



Modelos de nubes de puntos con Escáner Láser Terrestre (TLS) aplicado en el registro del patrimonio construido: Implicaciones del flujo de trabajo en la calidad de los resultados

Point cloud models with Terrestrial Laser Scanner (TLS) applied to recording built heritage: Workflow implication in results quality

Cruz-Ramírez, Luis Carlos¹

Uribe-Piedras, Valentín²

Zárate-Martínez, Jorge Fernando³

^{1,2,3}Laboratorio de Posgrado, Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura, Unidad Tecamachalco, Instituto politécnico Nacional, Ciudad de México, México.

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

²vuribep1400@alumno.ipn.mx | <https://orcid.org/0009-0007-1133-0979>

³abcenteringles@gmail.com

Recibido el 28 de abril del 2023, aprobado el 14 de junio del 2023



RESUMEN | Las nubes de puntos son modelos matemáticos los cuales usan coordenadas espaciales (XYZ) que representan el espacio físico construido. En la última década, han sido ampliamente aplicados para el registro del patrimonio construido, porque entre sus beneficios este tipo de registro permite la captura en alto nivel de detalle geométrico, especialmente cuando es realizada con un escáner láser terrestre (TLS). Sin embargo, los resultados pueden presentar variaciones en la precisión en función de los procesos que se siguen. El objetivo de este artículo es analizar el proceso de captura del dimensionamiento de edificios con el uso de TLS, para luego explicar cómo algunas partes del flujo de trabajo pueden mejorar o afectar los modelos de nubes de puntos. Los resultados de este estudio son de utilidad para futuros proyectos de registros de TLS, debido a que presentan las consideraciones principales a tomar en cuenta y así reducir los errores y mejorar los modelos de nubes de puntos.

Palabras clave | Documentación, escáner-láser, modelos, nubes-de-puntos, patrimonio

ABSTRACT | Points-Cloud are mathematical models which use spatial coordinate (XYZ) that represent the built physical space. In the last decade, point-cloud has been widely applied to built heritage register, because among its benefit this type of registration allows capture a high level of geometric detail, especially when it is performed with Terrestrial Laser Scanner (TLS). However, results can present variations in precision values in function of the process that is taken. The aim of this paper is to analyze the process of building measurement capture with the use of TLS to explain how some parts of the workflow can improve or affect points-cloud models. The results of this study are useful to future projects of TLS registration, due to the fact that it presents the main consideration to be taken into account and thus reduce errors to improve points-cloud models.

KEYWORDS | Cloud-Point, documentation, heritage, laser-scanner, modelling.

1. Introducción

Un modelo es una representación de un objeto, fenómeno o proceso de la realidad que suele ser de interés para el estudio de las ciencias (Cellucci, 2016, p. 95). Existen modelos verbales, gráficos, matemáticos y físicos. Por su naturaleza, los modelos son de utilidad para el desarrollo de las ciencias. Se emplean para explicar fenómenos, para experimentar y comprobar hipótesis. En los estudios de arquitectura, los modelos comúnmente se utilizan para expresar ideas de diseño y anticipar lo que será un edificio. Además, pueden ser de utilidad para representar la arquitectura existente, para realizar simulaciones de fenómenos mecánicos y experimentos que indiquen como mejorar la estabilidad o el confort. Particularmente, las nubes de puntos son modelos matemáticos que contienen variables en las que se almacenan datos relacionados con las coordenadas espaciales (XYZ) (Barber, 2006, p. 36) y colores RGB de las superficies que captura el instrumento (Edl et al., 2018), las cuales sirven para representar de manera gráfica la forma y la apariencia de las superficies físicas –sean elementos divisorios, cubiertas, mobiliario o vegetación–.

En la actualidad, los modelos de nubes de puntos se pueden obtener siguiendo dos principios, las mediciones basadas en sensores láser –como una estación de escáner láser terrestre (*Terrestrial Laser Scanner*: TLS) o con dispositivos móviles equipados con cámaras LiDAR (Light Detection and Ranging) (Lercari, 2016) (ver Figura 1)– y por medio del procesamiento digital de fotos, como es la fotogrametría (Xu et al., 2021). El TLS es una herramienta de captura de mediciones, que forma parte de los métodos de registro instrumental (Dallas, 2003, p. 61). Los métodos instrumentales son aquellos con los que se realiza la captura de las dimensiones de un edificio sin la necesidad de tener el contacto físico. A diferencia de los métodos directos –el otro método de obtención de dimensiones–, los métodos instrumentales suelen tener mayor precisión, a cambio de un mayor costo.

