



El error y la exactitud de las mediciones manuales en los procesos de documentación de monumentos

Error and accuracy of manual measurement in heritage documentation process

*Luis Carlos, Cruz-Ramírez¹
Diana Monserrat Veloz-García²*

^{1,2}Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura, Unidad Tecamachalco, Sección de Estudios de Posgrado e Investigación, Laboratorio de Patrimonio Arquitectónico, Estado de México, México.

¹lcruz@ipn.mx |  <https://orcid.org/0000-0002-3651-4471>

²dvelozg1900@alumno.ipn.mx |  <https://orcid.org/0009-0003-9505-7201>

Recibido: 04/05/2026 Aceptado: 26/06/2026

RESUMEN | En este artículo se buscó conocer que tanto varían las mediciones realizadas con método tradicional manual –con el uso de flexómetro– en relación con las mediciones LiDAR con escáner láser terrestre, en espacios arquitectónicos y sus mobiliarios. Estas dimensiones son evaluadas a partir de mediciones realizadas con Escáner Láser Terrestre (TLS). El registro manual es más económico, requiere únicamente de una cinta métrica. Por otro lado, el sensor LiDAR de un TLS realiza las mediciones a partir del tiempo de vuelo (ToF), estimando las dimensiones con el tiempo que tarda el haz de luz en ir desde el sensor hasta una superficie opaca de rebote de la luz. Este último, está calibrado y utiliza directamente el patrón del metro actual. Como caso de estudio se capturó un espacio interior, utilizado como sala de lectura. Se estimó el error contrastando 307 mediciones realizadas utilizando el método manual tradicional con flexómetro y las mediciones de la nube densa de puntos capturada con un LiDAR. Como resultado se obtuvo un error relativo promedio es de 3.895%. La raíz del error cuadrático medio obtenido fue RMSE (0.062684 m). El alto nivel de exactitud en las mediciones es de utilidad para investigaciones que buscan conocer las deformaciones, desplomes y daños existentes en los edificios históricos. La utilidad de esta investigación radica en proporcionar indicadores paramétricos asociados con la exactitud de las mediciones, para quienes toman decisiones sobre el tipo de medición que es necesaria en función de los requerimientos de documentación o intervención.

PALABRAS CLAVE | Documentación, exactitud, estimación-del-error, medición-manual, nubes-de-puntos, patrimonio-arquitectónico, Terrestrial-Laser-Scanning.

ABSTRACT | This article aimed to determine the extent to which measurements obtained using the traditional manual method —with the use of a tape measure— vary in relation to LiDAR measurements acquired with a terrestrial laser scanner in architectural spaces and their furnishings. These dimensions were evaluated based on measurements obtained through Terrestrial Laser Scanning (TLS). Manual surveying is more economical, requiring only a measuring tape. On the other hand, the LiDAR sensor of a TLS performs measurements based on Time of Flight (ToF), estimating dimensions according to the time it takes for the light beam to travel from the sensor to an opaque reflective surface and back. This system is calibrated and directly uses the current meter standard. As a case study, an interior space used as a reading room was

captured. Error estimation was conducted by comparing 307 measurements obtained using the traditional manual tape-measure method with measurements derived from the dense point cloud captured by LiDAR. The results showed an average relative error of 3.895%. The root mean square error obtained was RMSE (0.062684 m). The high level of accuracy achieved in the measurements is useful for research aimed at identifying deformations, tilting, and existing damage in historic buildings. The significance of this research lies in providing parametric indicators associated with measurement accuracy for decision-makers determining the type of measurement required according to documentation or intervention needs.

KEYWORD | accuracy, architectural-heritage, documentation, error-estimation, manual-measurement, point-cloud, Terrestrial-Laser-Scanning.

Introducción

Las dimensiones de un edificio constituyen parte del conocimiento que caracteriza el espacio y la forma arquitectónica. Cuando el edificio es patrimonial, el conocimiento de sus dimensiones adquiere relevancia para su conservación en el tiempo. Estos trabajos son especialmente realizados en estudios de investigación en historia del arte, en análisis arquitectónico, en estudio de materiales y sus degradaciones, así como en procesos de intervención y monitoreo (Böge y Karabörk, 2020). Por esta razón, las dimensiones son medidas y almacenadas como información en los procesos de documentación de dichos objetos culturales (Gleñ et al., 2019, p. 21), a través de descripciones escritas, fotografías, sketches, proyecciones arquitectónicas y modelos 3D, según el nivel de registro necesario (Lane, 2016).

Al documentar el patrimonio construido se busca almacenar la información relacionada con el espacio patrimonial, la cual tiene el potencial de evidenciar como han sido las actividades sociales, económicas y culturales humanas (Bassetlaw District Council North Nottinghamshire, 2013). Les permite a generaciones en el presente o en el futuro, saber cómo es o cómo fue el edificio en un momento de su historia. Son fundamentales en los procesos de intervención que siguen tendencias históricas, tales como en la restauración histórica o en la reconstrucción *com'era dov'ra* (Rivera-Blanco, 2008). Facilita la recuperación de la forma existente previamente, siempre y cuando este sea uno de los objetivos de intervención (Mohamed, 2019, p. 117). Proporciona la posibilidad de consolidar el monumento con la mínima alteración en sus características geométricas, buscando las propiedades geométricas *originales* o la permanencia de su denominada *autenticidad*. Aunque, el concepto de autenticidad es debatible como magistralmente es discutido por Marconi (2007), quienes persiguen este objetivo, pueden encontrar en la documentación de las dimensiones la oportunidad de conservar lo auténtico del monumento. Esto se debe principalmente a que se le pueden atribuir valores a partir de las dimensiones, porque es una de las características perceptibles de la forma y la comprensión de dichos valores, depende de lo confiable que puedan ser las fuentes de información (UNESCO, 1994).

El problema que existe con los edificios patrimoniales –con excepción principalmente de una cantidad representativa del patrimonio del siglo XX, entre otros– es que estos comúnmente no tienen dimensiones regulares o fáciles de medir. Esto se debe a que (a) fueron construidos en un momento en el que no existían los materiales estandarizados, (b) a que sus acabados estéticos-artísticos –tales como los relieves o molduras en las superficies decoradas– se asemejan a formas naturales, (c) por el estado de deterioro existente en los muros, con partes faltantes o desplomes a causa de la falta de mantenimiento por el paso del tiempo y (d) porque sus ángulos no son rectos en las esquinas (Ozimek et al., 2021, p. 1) –ver como ejemplo, los vestigios en la Villa Adriana (Figura 1)–. Por estas razones, se les califica como construcciones con geometría compleja –termino que debe de interpretarse de forma relativa, ya que en muchas ocasiones dista de asemejarse a la geometría arquitectónica paramétrica contemporánea, como las obras de arquitectos como Kengo Kuma o Bjarke Ingels–.

Aunque existen diferentes niveles de documentación en los monumentos, cada uno con objetivos particulares—que va de nivel uno al nivel cuatro e inicia desde la documentación visual, seguido por la documentación descriptiva, pasando por la documentación analítica hasta llegar a la documentación detallada (Lane, 2016, pp. 25-29)—, debido a la importancia que tiene el patrimonio construido, se busca tener las medidas de estos con la menor cantidad de errores posibles en los trabajos de documentación (Böge y Karabörk, 2020).

