 2022 sin corrección geométrica se muestran en la Tabla 17. Los datos medidos sobre la nube de puntos con corrección geométrica se muestran en la Tabla 18.

En la Tabla 17 se observa que las mediciones reflejan poca variabilidad en la precisión, tanto para vuelos en forma de malla (DN_M_2022) como para vuelos en forma circular (DN_C_2022). El %error promedio es del 0.90% para DN_M_2022 y del 0.78% para DN_C_2022. La diferencia promedio es de 1.07 cm para DN_M_2022 y de 1.35 cm para DN_C_2022. Se observa un error mínimo de 0.07% para DN_M_2022 y de 0.11% para DN_C_2022. El error máximo es de 2.54% para DN_M_2022 y de 2.26% para DN_C_2022. No hay una diferencia significativa en el %error promedio entre los vuelos en forma de malla y circular.

Tabla 17. Resultados de mediciones obtenidas de la nube de puntos fotogramétrica del edificio Salmón a partir de los vuelos realizados con dron en el año 2022, sin corrección geométrica.

ID	Medida Real	Medida obtenida en software DN_M_2022	%error	Diferencia Medida	Medida obtenida en software DN_C_2022	%error	Diferencia Medida
				Real - Medida obtenida en software			Real - Medida obtenida en software
	cm	cm		cm	cm		cm
Medida 1	42.5	41.42	2.54	1.08	42.09	0.96	0.41
Medida 2	189.0	191.10	1.11	2.10	184.73	2.26	4.27
Medida 5	321.0	321.22	0.07	0.22	320.48	0.16	0.52
Medida 6	321.0	321.85	0.27	0.85	322.28	0.40	1.28
Medida 7	226.0	224.89	0.49	1.11	226.25	0.11	0.25
Promedio de % error			0.90			0.78	
Error mínimo			0.07			0.11	
Error máximo			2.54			2.26	
Promedio de diferencia [cm]				1.07			1.35

Los resultados de la Tabla 18 que corresponden a mediciones obtenidas de la nube de puntos fotogramétrica del edificio Salmón a partir de vuelos realizados con dron en el año 2022 con

corrección geométrica, indican la precisión de las medidas obtenidas después de aplicar las correcciones.

En la tabla 18 se observa que el promedio de % error es de 0.51%, lo que muestra una mejora en la precisión en comparación con las mediciones sin corrección geométrica (0.90%) para el vuelo DN_M_2022. Esto sugiere que la aplicación de correcciones geométricas contribuyó positivamente a la precisión de las mediciones. En el caso de DN_C_2022 el promedio de porcentaje de error fue del 0.84% el cual es la única excepción en que el porcentaje de error es mayor que sin corrección geométrica (0.78%). El promedio de diferencia es de 0.63 cm para DN_M_2022 y 1.16 cm para DN_C_2022. Estas diferencias son prácticamente despreciables en la mayoría de las aplicaciones. El error mínimo es del 0.01% para DN_M_2022 y del 0.02% para DN_C_2022. El error máximo es del 1.54% para DN_M_2022 y del 2.20% para DN_C_2022.

Tabla 18. Resultados de mediciones obtenidas de la nube de puntos fotogramétrica del edificio Salmón a partir de los vuelos realizados con dron en el año 2022, con corrección geométrica.

ID	Medida Real	Medida obtenida en software DN_M_2022	%error	Diferencia Medida Real - Medida obtenida en software cm	Medida obtenida en software DN_C_2022	%error	Diferencia Medida Real - Medida obtenida en software cm
	cm	cm		cm	cm		cm
Medida 1	42.5	43.16	1.54	0.66	41.82	1.60	0.68
Medida 2	189.0	188.00	0.53	1.00	184.85	2.20	4.15
Medida 5	321.0	321.54	0.17	0.54	320.93	0.02	0.07
Medida 6	321.0	320.05	0.29	0.95	321.19	0.06	0.19
Medida 7	226.0	225.98	0.01	0.02	225.31	0.30	0.69
Promedio de % error			0.51			0.84	
Error mínimo			0.01			0.02	
Error máximo			1.54			2.20	
Promedio de diferencia [cm]				0.63			1.16

De forma visual, en la Figura 32 se muestra la comparación entre el porcentaje de error en medidas al aplicar o no aplicar la corrección geométrica. Es notable la diferencia entre los resultados de aplicar dicha corrección.