Figura 1

Modelo de nube de puntos de la cubierta del convento San Juan Bautista, Cuauintichán.



Nota. Capturado desde una Tablet con sensor LiDAR. Elaborado por V. H. Alejo-García y E. G. Larriba-Quiroz.



Por otro lado, la captura de las dimensiones de un edificio es un proceso esencial en el estudio arquitectónico. Permiten conocer la forma y la configuración espacial, dos características fundamentales de la arquitectura. En el estudio del patrimonio construido, la documentación arquitectónica ha sido una actividad relevante, porque dichos edificios son considerados obras construidas con características materiales irremplazables y únicas. En la disciplina de la conservación, para lograr la permanencia de los edificios en el tiempo, se requiere conocer al detalle la información relacionada con sus propiedades espaciales y así preservarlas.

La captura de las propiedades espaciales suele registrarse de manera gráfica y escrita en los procesos de inspección del edificio. Este registro es el principal objetivo de un trabajo de inspección (ICOMOS, 1990). Sirven para caracterizar y describir la arquitectura, además de proporcionar información útil al momento de realizar un proyecto de intervención. Por lo anterior, el registro se considera una actividad de relevancia para el estudio del patrimonio.

Los problemas de registro del patrimonio construido surgen cuando no se puede tener el contacto directo con las superficies para tomar sus medidas, por las alturas, el mobiliario o la forma misma del edificio. La ortogonalidad no es un hecho característico en los edificios heredados de siglos pasados, por la imprecisión que siempre ha existido en la construcción. Además, estos edificios suelen tener superficies con formas orgánicas difíciles de registrar manualmente, como puede ocurrir en los altos relieves, molduras y capiteles. Todo esto dificulta el proceso de captura de la forma arquitectónica. La solución viene dada por medio de la captura espacial con modelos de nubes de puntos con TLS.

Aunque los primeros modelos de este tipo de instrumento datan de la década de 1960 (Edl et al., 2018; Wu et al., 2021), sus aplicaciones en la captura del patrimonio construido no se empezaron a ver hasta la década del 2000 (Addison y Gaiani, 2000). Desde entonces se han publicado ciertos estudios, tales como los que describen las ventajas y desventajas de uso (Dallas, 2003; Barber et al., 2006), los que analizan la precisión (Grussenmyer et al., 2011), los que realizan proyectos de documentación (Pritchard et al., 2017) e integran instrumentos de captura mixta (LiDAR y fotogrametría) (Alshawabkeh & Haala, 2004; Guarnieri, Remondino & Vettore, 2006; El-Din, 2019), los que desarrollan aplicaciones para reconstrucción digital (Kwoczyńska et al., 2016) o análisis de deformaciones (Mukupu et al., 2016) y cada cierto tiempo se reevalúan los avances en revisiones de literatura (Remondino et al., 2011; Dong et al., 2020; Wu et al., 2022).

Xu y Stilla (2021, p. 257) señalan que existen pocos estudios que resuman el modo de adquirir nubes de puntos con TLS. En cuanto al uso efectivo del TLS, la literatura indica que se debe adoptar un flujo de trabajo que considere las diferentes etapas de un registro: una planeación, la cobertura total de las superficies del edificio con una resolución aceptable y un procesamiento de datos adecuados (Wu et al., 2021). Pero ¿cómo pueden influir los procesos de un flujo de trabajo en los resultados de un modelo de nube de puntos capturados con un TLS? El objetivo de este artículo es explicar cómo algunos de los procesos del flujo de trabajo pueden influir en la calidad y precisión de los modelos elaborados con TLS en proyectos de registro de edificios patrimoniales.