En la última década, se ha popularizado el uso de instrumentos y técnicas digitales para la documentación semiautomática¹ de monumentos históricos, por medio de la generación de modelos de nubes de puntos (Wu, Yuan, Tang y Tian, 2023, p. 1). Entre estos instrumentos y técnicas, se pueden mencionar la fotogrametría —de corto alcance (CRP) terrestre o con cámaras aerotransportadas en RPAS— (Castilla et al., 2021; Moyano et al., 2020) y los basados en técnicas LiDAR, tales como: los Escáner Láser Terrestres (TLS) (Kwoczynska, 2016; Lin et al., 2021), los escáneres láser aerotransportados (RPAS con sensores LiDAR), los escáneres láseres móviles —como los SLAM, LiDAR manuales, los teléfonos móviles y las tabletas con sensores LiDAR— (Di Stefano et al., 2021). Estos instrumentos y técnicas han sido la respuesta para lograr mayor precisión² —*precision*— y exactitud³ —*accuracy*— en la captura de dimensiones arquitectónicas sin importar la complejidad geométrica de los edificios, con mejoras en los tiempos de trabajo de campo y reduciendo la exposición al riesgo de las personas que realizan estas actividades.

Figura 1

Muros de vestigios históricos en el complejo arqueológico de la Villa Adriana, Tivoli, Italia.



Nota. Fotografía por L. C. Cruz-Ramírez.

¹ Aunque algunos documentos lo clasifican como automático, en realidad necesita de la ejecución de un operador, lo cual hace que estas herramientas sean semiautomáticas.

² La precisión hace referencia a que tan reproducible es un resultado y que tanto varían diferentes mediciones entre sí.

³ La exactitud indica que tan correcto es una medición con relación al valor en la realidad o valor estándar.

Una interrogante que surge constantemente entre nuevos usuarios, entusiastas e incluso profesionales que desean aplicar tecnología LiDAR en la medición de espacios arquitectónicos, está relacionada con la viabilidad del uso de tecnología LiDAR para el dimensionamiento arquitectónico, considerando sus problemas y ventajas. Al respecto, uno de los puntos de interés está orientada con conocer si los registros tradicionales distan excesivamente de las mediciones con instrumentos semiautomáticos o si el error se puede considerar aceptable dentro de los rangos de precisión y exactitud en el presente. En este contexto, las preguntas de investigación que se plantean en esta investigación son: ¿qué tanto varían las mediciones entre los dos métodos?, ¿qué tan exactas son las mediciones realizadas con el método tradicional de medición manual utilizando flexómetro contrastado con el registro digital con tecnología LiDAR?, o ¿cuánto es el error que se puede existir entre una medición con flexómetro en relación con la medición con LiDAR?

El objetivo de este estudio es conocer el error que puede existir en la medición manual en contraste con la medición con un instrumento LiDAR de alta precisión, como es el TLS. Para esto, se tomó como caso de estudio una sala de lectura, localizada en el cuarto nivel del edificio 2 de la instalación de la Escuela Superior de Ingeniería-Arquitectura (ESIA), Unidad Tecamachalco, del Instituto Politécnico Nacional (IPN). Se realizaron mediciones con flexómetro y con un TLS. Estas medidas luego se analizaron utilizando el método de la raíz del error cuadrático medio –este se desarrolla en la sección de método–.

Es conocido que la medición LiDAR de TLS es la más exacta. El error registrado en los TLS es de milímetros -la desviación estándar de los residuos, en los mejores ajustes de mediciones planas- y la dispersión es de micrómetros con ángulos de incertidumbres de segundos (Muralikrishnan, 2021, p. 2). No obstante, la medición manual sigue siendo una solución más aplicada y de suma utilidad en casi todos los escenarios. Si bien, medir el error consiste en obtener una métrica que describe la diferencia de cuanto se aproxima o se aleja una observación de la realidad, en el patrimonio construido tiene implicaciones en la documentación de la forma y en la confiabilidad del conocimiento que se tiene de los monumentos heredados del pasado. El alto nivel de exactitud en las mediciones es de utilidad para investigaciones que buscan conocer las deformaciones, desplomes y daños existentes en los edificios históricos (Kwoczynska, 2016). Además, la técnica LiDAR no es destructiva (Lin et al., 2021), ya que el único contacto que puede existir es el rebote del haz de luz emitidos por los instrumentos. Por tanto, la utilidad de esta investigación radica en proporcionar indicadores paramétricos asociados con la exactitud de las mediciones, para quienes toman decisiones sobre el tipo de medición que es necesaria en función de los requerimientos de documentación o intervención.

Método manual vs LiDAR

El error se define como la diferencia que existe entre un valor de referencia y una medición. En el análisis del error de muestro se estima la diferencia entre el parámetro de una población y el estadístico de la muestra (Lind et al., 2012, p. 274), para conocer que tanto se aproxima la muestra a la población. En regresiones, el error es la diferencia entre el valor actual y el valor predicho (Barreto et al., 2006, p. 117). La exactitud es la cualidad que tiene un valor de poderse aproximar a un valor de la realidad. En la medida que el error es menor existe mayor exactitud.

El interés por la exactitud de las mediciones no es un problema contemporáneo. En el siglo XVII, ya existían arquitectos preocupados por la exactitud de las mediciones y proporciones de edificios. En la academia de arquitectura francesa se empezaron a cuestionar sobre representatividad que tenían las

mediciones de los edificios y el seguimiento estricto de reglas de proporciones de los edificios del Foro Romano, en estudios de mediciones como los de Desgodetz (1682).

La documentación con la mayor exactitud posible en el patrimonio construido también es una práctica con muchas décadas de evidencias. Este interés se puede observar en los procesos de mediciones tradicionales manuales, en los cuáles para mejorar la exactitud, las medidas deben ser capturadas de manera perpendicular a las superficies del espacio o paralelas a los planos, a una misma altura (Tan, et al, 2023, p. 2). En campo, para reducir el error de incremento de las dimensiones por no medir a la misma altura, es común el uso de mangueras que permitan medir los espacios al mismo nivel. También se miden las diagonales para triangular los espacios y tener una captura formal más cercana a la realidad.

La captura de las dimensiones por métodos directos tradicionales, como es la medición manual en edificios patrimoniales, suele tener una dificultad considerable. Esto se debe principalmente por la necesidad de tener un registro útil en términos de precisión de la forma, el tiempo consumido y el posible riesgo al que están expuestas las personas que lo realizan. Los métodos tradicionales de medición manual –tal como las mediciones realizadas con flexómetro, nivelada con manguera o niveles de burbuja–, son relativamente económicos en cuanto al costo de instrumentos. No obstante, estas mediciones deben ser elaboradas por cuadrillas de técnicos –comúnmente por tres personas a la vez–, que ejecutan trabajos físicamente laboriosos –en ocasiones ponen en riesgo sus vidas, especialmente para capturar las alturas o las dimensiones en espacios que están en condiciones de estabilidad cuestionable por los deterioros en los monumentos–, consumen tiempos representativos en las actividades de campo y están expuestos a errores debido a las manipulaciones manuales (Tan, et al, 2023, p. 2; Ozimek et al., 2021, p. 1; Chun-Yuan et al. 2024, p. 44). Además de estas dificultades, existen casos en donde los contratistas afirman que los monumentos históricos con geometría compleja, medidos con métodos tradicionales carecen de un proceso de documentación integral que incluya todos sus lados, o se concluyen con objetos con dimensiones erróneas (Norin, 2023).

Se conocen algunas ventajas de usar LiDAR en contraste con las mediciones tradicionales manuales. Entre estas, se puede mencionar que se logra una reducción de tiempo de captura de campo (Erturan et al., 2019, p. 8; Cruz-Ramírez et al., 2023) y una mejora en la exactitud en las mediciones (Tang et al., 2010, p. 830; Norin, 2023). Sobre el tiempo de medición, Gleñ et al. (2019) realizó un experimento comparativo de mediciones realizadas con métodos tradicionales y LiDAR en diferentes etapas de la documentación, obteniendo hasta 1.5 veces más tiempo en la etapa de medición de campo. También se conoce que el tiempo promedio para capturar de campo, en baja resolución con un TLS considerando los errores humanos y problemas comunes en campo –como los ajustes del equipo, nivelación, localización de estación de captura, ajuste de targets, entre otros– es de 750 segundos con desviaciones estándares de 276.51 segundos (Cruz-Ramírez et al. 2023).