Comparación del % de error en medidas con y sin corrección geométrica

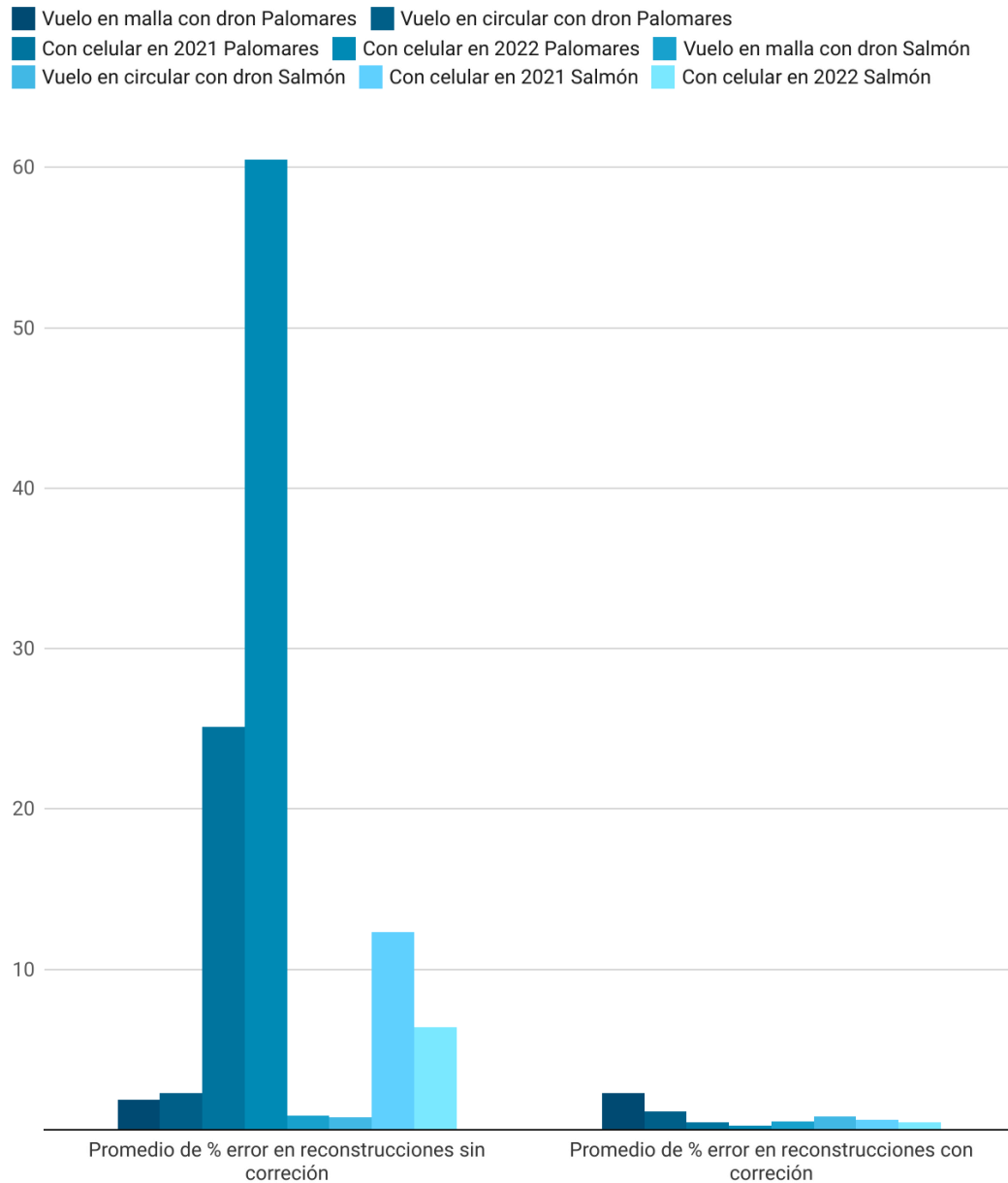


Figura 32. Porcentaje de error en medidas tomadas en nube de puntos en reconstrucciones sin corrección vs. reconstrucciones con corrección geométrica.

Lo mismo ocurre y en la Figura 33, en la que se muestra la comparación entre el promedio de la diferencia medida en cm con y sin corrección geométrica. Las barras que se encuentran del lado derecho son notoriamente menores que las del lado izquierdo, mostrando la reducción considerable del promedio de diferencia medida si se aplica corrección geométrica.