Para explicar esta relación, primero se realizó una breve revisión de literatura sobre los flujos de trabajo que explora las etapas de un proyecto de registro con TLS y las actividades recomendadas a realizar. Con esta base, se realizó un análisis de cuatro proyectos de registro con TLS concluidos, para identificar y evaluar elementos críticos en las diferentes etapas ejecutadas, relacionando actividades con resultados obtenidos. Luego se presentan los problemas comunes identificados y sus implicaciones en los modelos de



nubes de puntos. Finalmente, se presentan algunas recomendaciones a considerar en futuros proyectos de registro.

Las contribuciones de este estudio son las siguientes: la descripción del proceso de captura con un TLS Leica ScanStation C10, la identificación de problemas comunes en un flujo de trabajo genérico relacionado con sus causas y las implicaciones en el modelo de nube de puntos final, por último, un conjunto de recomendaciones para mejorar el proyecto de registro con TLS.

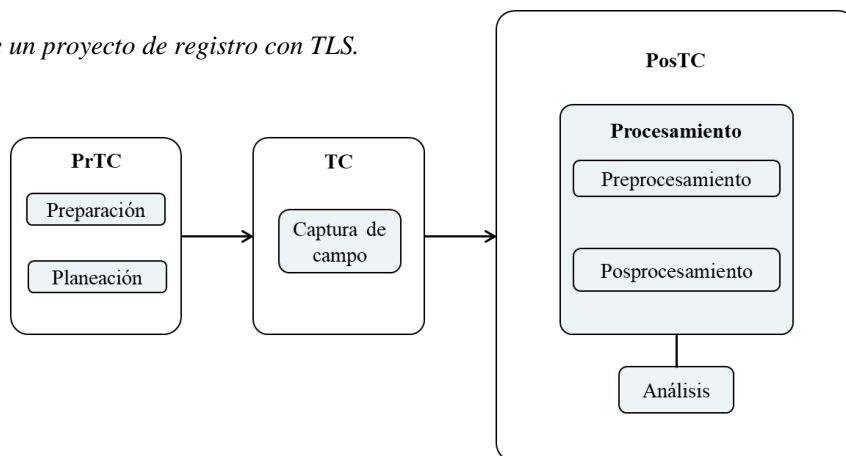
2. Flujos de Trabajo y Precisión de los Modelos de Nubes de Puntos

El flujo de trabajo tiene una influencia directa en los resultados. Esto es debido a que representa el proceso que se requiere seguir para obtener los modelos de nubes de puntos. Dependiendo el proceso que se siga (Δ proceso), se pueden cometer más o menos errores (Δ error), que inciden en una mayor o menor precisión de los modelos obtenidos (Δ modelos) ($modelos = f(proceso)$). Por esta razón, el flujo debe considerar (a) actividades que contribuyan a reducir los errores de ejecución para mejorar los resultados. En caso de que el flujo que se siga no los incluya –no incluya (a)–, esto se reflejará en los resultados. Los flujos de trabajo son adaptables, por lo que la solución es adaptar el proceso. Si el flujo de trabajo no funciona se modifica, se ejecuta y se reevalúan los resultados. En este contexto, primero será necesario identificar etapas, subetapas y actividades a ejecutar. Posteriormente, identificar los problemas comunes en cada etapa del proyecto de registro.

Etapas de un Proyecto de Registro con TLS

El proyecto de registro con TLS se puede dividir en tres etapas temporales relacionadas en torno al trabajo de campo (TC): previa al trabajo de campo (PrTC), el trabajo de campo (TC) y posterior al TC (PosTC). Sin embargo, las propuestas encontradas en la literatura dependen directamente de cómo cada especialista visualiza el proyecto de registro. Están los enfoques –como Barber (2006, p, 37)– en los que se describen únicamente el TC y PosTC –como el procesamiento–. De manera complementaria, están los que incluyen la planeación como etapa PrTC –como el descrito por Swallow et al. (2016)–. Hay quienes dividen la etapa PrTC –en la preparación y en planeación– y la etapa PosTC –en procesamiento y en análisis– en dos fases –como Wu et al. (2022)–. También dividen el procesamiento en dos fases, en pre-procesamiento y en pos-procesamiento) –como se muestra en Damięcka-Suchocka, Katzer, & Suchocki (2022) y en Wu et al. (2022)– (ver Figura 2). Con base en este hecho relacionado con la clasificación de etapas y sub etapas, se procederá a describir el proceso de captura de nubes de puntos con TLS, que considere las actividades recomendadas para obtener mejores resultados de captura.