Se sabe que un instrumento LiDAR mientras esté calibrado, posee exactitud por su método de medición basado en la técnica del *Time of Flight* (ToF), ya que el sensor estima el tiempo de vuelo del haz de luz láser desde que es lanzado hasta que rebota en una superficie (Abdel-Barry, 2011). En el presente, el patrón del metro en el sistema internacional se basa en el tiempo que tarda la luz en viajar en el vacío⁴.

⁴ El patrón del metro actual se define en función de la trayectoria de la luz en el vacío por un intervalo de 1/2999,792,458 segundos.

En una medición con LiDAR, no todo está resuelto. Para implementar los métodos semiautomáticos, hay que resolver varios problemas, tales como: (a) el costo de adquisición o renta de los equipos –los TLS han sido y continúan siendo costosos para muchos contextos económicos (Moyano et al., 2020, p. 2), especialmente en países del cono sur–, (b) las complejidades del procesamiento de los datos –ya que requieren cantidades representativas de tiempo y de personal experimentado en la manipulación de estos modelos–, (c) lograr un grado de simplificación viable en los resultados para poder manipular los modelos (Janus y Ostrogórski, 2022, p. 1) y (d) los esfuerzos significativos para lograr precisión –el manejo del error bajo estándares aceptables–.

La exactitud de la nube de puntos LiDAR depende de un conjunto de factores, que se pueden agrupar en cuatro categorías: (a) los mecanismos del instrumento, (b) factores ambientales, (c) superficie y geometría del espacio y (d) posición del instrumento (Li et al., 2023). De estos factores se derivan al menos los siguientes errores. Los errores del instrumento, a causa de los mecanicismos del escáner –(a) el error por inestabilidad del emisor LiDAR, (b) error de lectura de señal, (c) error de lectura angular, (d) error de alineación de ejes– que se corrigen con la calibración. Los errores por interacción con el entorno, –tales como (e) los errores de captura en las superficies reflejantes y traslúcidas, (f) el error por temperatura y (g) el error por presión atmosférica: las diferencias de 10°C y presiones atmosféricas de 35hPa, producen errores de 1mm/10m (Cosarca et al., 2009)– y la estrategia de captura basado en las superficies y geometrías, así como la estrategia de procesamiento –(h) el error de medición por efecto de la densidad y (i) el error de registro de las nubes de puntos– (Muralikrishnan et al. 2021; Li et al., 2023, Cheng et al. 2018, pp.12-13). Por lo anterior, la exactitud de la nube de puntos depende de varios factores: Cada instrumento tiene su propia precisión. Además, en el modelo final existe cierta dispersión en la ubicación de los puntos en una superficie, fenómeno conocido como dispersión en la nube de puntos –o ruido–. Para tener dimensiones de todos los espacios, se deben de cubrir todas las superficies y evitar oclusiones. En la medida que la superficie de captura no es perpendicular al punto donde se encuentre el TLS, se reduce la densidad de la nube de puntos, lo que tiene implicaciones en la capacidad de poder medir dimensiones en espacios más reducidos y reduce la precisión durante el registro.

El estudio de la medición de la exactitud y precisión de las mediciones es realizado con frecuencia para evaluar diferentes tipos de instrumentos, métodos y técnicas. Es realizado en modelos generados con fotogrametría terrestre, fotogrametría de corto alcance con RPAS –*close-range photogrametry*– (Khanal et al., 2020; Elkhachy 2021), estaciones totales (Mohamed et al., 2019), SLAM (Russhakim et al., 2019), LiDAR de teléfonos móviles (Sirmacek et al, 2014), entre otros. En cuanto al estudio comparativo entre mediciones tradicionales y LiDAR, existen pocos estudios, pero se pueden mencionar las siguientes investigaciones existentes. El contraste entre de mediciones manuales con flexómetro y otras realizadas con SLAM, en 16 diferentes espacios en tres niveles diferentes de un edificio de 45 pisos (Chun-Yuan et al., 2024) obtuvo resultados de RMSE en piso10 ($X= 0.023\text{m}$ y $Y= 0.024\text{ m}$), piso 25 ($X= 0.018$ y $Y= 0.019$) y en piso 38 ($X= 0.022$ y $Y= 0.019\text{ m}$). Erturan et al. (2019) buscaron la exactitud de un LiDAR 2D comparándolas con mediciones manuales, que, a diferencia de los TLS, los LiDAR 2D no tienen precisión milimétrica, pero aun con esta consideración este estudio encontró una exactitud proporcional de 95.7%. Tan et al. (2023) midió la regularidad plana de los muros y la verticalidad y aperturas, para conocer la precisión de un TLS y un distanciómetro, encontrando variaciones entre 77.8%, 88.9 y 95.9% de exactitud. Con base en lo anterior, la hipótesis que se puede construir es que los errores (RMSE) pueden estar en un rango de 2.4 cm y mayores a los 1.8 cm, con errores de proporcionalidad de 4.3%.

Materiales y Métodos

Para dar respuesta a las preguntas de investigación, se realizó un experimento que consistió en realizar dos modelos. Uno a partir de mediciones con el método tradicional de medición manual y otro con la implementación de un instrumento LiDAR (TLS). Las mediciones se realizaron sobre segmentos claramente definidos en el espacio: elementos constructivos y mobiliario existentes, tales como puertas, ventanas, mesas, paredes, pisos, vanos, cancelería y letreros. En total se tomaron 307 mediciones. Posteriormente se estimaron las variaciones de las medidas utilizando el método de la raíz del error cuadrático medio.

Las variables de análisis son las mediciones con dos tipos de métodos: el método tradicional de medición manual y la medición con instrumento LiDAR. Los valores que toman las variables son escalares y sus indicadores son las dimensiones lineales medidas en el sistema internacional de unidades (SI): en metro. La medición que se considera real es la que se considera más cercana a la realidad, en este caso se determinó tomar la medición LiDAR. La razón para considerar esta medición como la real es porque el patrón del metro actual está basado en el tiempo que viaja un haz de luz en el vacío. Para revisar la variación entre las dos mediciones, se utilizó el método de Fisher. Para revisar el error se utilizó una métrica conocida como la raíz del error cuadrático medio (RMSE) (Khanal et al., 2020, p. 1). Enseguida se mencionan los detalles sobre el objeto de estudio, instrumentos, los procedimientos, acuerdos con los participantes y métodos de análisis.

Objeto de estudio

Como objeto de estudio se seleccionó el espacio interior del vestíbulo de la sección de Posgrado de la Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura (ESIA), Unidad Tecamachalco, ubicado en el tercer piso del Edificio número 2 de este plantel educativo del Instituto Politécnico Nacional (IPN) (ver Figura 2). Para este experimento, el espacio debía de contar con las siguientes condiciones: (a) tener acceso sin restricciones para poder realizar las mediciones, verificaciones y correcciones en caso de ser necesario; (b) no estar ocupado al momento de realizar las mediciones para no tener obstrucciones, que se convirtieran en oclusiones o ruido en la nube de puntos, (c) para tener un poco de dificultad similar a la realidad, el espacio debía de tener mobiliario.

Figura 2

Vestíbulo del tercer piso, edificio N°2, de este plantel educativo ESIA TECAMACHALCO, IPN.



Nota. Fotografía por Y. S. Romero Coss.