Comparación del promedio de la diferencia de medida en centímetros con y sin corrección geométrica

■ Vuelo en malla con dron Palomares ■ Vuelo en circular con dron Palomares
■ Con celular en 2021 Palomares ■ Con celular en 2022 Palomares ■ Vuelo en malla con dron Salmón
■ Vuelo en circular con dron Salmón ■ Con celular en 2021 Salmón ■ Con celular en 2022 Salmón

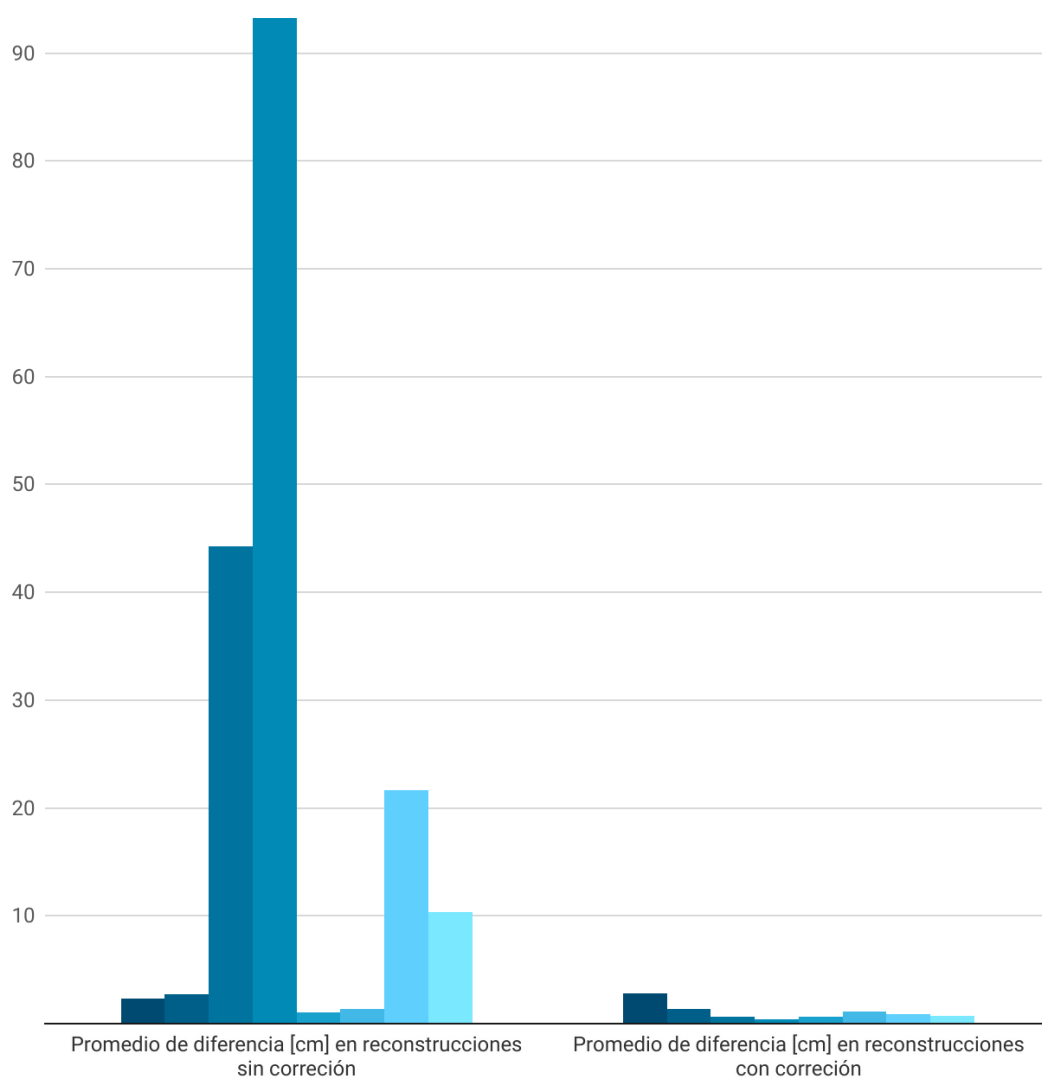


Figura 33. Promedio de diferencia en [cm] en medidas tomadas en nube de puntos en reconstrucciones sin corrección vs. reconstrucciones con corrección geométrica

5. Discusión

La CDMX como muchas otras ciudades, sufren de un fenómeno paulatino de deformación del terreno. Este problema daña la infraestructura civil, dejándola vulnerable ante otros fenómenos más abruptos como lo son los sismos. En este proyecto se pretende comprobar si a través de reconstrucciones digitales podrían tomarse los datos necesarios para usarlos como métodos de monitoreo de zonas afectadas. Para esto, se realizaron tres procesos: 1) La comparación de softwares fotogramétricos, 2) Realización de experimentos controlado: uno en laboratorio y uno en campo, digitalizando una caja de dimensiones conocidas, y 3) Levantamiento de campo en un sitio que, se sabe, tiene problemas de deformación del terreno, en el que se digitalizaron dos edificios de la zona.