Instrumentos

Para esta investigación se utilizaron dos instrumentos. El primero fue un escáner láser terrestre, modelo Leica ScanStation C10 (Figura 3, a), el cual tiene una longitud de captura máxima de 300 metros y una mínima de 0.1m (Leica Geosystems, 2025). La precisión de 6 mm a cada 50 m, con una captura angular de 60 micro-radianes y el ruido en la superficie modelada es de 2mm (Leica Geosystems, 2014b). Entre las herramientas de mediciones, el TLS tiene la exactitud de medición más alta porque está basado en un método de captura con posicionamiento estático (Tan et al., 2023). La resolución de captura fue ajustada en el software del instrumento TLS con la configuración de resolución baja, que consiste en capturar el espacio con una densidad de 3,700,098 puntos en 103 segundos. Aunque este instrumento, tiene una cámara integrada esta no fue utilizada en el registro, ya que el único interés fue capturar la geometría del espacio interior sin RGB. Además, se utilizaron targets de 6" que se localizaban según las necesidades de cada estación. Para las mediciones realizadas con el método tradicional de medición manual, se utilizó un flexómetro marca Trupper, modelo Gripper con cinta de 19 mm impresa en ambos lados y con longitud máxima de 5 metros (Figura 3, b).

Figura 3

Instrumentos de medición utilizados.



(a) Escáner Láser Terrestre Leica ScanStation C10



(b) Flexómetro Trupper Gripper de 5m con cinta de 19mm

Participantes

En cuanto al proceso de monitoreo de las mediciones, los autores estuvieron presentes en todo el proceso de medición. La captura LiDAR fue realizada por la coautora utilizando únicamente el TLS, sin el uso de targets. El registro de la nube de puntos se realizó de manera manual por medio de la selección de tres pares de puntos del ambiente natural, controlando el error de registro por debajo de los 0.025m. La captura de campo de dimensiones por el método manual-tradicional fue realizada por dos personas. Un colaborador tomó las medidas, y la segunda persona -coautora de este estudio- las documentó personalmente los datos medidos. Como estándar ético, se puede añadir que las medidas se tomaron directamente en campo, sin alterar las mediciones. Cuando existían dudas sobre las medidas, se realizaron las verificaciones pertinentes, realizando nuevamente la medición para verificar la información.

Estimación de la muestra de mediciones

Aunque el modelo de nubes de puntos permite dimensionar una cantidad representativa de dimensiones -decenas de miles o millones de segmentos-, considerando que las medidas que se toman en un levantamiento en un escenario real son de elementos que con excepción de las grietas no se limitan a un par de milímetros y que describen las dimensiones del espacio u objetos existentes, se planteó un escenario de una población de mil quinientas dimensiones. Como se verá posteriormente, en un levantamiento de un espacio con estas características se tiene un número menor de medidas. Basado en una población finita

N=1,500, se estimó la muestra, con los siguientes datos NC = 95%, z= 1.96, E=5%, p=.5, q=.5 y N=1,500. El valor de la muestra (n) para este escenario es de n = 306 dimensiones (ver Ecuación 1). Con base en este resultado, se capturaron 307 segmentos.

$$n = \frac{Npq(z)^2}{pq(z)^2 + (N - 1)E^2} \tag{Ecuación 1}$$

Procedimientos

En el espacio antes mencionado, se realizaron mediciones implementando dos instrumentos distintos: (1) la medición física con flexómetro y (b) la obtención de medidas digitales a partir de una nube de puntos generada mediante un escaneo con tecnología LiDAR. Se procedió a realizar la captura LiDAR del vestíbulo con el escáner láser terrestre. Una sola escena de captura no es suficiente por las oclusiones que se pueden presentar, así que para mejorar la densidad de las nubes se realizaron tres estaciones de captura con TLS. Estos archivos se obtuvieron en formato BIN, nativo de Leica el cual fue leído en el software Cyclone, software oficial Leica Geosystems (2014a). Partiendo del formato BIN, se transformaron los archivos individuales a un formato estándar de *American Society for Test and Materials* (ASTM) A2807: el formato extensión E57 (ASTM, 2026). Una vez en E57 se registró digitalmente en CloudCompare (EDF, 2024), software libre de procesamiento de nubes de puntos. Todos los pares de estaciones digitales se registraron considerando como parámetro de tolerancia o error máximo de registro aceptable, 0.025m. Posteriormente, el archivo final con todas las partes registradas se exportó de E57 a RCP en Autodesk ReCap Educativo 2024 (Autodesk, 2023), para visualizar el espacio completo y realizar las mediciones digitales (Figura 4). Con la densidad de la nube de puntos y la muestra calculada, se localizaron de manera aleatoria simple no estratificada un total de 307 segmentos al azar y se realizaron las respectivas mediciones digitales. Estos datos se documentaron en una tabla, de una hoja de cálculo en MS Excel (Microsoft, 2025) con el fin de poder realizar posteriormente una comparación con los datos medidos manualmente. El proceso fue ejecutado por dos participantes.

Con base en la muestra, y las dimensiones medidas en la nube de puntos antes capturada y registrada, se procedió a realizar la medición tradicional manual con flexómetro en el espacio físico. Se tomaron las medidas en el espacio físico, de los mismos 307 segmentos obtenidos previamente en la nube de puntos. Las distancias fueron capturadas por observación directa en el sitio. Los datos fueron documentados directamente sobre una fotografía digital del espacio u objeto con el uso de una *tablet*.

Figura 4
Vestíbulo del caso de estudio capturado con TLS.



Nota. Visualización en Autodesk ReCap.

Aunque no se realizaron manipulaciones a las variables primarias, si se controlaron algunas variables secundarias –tales como la precisión de las mediciones manuales, variaciones de temperatura y de presión, oclusiones en las superficies, representatividad de observaciones con una muestra probabilística, errores de registro manual con targets-point–, con estrategias de captura. Por ejemplo, en cuanto a las mediciones manuales, fueron realizadas con dos personas que pudieron verificar las medidas, en un espacio, que además es de fácil acceso para la verificación de datos. Toda la captura con TLS se realizó en un tiempo promedio de 15 minutos, en un solo espacio –el vestíbulo antes descrito–, para reducir variaciones de temperatura y evitar variaciones de presión. Se realizaron 3 capturas LiDAR en el espacio para reducir las oclusiones y aumentar la densidad de puntos. Se estimó el error de muestreo para tener una muestra probabilística. Se controló el error de registro en valores menores a 0.025m, para que este no tuviera repercusiones en el modelo final.

Métodos de análisis

Análisis para dos muestras dependientes no-paramétrica: Método de Wilcoxon

Al comparar las mediciones realizadas con dos métodos diferentes, donde se tienen mediciones de los mismos segmentos, el problema se puede clasificar como el análisis de datos de dos muestras dependientes o relacionadas. Al ser los datos escalares, se puede realizar un análisis con la Prueba *t de student*, si se cumplen los criterios de parametrización. Uno de los criterios más importantes, es que las muestras deben de tener distribuciones normales. Cuando no se cumple este criterio de parametricidad, la opción es analizar los datos por el método no-paramétrico de Wilcoxon.

Por lo anterior, la primera prueba que se realizó fue la prueba para conocer si las dos muestras siguen distribuciones normales. Se utilizó la prueba Shapiro-Wilks en Rstudio. En este análisis, la hipótesis nula (H_0) es que los datos si siguen una distribución normal. La hipótesis alternativa es que los datos no siguen la distribución normal. Se calcula el estadístico W , si el p-value es menor que la significancia α (0.05) ($p\text{-value} < 0.05$) se rechaza la H_0 y se concluye que los datos no se ajustan a la distribución normal. Por el contrario, si el $p\text{-value} > 0.05$, entonces se acepta la H_0 y se concluye que la distribución es normal. Como posteriormente se muestra en la sección de resultados, las muestras no siguen una distribución normal.