Comparación de softwares

Este primer proceso se realizó para determinar el software fotogramétrico que emplearíamos en este estudio. Se realizó una prueba con el mismo número de fotografías en Agisoft y en Meshroom con el objetivo de evaluar las diferencias en cuanto a la cantidad de puntos que podría generar cada uno. Los resultados mostraron una notable diferencia, ya que Agisoft generó 2271777 puntos y Meshroom 41906. Existen limitaciones que pueden presentarse al sugerir este único criterio como punto de partida para evaluar la completa eficiencia de cada software, ya que existen otros factores a evaluar como lo es el costo computacional o el costo económico, ya que Agisoft es un software comercial y Meshroom es un software libre. Sin embargo, se optó por considerar este criterio debido a que esta generación de puntos es el punto de partida del procesado fotogramétrico.

Experimentos controlados

En el segundo ejercicio, se realizó una digitalización de una caja partida en dos partes, con dos medidas diferentes, pero conocidas con anterioridad. Este ejercicio se realizó en laboratorio y en campo en una escena que contenía en su sitio un banco de nivel.

Experimento en laboratorio

Este experimento muestra las diferencias que puede presentar la aplicación de fotogrametría y LiDAR en un ambiente controlado para dos segmentos de caja. En la Tabla 5 y la Tabla 7 se muestran los resultados obtenidos para el segmento de caja con la altura de 16 cm generado con fotogrametría y LiDAR respectivamente. En ambas tablas puede resaltarse que la medida que mayor error presenta es la medida en Z. Sin embargo, en las otras medidas se aprecia que la reconstrucción

3D generada por fotogrametría arroja porcentajes de error más bajos que los que arroja la reconstrucción con LiDAR.

Con estos resultados se puede decir que:

- Los porcentajes de error, en promedio, son más altos que en la fotogrametría, sugiriendo una posible menor precisión con LiDAR para la caja de 16 cm y 20 cm de altura.
- La fotogrametría parece ofrecer mediciones más consistentes y precisas en comparación con LiDAR en este experimento.
- LiDAR muestra cierta variabilidad y porcentajes de error más elevados, especialmente notables en la caja de 16 cm de altura.
- En general, las mediciones para la caja de 20 cm muestran mayor variabilidad que las de la caja de 16 cm, independientemente de la tecnología utilizada.

La variabilidad en los resultados podría deberse a factores experimentales como lo es la calibración del equipo, características propias de cada software de procesamiento utilizado, la correcta selección de parámetros, así como la definición correcta de los puntos en la nube densa de puntos en la corrección geométrica o por características específicas de las cajas.

Experimento en campo

En este experimento se comparan los modelos generados con fotogrametría y con LiDAR poniendo una caja en campo, siendo el sitio de referencia un banco de nivel del INEGI. Para este experimento, ambas tecnologías muestran una consistencia similar en cuanto al promedio de % error y diferencia en el experimento en campo. La variabilidad en los resultados de ambas tecnologías sugiere que la precisión puede depender de factores específicos de cada medición. LiDAR presenta una mayor variabilidad en el error máximo (12.13 %), que representa una diferencia de 3.64 cm respecto a la medida real, en comparación con la fotogrametría (2.80 %) que representa una diferencia de 0.56 cm respecto a la medida real. Ambas tecnologías muestran cierta eficacia en un entorno de campo, proporcionando mediciones con errores mínimos aceptables.

De igual forma, es importante resaltar los resultados obtenidos para la Medida 7 con ambas tecnologías, ya que esta medida muestra la diferencia de altura (16 cm) entre la caja original (36 cm) y la caja cortada (20 cm). Esta medida sirve de preámbulo para conocer si es posible aplicar esta tecnología en el estudio de la subsidencia debido a que estudia directamente las variaciones en el eje

Z. Por los resultados podemos conocer que el porcentaje de error para fotogrametría en esta medida fue de 0.11 %, mientras que para LiDAR se obtuvo un error de 1.57%.

Entre los experimentos controlados, el experimento en campo resulta de mayor utilidad ya que proporciona información importante en cuando al desempeño real de una herramienta que debe considerar elementos espaciales que podrían afectar la medición, como lo son el paso de peatones, el paso de automóviles, las sombras proyectadas sobre el objeto por el movimiento del sol, etc. Este experimento también muestra una reconstrucción de mayor calidad a excepción del error obtenido en la Medida 3 con LiDAR.

Los resultados obtenidos en los experimentos controlados tanto en laboratorio como en campo pueden mostrar que si bien, los porcentajes de error obtenidos son aceptables, en ambientes donde este mismo ejercicio quisiera replicarse y se requiera una precisión de menos de 0.02 cm, que es lo que corresponde al error de 0.11% estas metodologías no podrían ser útiles por sí mismas y se requeriría complementar el estudio con otro tipo de metodologías.

Aplicación a estructuras civiles

Este tercer proceso consistió en el levantamiento de fotografías de los edificios identificados como Salmon y Palomares. Los edificios que se utilizaron como base para este estudio tienen una historia compleja, pues se sabe con premeditación que uno de ellos (Salmón) sufre a simple vista una inclinación hacia su lado sur y el otro, el edificio Palomares 16, está construido sobre su antecesor, el cual tuvo que ser demolido por presentar daños previos (Gobierno de la Ciudad de México, Secretaría de obras y servicios, 31 de marzo de 2018). La reconstrucción 3D obtenida por fotogrametría de los edificios, conserva la escala del entorno real, por lo que es posible, registrar ángulos y elementos representativos, como ventanas, protectores, etc. Visualmente ambas nubes son útiles para la representación del problema. Puesto que es posible ver la inclinación del edificio Salmón y registrar agrietamiento en el pavimento como en el edificio Palomares 16.

Para este experimento se tomaron medidas sobre elementos inalterables en el tiempo, como lo es la dimensión del portón, visualmente podemos ver cambios en su posición, pero teóricamente debe tener las mismas dimensiones. Ambas medidas se tomaron en años diferentes, pero en el mismo mes, descartando los cambios que la temperatura podría tener en los elementos.

En el caso del edificio palomares en el cual solo se utilizaron cámaras de celular, la precisión en el tiempo varía más de un metro entre las tomas de 2021 y 2022 con respecto a lo obtenido en campo y

más de 60 cm con lo obtenido entre los dos momentos en el tiempo, por lo que no sería útil para reconocer cambios temporales. Sin embargo, los resultados métricos obtenidos en el edificio Salmon son más prometedores, la diferencia entre el dato tomado por metodologías tradicionales y lo obtenido en 2021, varía en un promedio de 0.22 m, en comparación con lo obtenido con 2022 (0.10 m). El promedio de cambio entre lo obtenido en 2021 y 2022 es de 0.11 m.

Esto podría sugerir que las mediciones obtenidas con las nubes de puntos utilizadas en este proyecto varían dependiendo de las metodologías implementadas para su procesamiento. Mejorando el resultado con el uso de los drones. Los resultados obtenidos desde cualquier metodología mejoraban significativamente con el postproceso de corrección geométrica.

6. Conclusiones

La experimentación en las nuevas tecnologías es importante para hacer más eficientes los procesos que actualmente se utilizan para obtener un mismo resultado. El servicio de peritaje estructural por parte de ingenieros civiles consiste en dar un dictamen técnico del estado en el que se encuentra una estructura basados en la evaluación del daño presente. Este daño puede presentarse en forma de grietas o inclinaciones de las estructuras, por lo que se requiere de una visita técnica por parte del experto. Por lo que la evaluación dependerá siempre del usuario. La intención de este proyecto es demostrar si el entorno digital 3D obtenido mediante procesos fotogramétrico podría ser usado como base por estos expertos. Dejando una evidencia física preservable, aun después de finalizada la existencia de la estructura.

En este caso, se compararon dos softwares que procesan las imágenes digitales para la obtención de un modelo fotogramétrico, evidenciando la complejidad y avance del software comercial contra el de acceso libre. La utilidad de estas nubes de puntos depende del objetivo inicial de su desarrollo. Siendo el software comercial el que permite una toma de medidas y ángulos acorde a lo necesario para poder realizar un estudio métrico de desplazamientos. Por otro lado, se comparó también la toma de fotografías sin estructura a partir de teléfonos celulares con cámara, contra lo obtenido mediante vuelos programados de dron. Siendo esto último lo que generó los mejores resultados.

Finalmente, aunque durante la elaboración de este estudio se evidenció la utilidad de las técnicas fotogramétricas como un apoyo visual para la representación del daño sobre las estructuras, queda claro que podría usarse como una herramienta de apoyo para el registro de las dimensiones del daño. Sin embargo, se sugiere analizar los procedimientos de georreferenciación de la nube de puntos

puesto que los datos podrían mejorarse mediante procesamiento en gabinete, específicamente, con la corrección geométrica planteada en este estudio (escalado).

7. Referencias

Agisoft Helpdesk Portal. (2023) Aerial data processing - Orthomosaic&DEM generation (SenseFly eBee). Modified on: Wed, 22 Mar, 2023 at 4:42 PM. Recuperado de <https://agisoft.freshdesk.com/support/solutions/articles/31000156497-aerial-data-processing-orthomosaic-dem-generation-sensefly-ebee->

Aguayo, J., Marín, S., Sánchez, F., 1989, Evolución geológica de la Cuenca de México, en Simposio sobre tópicos Geológicos de la Cuenca del Valle de México: Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, México, D.F., 25–41.