Luego se procedió a realizar el análisis de Wilcoxon que sigue los siguientes criterios. Se espera encontrar que las medidas realizadas con TLS son probabilísticamente diferentes a las medidas realizadas con flexómetro. Se requiere tener el mismo número de poblaciones en cada una de las muestras: n_{tls} (307) – n_{tls} : muestra de mediciones realizadas en la nube de puntos capturadas con el TLS– y n_f (307) – n_f : muestra de las mediciones capturadas con flexómetro–. La hipótesis nula (H_0) para una prueba de Wilcoxon establece que los datos pareados tienen diferencias que provienen de una población una mediana igual a cero, es decir las mediciones con TLS y con flexómetro no difieren significativamente en sus mediciones. La hipótesis alternativa (H_1) indica que si difieren las mediciones realizadas con los dos métodos estudiados. El nivel de significación seleccionado para esta prueba es α (0.01). El valor estadístico para encontrar en RStudio es V , con su respectivo p-value. La regla de decisión es que se rechaza H_0 y se acepta H_1 , si $p\text{-value} < 0.01$.

Estimación del error

Para medir el error, se identificaron estrategias de medición de exactitud desarrolladas previamente y existentes en la literatura, tales como Congalton et al. (2008), Gleñ et al. (2019), Khanal et al. (2020, p.

1), Chun-Yuan et al. (2024) y Tam (2023). Se estimaron dos métricas: el error promedio y el RMSE. Para poder calcular el error relativo la ecuación 3. Finalmente, para tener una medición comparable con otros estudios se procedió a estimar la métrica RMSE con la ecuación 4. Esta métrica es utilizada en el análisis de regresiones, para medir el error, también sirve para evaluar la diferencia normalizada entre los valores observados y los predichos. Los valores observados corresponden a la realidad, y los predichos corresponden al modelo de regresión o a la medición realizada.

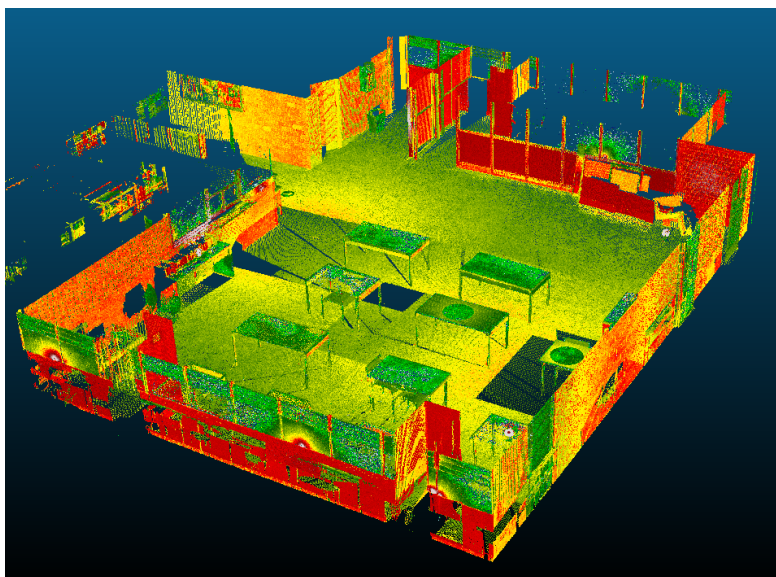
$$Error\ relativo\ promedio\ (\%) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{|X_{tlsi} - X_{fi}|}{X_{fi}} \times 100 \right) \tag{Ecuación 2}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_{tlsi} - X_{fi})^2} \tag{Ecuación 3}$$

Resultados

Las mediciones ejecutadas con el método tradicional de medición manual fueron capturadas por observación directa en el sitio. Estas se realizaron en cuatro horas en una sola sesión de campo, con dos participantes. En contraste, el levantamiento LiDAR geométrico sin RGB, con 3 estaciones de captura duró cerca de 15 minutos considerando el traslado del instrumento (ver Figura 5). Las mediciones con flexómetro se anotaron en un sketch representativo de la planta elaborada a mano que representa el espacio con fines de tener mediciones generales. Asimismo, se documentaron las dimensiones en fotografías relacionadas (Figura 6). Las medidas fueron tomadas en función de los elementos constructivos y mobiliario existentes: puertas, ventanas, mesas, paredes, pisos, vanos, cancelería y letreros (Figura 6). Estas mediciones se compararon para estimar el error.

Figura 5
El modelo final obtenido desde la captura LiDAR, basada en 3 estaciones de captura.



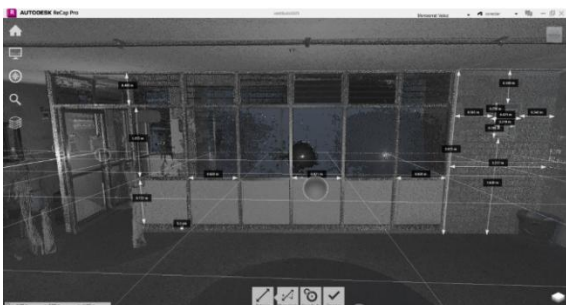
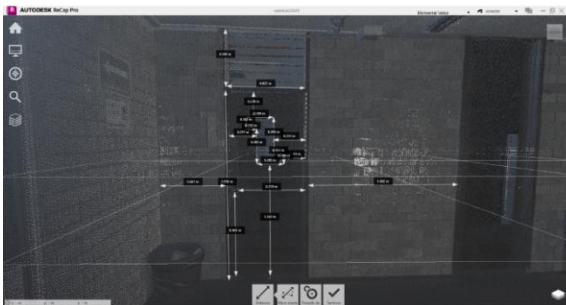
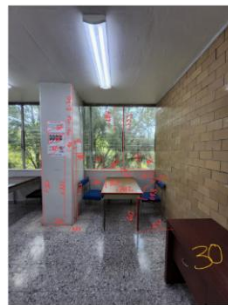
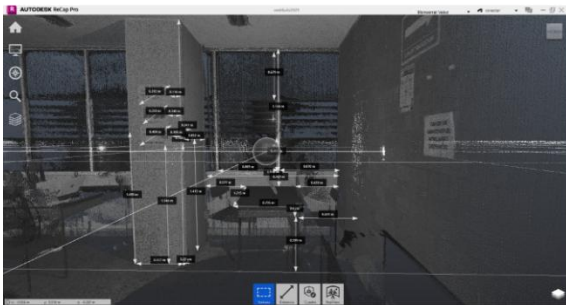
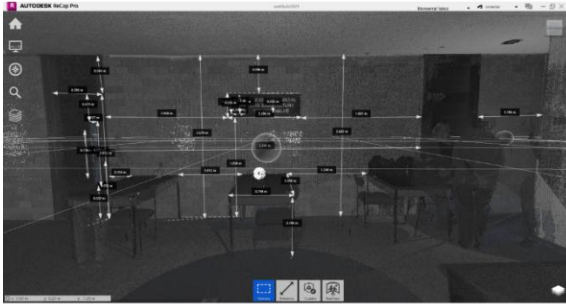
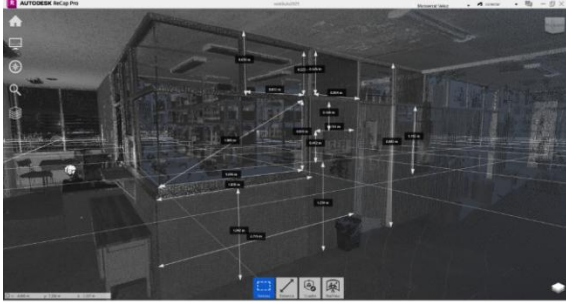
Nota. Modelo elaborado por Diana Monserrat Veloz-García.