Brudzinski, M., Cabral-Cano, E., Correa-Mora, F., DeMets, C., & Márquez-Azúa, B. (2007). Slow slip transients along the Oaxaca subduction segment from 1993 to 2007. *Geophysical Journal International*, 171(2), 523-538. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246x.2007.03542.x>

Cabral-Cano, E., Molina, O. D., & Granados, H. D. (2011). Subsistencia y sus mapas de peligro: Un ejemplo en el área nororiental de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 63(1), 53-60. <https://doi.org/10.18268/bsgm2011v63n1a4>

Carreón-Freyre, D., Cerca, M., Gutiérrez-Calderón, R., López-Quiroz, P., Alcántara Durán, C., González-Hernández, M., & Centeno-Salas, F. “*Posible influencia de la subsidencia y fracturamiento en la Ciudad de México en las construcciones dañadas por el sismo del 19 de septiembre de 2017*”.

<https://www1.cenapred.unam.mx/SUBCUENTA/22a%20SESI%C3%93N%20ORDINARIA/VIII.%20ASUNTOS%20GENERALES/Reporte%20CDMX%20sismo%202017.pdf>

Carreón-Freyre, D. C., Hidalgo-Moreno, C. M., & Hernández-Marín, M. (2006). Mecanismos de fracturamiento de depósitos arcillosos en zonas urbanas. Caso de deformación diferencial en Chalco, Estado de México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 58(2), 237-250. <https://doi.org/10.18268/bsgm2006v58n2a6>

Fernández-Torres, E., Cabral-Cano, E., Solano-Rojas, D., Havazli, E., & Salazar-Tlaczani, L. (2020). Land Subsidence risk maps and InSAR based angular distortion structural vulnerability assessment: an example in Mexico City. *Proceedings Of IAHS*, 382, 583-587. <https://doi.org/10.5194/piahs-382-583-2020>

Fernández-Torres, E. A., Cabral-Cano, E., Novelo-Casanova, D. A., Solano-Rojas, D., Havazli, E., & Salazar-Tlaczani, L. (2021). Risk assessment of land subsidence and associated faulting in Mexico City using InSAR. *Natural Hazards*, 112(1), 37-55. <https://doi.org/10.1007/s11069-021-05171-0>

CDMX, S. de O. y. S. (s/f). Finaliza demolición de edificio afectado en Tercera Cerrada de Palomares: Sobse. Secretaría de Obras y Servicios de la CDMX. Recuperado el 2 de diciembre de 2023, de <https://www.obras.cdmx.gob.mx/comunicacion/nota/finaliza-demolicion-de-edificio-afectado-en-tercera-cerrada-de-palomares-sobse>

Chaussard, E., Havazli, E., Fattahi, H., Cabral-Cano, E., & Solano-Rojas, D. (2021). Over a century of sinking in Mexico City: No hope for significant elevation and storage capacity recovery. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 126(4), e2020JB020648.

Comité-binacional, Herrera-Revilla, I.y Dumars, C. T. (1995). *El agua y la Ciudad de México, Abastecimiento y Drenaje, Calidad, Salud Pública, Uso Eficiente, Marco Jurídico e Institucional*. México: Consejo Nacional de Investigación y National Academy of Sciences.

Corapcioglu, M.Y. (1984). Land Subsidence — A. A State-of-the-Art Review. In: Bear, J., Corapcioglu, M.Y. (eds) *Fundamentals of Transport Phenomena in Porous Media*. NATO ASI Series, vol 82. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-94-009-6175-3_8

Dawei, Z., Lizhuang, Q., Demin, Z., Baohui, Z., and Lianglin, G. 2020. Unmanned aerial vehicle (UaV) photogrammetry technology for dynamic mining subsidence monitoring and parameter inversion: A case study in China. *IEEE Access*, vol. 8. pp. 16372–16386.

Ferguson, K. C., Rucker, M. L., & Panda, B. B. (2015). Methods for monitoring land subsidence and earth fissures in the Western USA. *Proceedings Of IAHS*, 372, 361-366. <https://doi.org/10.5194/piahs-372-361-2015>

Fernández-Torres, E., Cabral-Cano, E., Solano-Rojas, D., Havazli, E., & Salazar-Tlaczani, L. (2020). Land Subsidence risk maps and InSAR based angular distortion structural vulnerability assessment: an example in Mexico City. *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences*, 382, 583-587.

Galloway, D.L., Burbey, T.J., 2011, Review: regional land subsidence accompanying groundwater extraction: *Hydrogeology Journal*, 19, 1459–1486.

Galloway, D.L., Hoffmann, J., 2007, The application of satellite differential SAR interferometry-derived ground displacements in hydrogeology: *Hydrogeology Journal*, 15, 133–154.