Figura 6

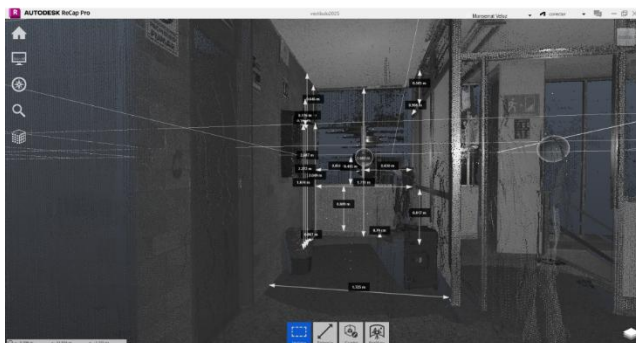
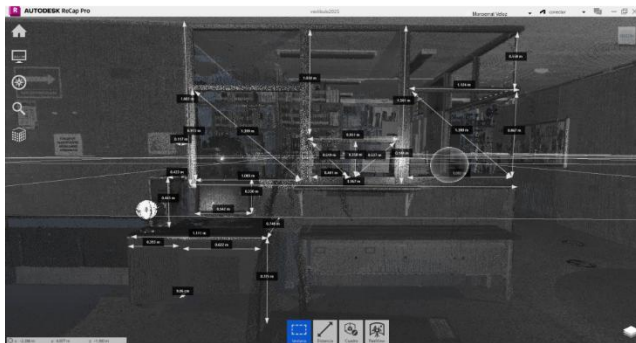
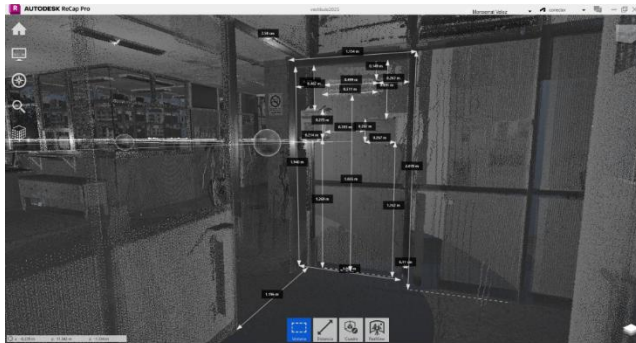
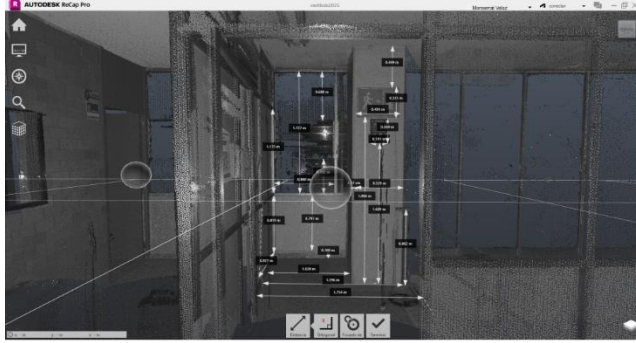
Captura de dimensiones del modelo de nube de puntos a la izquierda y captura real de campo a la derecha.



continua...



continua...



Nota. Mediciones elaboradas por Adrián Herrera-Flores y Diana Monserrat Veloz-García.

Luego de realizar el experimento y analizar los datos se encontraron los siguientes resultados. Primero, en cuanto a la descripción de los datos se pueden mencionar las siguientes características de las muestras. Para las mediciones con flexómetro, los segmentos más cortos medidos fueron de 1.8 cm, los

segmentos más grandes fueron de 5.26 m, la dimensión media fue de 59.4 cm. Las medias encontradas fueron \bar{x}_{tls} (0.8494) y \bar{x}_f (0.8495) y las varianzas s^2_{tls} (0.6631) y s^2_f (0.6441).

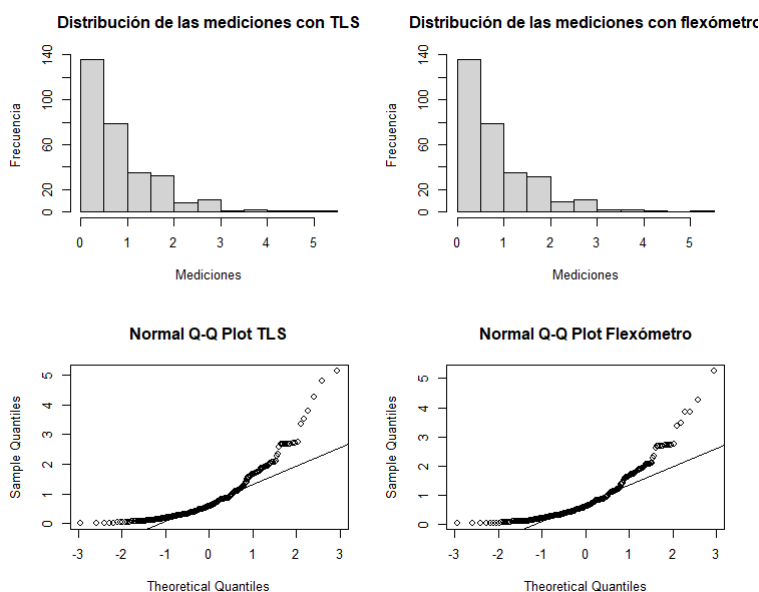
Como resultado del análisis de normalidad con la prueba de Shapiro-Wilks, se obtuvieron los siguientes resultados. Para la muestra del TLS, se obtuvo el parámetro W_{tls} (0.81327) y un p-value $< 2.2e-16$. Para la muestra de mediciones con flexómetro, se encontró el parámetro W_f (0.83262) y un p-value $< 2.2e-16$. En ambos casos, el p-value < 0.05 , por lo que se rechaza la H_0 y se concluye que los datos no se ajustan a la distribución normal. En la Figura 7, se muestra un histograma y un diagrama cuantilar normal para observar la distribución de los datos.

El valor V encontrado es V (15296), con un p-value (3.464e-05), lo que indica que se rechaza la H_0 y se acepta H_i , donde se afirma que si existe una diferencia significativa entre los dos métodos de medición: el TLS y el flexómetro. Esto confirma la exactitud lograda con LiDAR sobre las lograda con flexómetro.

Luego de realizar todas las mediciones se obtuvieron los siguientes resultados en cuanto a la estimación del error: (a) el error relativo promedio es de 3.895% y (b) para finalizar se encontró como resultado un RMSE (0.062684m).

Figura 7

Histograma de frecuencia y gráfica cuantilar normal (QQ-Plot) para cada una de las muestras de medición.



Discusión

En cuanto a los resultados se puede hacer mención del hecho de que las variaciones encontradas en las dos muestras tienen varianzas diferentes. El análisis de Wilcoxon indica que si son diferentes las medianas entre las dos muestras y que existe una diferencia probabilística entre las muestras relacionadas. Esto muestra que probabilísticamente si existe diferencia entre las observaciones y que las mediciones realizadas con flexómetro son diferentes a las realizadas sobre la nube de puntos del registro LiDAR, con base en las observaciones realizadas. Las variaciones son mayores cuando se mide con flexómetro.

El error estándar nos refleja un error representativo de 6.2684 cm. Este error encontrado es superior al observado en otros estudios identificados en la literatura, tal cual es el caso de Chen-Yuan et al. (2024) que registró como error máximo 0.024m. Esta diferencia entre estudios es de esperarse y se debe al hecho de que como humanos, nuestras medidas varían y no están calibradas como es el caso de los instrumentos. La exactitud en las mediciones puede variar, según sea el espacio, condiciones ambientales, estados de ánimo, horas continuas trabajando, cansancio, entre otros factores. El error humano es natural en el proceso de toma de mediciones. Es necesario añadir que, en un trabajo de medición de las dimensiones de un edificio se suele realizar por acumuladas, donde el error se incrementa por acumulación del mismo en las mediciones estimadas.

Se debe tener en cuenta que la resolución del escaneo varía por la saturación, la visibilidad u oclusión de puntos en algunas superficies. En las zonas donde hay menos saturación es menos precisa la medición. En segmentos donde la saturación de puntos es alta, es más complicada la visibilidad haciendo que el proceso de localización de los segmentos sea más difícil, sobre todo en la identificación de dónde empieza y dónde termina cada segmento.