Gasperini, D., Allemand, P., Delacourt, C., & Grandjean, P. (2014). Potential and limitation of UAV for monitoring subsidence in municipal landfills. *International Journal Of Environmental Technology And Management*, 17(1), 1. <https://doi.org/10.1504/ijetm.2014.059456>

General concept. (s/f). Landsubsidence-unesco.org. Recuperado el 23 de noviembre de 2023, de <https://www.landsubsidence-unesco.org/general-concepts/>

Geometrix.mx. ¿Qué es la Red CORS México®? (s/f). Recuperado el 23 de noviembre de 2023, de <https://www.geometrix.mx/wp-content/uploads/2023/08/Red-CORS-Mexico.pdf>

Girardeau-Montaut, D. (s/f). CloudCompare - open source project. Danielgm.net. Recuperado el 24 de noviembre de 2023, de <https://www.danielgm.net/cc/>

Gobierno de la Ciudad de México, Secretaría de obras y servicios. (31 de marzo de 2018) Finaliza demolición de edificio afectado en Tercera Cerrada de Palomares: Sobse. <https://www.obras.cdmx.gob.mx/comunicacion/nota/finaliza-demolicion-de-edificio-afectado-en-tercera-cerrada-de-palomares-sobse>

González de Vallejo, Luis. I., Ferrer, M., Ortuño, L., & Oteo, C. (2002). *Ingeniería Geológica* (1.a ed., Vol. 1). PEARSON EDUCACIÓN, S. A.

https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/5540850/mod_resource/content/1/Livro%202.pdf

Herrera-García, G., Ezquerro, P., Tomás, R., Béjar-Pizarro, M., López-Vinielles, J., Rossi, M., Mateos, R. M., Carreón-Freyre, D., Lambert, J., Teatini, P., Cabral-Cano, E., Erkens, G., Galloway, D., Hung, W.-C., Kakar, N., Sneed, M., Tosi, L., Wang, H., & Ye, S. (2021). Mapping the global threat of land subsidence. *Science* (New York, N.Y.), 371(6524), 34–36. <https://doi.org/10.1126/science.abb8549>

Illades, J. M. L., & Pérez, M. Á. C. (2015). El hundimiento del terreno en la Ciudad de México y sus implicaciones en el sistema de drenaje. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 13(3), 13-18. <https://www.revistatyca.org.mx/index.php/tyca/article/view/805>

Jia, L., Meng, Y., & Pan, Z. (2018). Study on Early Recognition Methods of Cover-Collapse Sinkholes in China. NCKRI SYMPOSIUM 7 15TH SINKHOLE CONFERENCE. <https://doi.org/10.5038/9780991000982.1007>

Lezama, J. L., López-Acosta, N., & Auvinet, G. (2012). Modelación de acuíferos semiconfinados y su aplicación a la evaluación del hundimiento inducido por bombeo de agua en la Ciudad de México. Sociedad Mexicana de Ingeniería Geotécnica, A.C. <https://www.smig.org.mx/biblioteca-digital/busqueda.php?avanzada=0&where-0=Autor&keyword-0=gabriel+auvinet>

López, J. (15 de junio de 2021). Padecen por inundaciones en Iztapalapa, Xochimilco y Tláhuac. *Excelsior*. <https://www.excelsior.com.mx/comunidad/padecen-por-inundaciones-en-iztapalapa-xochimilco-y-tlahuac/1454734>

Meshroom manual — meshroom v2021.0.1 documentation. (s/f). Readthedocs.Io. Recuperado el 24 de noviembre de 2023, de <https://meshroom-manual.readthedocs.io/en/latest/>

Mooser, F., 1975, Historia geológica de la Cuenca de México: Memoria de las Obras del Sistema de Drenaje Profundo del Distrito Federal: Mexico, D.F., Departamento del Distrito Federal, 1, 7–38.

OIHFR - Observatorio Interactivo de Hundimiento y Fracturamiento. (2022, agosto 16). Observatorio Interactivo de Hundimiento y Fracturamiento - OIHFR; Observatorio Interactivo de Hundimiento y Fracturamiento. <https://oihfra.org/oihfra/>

Ortiz-Zamora, D., & Ortega-Guerrero, A. (2007). Origen y evolución de un nuevo lago en la planicie de Chalco: implicaciones de peligro por subsidencia e inundación de áreas urbanas en Valle de Chalco (Estado de México) y Tláhuac (Distrito Federal). DOAJ (DOAJ: Directory Of Open Access Journals). <https://doaj.org/article/4895478778bf4b8c89133e149a83f600>

Ortiz-Zamora, D., & Ortega-Guerrero, A. (2010). Evolution of long-term land subsidence near Mexico City: Review, field investigations, and predictive simulations. *Water Resources Research*, 46(1). <https://doi.org/10.1029/2008wr007398>

Osmanoğlu, B., Dixon, T. H., Wdowinski, S., Cabral-Cano, E., & Jiang, Y. (2011). Mexico City subsidence observed with persistent scatterer InSAR. *International Journal Of Applied Earth Observation And Geoinformation*, 13(1), 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2010.05.009>

Polycam Learn. (2023). LiDAR Mode. Recuperado de <https://learn.poly.cam/lidar-mode>

Prokopovich, N.P. (1979). Genetic classification on land subsidence. En Saxena, S.K. (ed.). *Evaluation and prediction of subsidence*. Proc. Of the Int. Cof., Civil Eng., New York, 389-399.

Razi, P., Sumantyo, J. T. S., Perissin, D., Kuze, H., Chua, M. Y., & Panggabean, G. F. (2018). 3D Land Mapping and Land Deformation Monitoring Using Persistent Scatterer Interferometry (PSI) ALOS PALSAR: Validated by Geodetic GPS and UAV. *IEEE Access*, 6, 12395-12404. <https://doi.org/10.1109/access.2018.2804899>

Rioboo, S.A. DE C.V. Estudio de mecánica de suelos del puente vehicular Muyuguarda y Eje 3 oriente, en México D.F. Eje troncal Metropolitano. (2004). <https://www.obras.cdmx.gob.mx/storage/app/media/uploaded-files/estudio-de-mecanica-de-suelos-puente-vehicular-muyuguarda.pdf>

Santoyo, E., Ovando, E., Mooser, F., León, E., 2005, Síntesis geotécnica de la Cuenca del Valle de México: México D.F., TGC Ediciones, 171 p.

Scott, R. F. (1979). Subsidence A Review. En Saxena, S.K. (ed.). *Evaluation and prediction of subsidence*. Proc. Of the Int. Cof., Civil Eng., New York, 1-25.

SGIRPC Secretaría de Gestión Integral de Riesgos y Protección Civil, Gobierno de la Ciudad de México, 2023. Atlas de Riesgos de la CDMX. México: Gobierno de la Ciudad de México. Recuperado el 24 de noviembre de 2023, de <https://www.atlas.cdmx.gob.mx/datosabiertos2.html>

Solano-Rojas, D., Cabral-Cano, E., Hernández-Espriú, A., Wdowinski, S., DeMets, C., Salazar-Tlaczani, L., Falorni, G., & Bohane, A. (2015). La relación de subsidencia del terreno INSAR-GPS y el abatimiento del nivel estático en pozos de la zona metropolitana de la Ciudad de México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 67(2), 273-283. <https://doi.org/10.18268/bsgm2015v67n2a10>

Sotomayor, M. G. D. (2019). Aplicación de fotogrametría y termografía aérea como herramientas para la gestión de un tramo de río. Universidad de Concepción, Dirección de Postgrado Facultad de Ingeniería Agrícola.

Tomás, R., Herrera, G., Delgado, J., & Peña, F. (2009). Subsistencia del terreno. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, Vol. 17, n. 3. ISSN 1132-9157, pp. 295-302. <http://hdl.handle.net/10045/21700>

Tinkham, W. T., & Swayze, N. C. (2021). Influence of Agisoft Metashape parameters on UAS structure from motion individual tree detection from canopy height models. *Forests*, 12(2), 250. <https://doi.org/10.3390/f12020250>

Vázquez-Sánchez, E., Jaimes-Palomera, R., 1989, *Geología de la Cuenca de México: Geofísica Internacional*, 28, 133–190.

Yeh, M. L., Chou, Y. T., & Yang, L. S. (2016). The Evaluation of GPS techniques for UAV-based Photogrammetry in Urban Area. *The International Archives Of The Photogrammetry, Remote Sensing And Spatial Information Sciences/International Archives Of The Photogrammetry, Remote*

Sensing And Spatial Information Sciences, XLI-B1, 1079-1084.
<https://doi.org/10.5194/isprsarchives-xli-b1-1079-2016>

Yu, H., Lu, X., Cheng, G., & Ge, X. (2011). Detection and volume estimation of mining subsidence based on multi-temporal LiDAR data. *19th International Conference on Geoinformatics* (pp. 1-6). IEEE. <https://doi.org/10.1109/geoinformatics.2011.5980892>

Zhao, X., & Zhu, Q. (2020). Analysis of the surface subsidence induced by sublevel caving based on GPS monitoring and numerical simulation. *Natural Hazards*, 103(3), 3063-3083.
<https://doi.org/10.1007/s11069-020-04119-0>

Zhou, C., Gong, H., Chen, B., Gao, M., Cao, Q., Cao, J., Duan, L., Zuo, J., & Shi, M. (2020). Land Subsidence Response to Different Land Use Types and Water Resource Utilization in Beijing-Tianjin-Hebei, China. *Remote Sensing*, 12(3), 457. <https://doi.org/10.3390/rs12030457>