Así como la medición digital tiene un rango de error, la medición manual también tiene un margen de error, sobre todo en elementos altos, demasiado largos o de difícil acceso, dado que el flexómetro utilizado solo tenía una longitud máxima de 5 metros. Si se utilizan cintas flexibles estas tienden al error por elongación o por la catenaria que se forma al sostenerla en los extremos de los segmentos medidos. Los resultados encontrados podrían tener mayor variación en espacios con superficies y geometrías más complejas, que incluyan relieves, molduras y decoraciones arquitectónicas, que suelen ser comunes en el patrimonio construido.

Conclusiones

Al inicio de este estudio se plantearon tres preguntas, que se contestaron obteniendo las siguientes respuestas: (a) si existe variación entre la medición tradicional y la medición LiDAR, (b) son probabilísticamente diferentes las dos muestras de poblacionales, (c) la exactitud de la medición con flexómetro es de un 96.105%, (d) con un error relativo (3.895%) y (e) el error que puede existir en mediciones con flexómetro puede llegar a ser de 6.26cm -RMSE (0.062684 m)-. Todo lo anterior controlando variables como la densidad de la nube de puntos, el error de registro, corrigiendo medidas donde se identificaron valores atípicos representativos en una primera revisión. Se comprobó que la hipótesis planteada fue hasta cierto punto conservadora, ya que los errores encontrados fueron mayores a los observados en la literatura. Por el contrario, el error proporcional estimado en esta investigación fue menor al encontrado en la literatura.

Conocer las mediciones en la arquitectura patrimonial es relevante para la conservación de monumentos, por todas las implicaciones que tiene la documentación de las mediciones de un edificio. Por otro, lado es de utilidad en el monitoreo de algunos tipos de daños, tal como se mencionó en la sección introductoria.

Aunque se conoce que la medición LiDAR, especialmente la medición con TLS es de la más precisa, en este estudio se buscó conocer los valores paramétricos que indicaran las variaciones entre las mediciones LiDAR y las realizadas tradicionalmente con flexómetro. Esto es de utilidad, por un lado, en la toma de decisiones sobre el método a utilizar cuando se requieran altos niveles de exactitud. También es útil conocer este resultado aun cuando se seguirán haciendo las mediciones tradicionales con el

conocimiento de que dichos valores se incrementan de manera representativa en edificios con geometrías más complejas que la analizada en este estudio.

Las investigaciones que se pueden derivar de este estudio son: (a) con las mediciones existentes, evaluar la exactitud de modelo fotogramétricos, (b) realizar pruebas de fotogrametría low-cost para mejorar la exactitud de capturas considerando el uso de smartphones de gama baja, (c) estimar las variaciones de la exactitud por diferencia de presión y temperatura en el uso de TLS, (d) queda por estudiar las implicaciones en mediciones de segmentos como grietas y fracturas, (e) medir el error en espacios con geometrías más irregulares y complejas, así como (f) replicar este estudio en un monumento histórico complejo, ya que los resultados acá presentados corresponden a un caso de estudio controlado.

Abreviaturas

CRP = Close-Range Photogrammetry = Fotogrametría de corto alcance.

LASER: Laser (Láser) = Light Amplification by Stimulated Emission and Radiation = Amplificación de luz por emisión estimulada de radiación.

LiDAR: Light Detection and Ranging = Detección y medición de luz.

RMSE: Root Mean Squared Error = La raíz del error cuadrático medio

RPAS: Remotely Piloted Aircraft Systems = Sistemas de Aeronaves Pilotadas a Distancia

SLAM: Simultaneous Localization and Mapping = Mapeo y Localización Simultanea

TLS: Terrestrial Laser Scanner = Escáner Láser Terrestre

UAV: Unmanned Aerial Vehicle = Vehículo aéreo no tripulado.

Contribución de Autoría CRediT

- › **Conceptualización:** Luis Carlos Cruz-Ramírez.
- › **Metodología:** Luis Carlos Cruz-Ramírez.
- › **Validación:** Luis Carlos Cruz-Ramírez.
- › **Análisis formal:** Luis Carlos Cruz-Ramírez.
- › **Investigación:** Luis Carlos Cruz-Ramírez.
- › **Recolección de datos:** Diana Monserrat Veloz-García, Adrián Herrera-Flores.
- › **Fotografías:** Diana Monserrat Veloz-García, Adrián Herrera-Flores, Yessica Samantha Romero-Coss y Luis Carlos Cruz-Ramírez.
- › **Recursos:** Instituto Politécnico Nacional.
- › **Curación de datos:** Luis Carlos Cruz-Ramírez.
- › **Redacción - Borrador Original:** Luis Carlos Cruz-Ramírez.
- › **Redacción - Revisión y Edición:** Luis Carlos Cruz-Ramírez y Diana Monserrat Veloz-García.
- › **Supervisión:** Luis Carlos Cruz-Ramírez y Diana Monserrat Veloz-García.
- › **Administración del proyecto:** Luis Carlos Cruz-Ramírez.
- › **Adquisición de fondos:** Luis Carlos Cruz-Ramírez.

Declaratoria de uso de inteligencia artificial en este documento

Los autores declaran que no usaron herramientas de inteligencia artificial (IA) para generar el contenido en este documento.

Declaración de intereses contrapuestos

Los autores declaran que no existe ningún conflicto de interés, financiero o no financiero que pudieran haber influido en los resultados, la interpretación de los datos o la elaboración del presente artículo. Se declara que no existe un vínculo comercial con las marcas y distribuidores de los equipos utilizados.

Tampoco existe vínculo comercial, financiero o personal que pueda afectar al trabajo o institución editora. La fuente de financiamiento para la elaboración de este artículo proviene del proyecto de investigación IPN SAPPI 2025-2026 con registro SIP 20251349 y SIP 20260771.

Agradecimientos

Esta investigación fue elaborada en el marco del proyecto de investigación IPN SAPPI 2025-2026 con registro SIP 20260771. Agradecimientos a Adrián Herrera-Flores por colaborar con el registro de campo para la elaboración de este estudio.

Referencias

- Abdel-Bary Ebrahim, M. (2011). 3D laser scanners: History, applications and future. Assiut, Egypt: Assiut University.
- American Society for Test and Materials. (2026). ASTM E2807-11(2019). Standard Specification for 3D Imaging Data Exchange, Version 1.0. <https://doi.org/10.1520/E2807-11R19>
- Autodesk. (2023). *Autodesk ReCap Educational Version (v2024)* [Software].
- Barreto, H., Howland, F. (2006). *Introductory Econometrics Using Monte Carlo Simulation with Microsoft Excel*. Cambridge University Press.
- Bassetlaw District Council North Nottinghamshire. (2013). *A guide to heritage asset recording*. <https://www.bassetlaw.gov.uk/planning-and-building-control/planning-policy/conservation-and-heritage/guidance-and-useful-links/guidance-and-advice-documents-for-conservation/a-guide-to-heritage-asset-recording/>
- Böge, S., & Karabörk, H. (2020). Integration of Different Methods for Architectural Survey of Historical and Cultural Heritages. *Turkish Journal of Geosciences*, 1 (2), 53-62. <https://izlik.org/JA83HL37HM>
- Castilla, F. J., Ramón, A., Adán, A., Trenado, A., & Fuentes, D. (2021). 3D sensor-fusion for the documentation of rural heritage buildings. *Remote Sensing*, 13 (7), 1337. <https://doi.org/10.3390/rs13071337>
- Chun-Yuan, A. Yong, Mohd Ariff, M. F., Omar, A. H., & Mat Amim, Z. (2024). Comparison of As-Built Surveys Using Handheld Laser Scanner and Conventional Method. *Journal of Advanced Geospatial Science & Technology*, 4 (1), 43-64. <https://doi.org/10.11113/jagst.v4n1.84>
- Congalton, R. G., Green, Kass. (2008). *Assessing the Accuracy of Remotely Sensed Data. Principles and Practices (Second Edition)*. CRC Press.
- Cosarca, C., Jocea, A., & Savu, A. (2009). Analysis of error sources in Terrestrial Laser Scanning. *J Geod Cadaster*, 11, 115-124.
- Cruz-Ramírez, L. C., Alejo-García, V.H., Camargo-Suárez, E. A. E., Zárate-Martínez, J. F. (2023). Variaciones en los tiempos de captura en la elaboración de modelos de nubes de puntos con Escáner Láser Terrestre por condiciones de campo. *Arquitectura +*, 8 (16), 54-69. DOI: <https://doi.org/10.5377/arquitectura.v8i16.17153>
- Desgodetz, A. (1682). *Les edifices antiques de Rome / dessinés et mesurés tres exactement par Antoine Desgodetz architecte*. (Fac-similé de l'édition de 1682). https://archive.org/details/gri_33125012870297/page/132/mode/2up
<https://bibliotecadigital.museodelprado.es/pradobib/es/media/group/1002399.do>

- Di Stefano, F., Chiappini, S., Gorreja, A., Balestra, M., & Pierdicca, R. (2021). Mobile 3D scan LiDAR: A literature review. *Geomatics, natural hazards and risk*, 12 (1), 2387-2429. <https://doi.org/10.1080/19475705.2021.1964617>
- Électricité de France (EDF). (2024). *CloudCompare (2.13)* [Software]. Obtenido de www.cloudcompare.org
- Elkhrachy, I. (2021). Accuracy assessment of low-cost unmanned aerial vehicle (UAV) photogrammetry. *Alexandria Engineering Journal*, 60(6), 5579-5590.
- Erturan, A. M., Durdu, A., & Erturan, E. M. (2019). The use of LIDAR technology in architectural offices. *European Journal of Engineering Science and Technology*. <https://gcris.ktun.edu.tr/bitstream/20.500.13091/8430/1/msetconf-4-114.pdf>
- Gleń, P., & Krupa, K. (2019). Comparative analysis of the inventory process using manual measurements and laser scanning. *Budownictwo i Architektura*, 18 (2), 021-030. <https://doi.org/10.35784/bud-arch.552>
- Janus, J., & Ostrogórski, P. (2022). Underground Mine Tunnel Modelling Using Laser Scan Data in Relation to Manual Geometry Measurements. *Energies*, 15 (7), 2537. <https://doi.org/10.3390/en15072537>
- Khanal, M., Hasan, M., Sterbentz, N., Johnson, R., & Weatherly, J. (2020). Accuracy comparison of aerial lidar, mobile-terrestrial lidar, and UAV photogrammetric capture data elevations over different terrain types. *Infrastructures*, 5(8), 65. <https://www.mdpi.com/2412-3811/5/8/65>
- Kwoczynska, B., Litwin, U., Piech, I., Obirek, P., & Sledz, J. (2016). The use of terrestrial laser scanning in surveying historic buildings. In *2016 Baltic Geodetic Congress (BGC Geomatics)*, 263-268. IEEE. <https://doi.org/10.1109/BGC.Geomatics.2016.54>
- Lane, R. (2016). *Understanding Historic Buildings. A Guide to Good Recording Practices*. Historic England. <https://historicengland.org.uk/images-books/publications/understanding-historic-buildings/heag099-understanding-historic-buildings/>
- Leica Geosystems. (2014a). *Cyclone 9.0* [Software].
- Leica Geosystems. (2025). *Leica ScanStation C10*. Obtenido de Leica ScanStation C10: <https://cpec.leica-geosystems.com/es/producto/leica-scanstation-c10/>
- Leica Geosystems. (2014b). *Leica Scan Station C10. El escáner láser todo en uno para cualquier aplicación*. https://www.ecomexico.net/uploads/files/20140425-8c2ad_ScanStationC10_Specs_esp.pdf?srsltid=AfmBOorEu2zBomgaDWP2hsMilAOSvogR2nzENI8ue85MhVjMowyodYkh
- Lin, G.; Giordano, A.; Sang, K.; Stendardo, L.; Yang, X. (2021). Application of Territorial Laser Scanning in 3D Modeling of Traditional Village: A Case Study of Fenghuang Village in China. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 10 (11), 770. <https://doi.org/10.3390/ijgi10110770>
- Lind, D., Marchal, W. D., Wathen, S. A. (2012). *Estadística aplicada a los negocios y la economía*, (15va edición). México: McGrawHill
- Marconi, P. (1997). La restauración arquitectónica en Italia, hoy. *Loggia, Arquitectura & Restauración*, (3), 8. <https://doi.org/10.4995/loggia.1997.5713>
- Mohamed, M. A., Shaker, I. F., Ragab, A. F., & Mogahed, Y. M. (2019). Accuracy assessment of terrestrial laser scanner in heritage documentation. *Int. J. Eng. Adv. Technol*, 8, 117-123.

- Moyano, J., Nieto-Julián, J. E., Bienvenido-Huertas, D., & Marín-García, D. (2020). Validation of close-range photogrammetry for architectural and archaeological heritage: Analysis of point density and 3D mesh geometry. *Remote sensing*, 12 (21), 3571. <https://doi.org/10.3390/rs12213571>
- Muralikrishnan, B. (2021). Performance evaluation of terrestrial laser scanners—A review. *Measurement Science and Technology*, 32 (7), 072001. <https://doi.org/10.1088/1361-6501/abdae3>
- Neter, J., Wasserman, W., Whitmore, G. A. (1973/1978). *Fundamentos de estadística para negocios y economía*. México: Compañía Editorial Continental (CECSA).
- Norin, V. (2023). Measurements of building structures. *E3S Web of Conferences*, 389, 06008. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202338906008>
- Ozimek, A., Ozimek, P., Skabek, K., & Łabędź, P. (2021). Digital modelling and accuracy verification of a complex architectural object based on photogrammetric reconstruction. *Buildings*, 11 (5), 206. <https://doi.org/10.3390/buildings11050206>
- Rivera-Blanco, Javier. (2008). *De varia restauratione: teoría e historia de la restauración arquitectónica*. Abada Editores.
- Sirmacek, B., & Lindenbergh, R. (2014). Accuracy assessment of building point clouds automatically generated from iphone images. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 40, 547-552. <https://isprs-archives.copernicus.org/articles/XL-5/547/2014/isprsarchives-XL-5-547-2014.pdf>
- Tam, A. (2023). *Deep Learning with PyTorch. Learn Basic Deep Learning with Minimal Code in PyTorch 2.0*. Machine Learning Mastery.
- Tan, Y., Liu, X., Jin, S., Wang, Q., Wang, D., & Xie, X. (2023). A terrestrial laser scanning-based method for indoor geometric quality measurement. *Remote Sensing*, 16 (1), 59. <https://doi.org/10.3390/rs16010059>
- Tang, P., Huber, D., Akinci, B., Lipman, R., & Lytle, A. (2010). Automatic reconstruction of as-built building information models from laser-scanned point clouds: A review of related techniques. *Automation in Construction*, 19 (7), 829-843. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2010.06.007>
- United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization [UNESCO]. (1994). *Nara document on Authenticity*. <https://whc.unesco.org/archive/nara94.htm>
- Wu, C.; Yuan, Y.; Tang, Y.; Tian, B. (2022). *Application of Terrestrial Laser Scanning (TLS) in the Architecture, Engineering and Construction (AEC) Industry*. *Sensors*, 22, 265. <https://doi.org/10.3390/s22010265>