Figura 2
Etapas de un proyecto de registro con TLS.



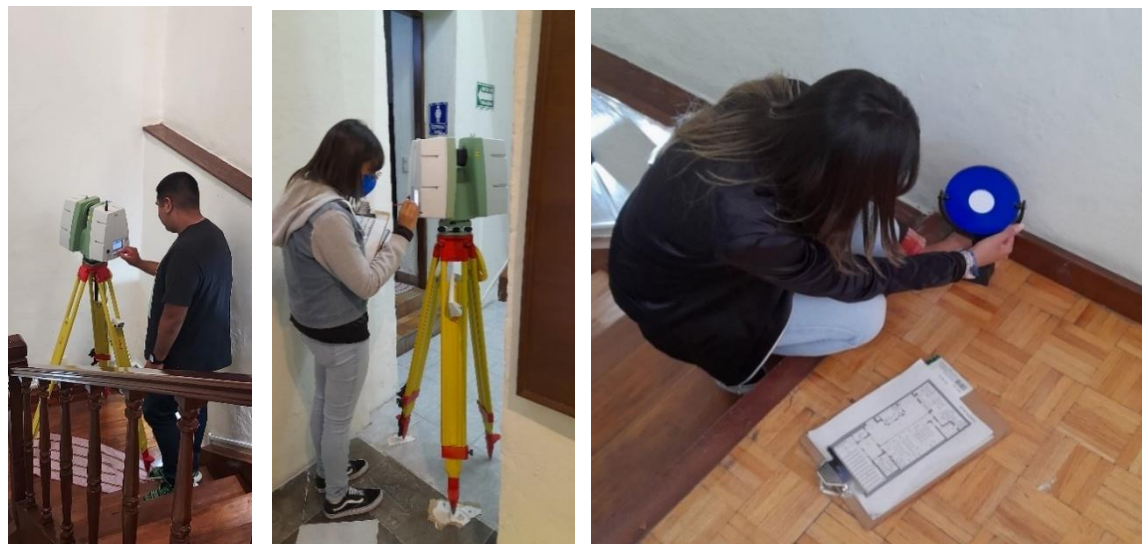
Actividades a ejecutar en un proyecto de registro con TLS

El proyecto de registro inicia con la etapa PrTC. Este, a su vez con la subetapa de preparación, que incluye las actividades relacionadas con el aprendizaje, manipulación de la estación de captura LiDAR, calibración de instrumentos (Wu et al., 2021) y formación de la cuadrilla con el personal de trabajo de campo con sus roles correspondientes. Luego está la subetapa de planeación, para esto se requiere conocer el edificio y diseñar una estrategia de captura. Es necesario conocer la localización del edificio, buscar planos existentes, realizar una visita de reconocimiento del inmueble para entender la forma del edificio. Debido a que la captura con TLS depende del alcance que puede tener el haz de luz, se requiere cambiar de posición el instrumento. A cada posición se le conoce como *estación de registro*. Por lo anterior, se debe de determinar el objetivo de registro que a su vez depende del uso que tendrá el modelo de nube de puntos (Wu et al., 2021). Por ejemplo, capturar la configuración, acabados, reconstrucción 3D, monitoreo y control de deflexiones o agrietamientos. Esto dará la pauta de la calidad o resolución requerida. En función del uso que tendrá la nube de puntos se procede a determinar la localización del instrumento considerando el rango de captura, la resolución de captura o parámetro de captura de cada estación, que corresponde a la densidad de captura, el traslape, las áreas de obstrucción y oclusión (Ahn & Wohn, 2016; Pritchard et al., 2017). Entre los resultados de planeación se puede mencionar un plano con la localización de las estaciones, los parámetros de captura y programa de captura de datos que relaciona días de trabajo –espacios capturados y cuadrillas de trabajo–.

La segunda etapa es el TC. En esta etapa se ejecuta el levantamiento, siguiendo la planeación de estaciones, se monitorea la operación de captura y se solucionan anomalías no previstas (Wu et al., 2021) (ver Figura 3). En esta etapa se utilizan instrumentos que faciliten la conexión de estaciones, tales como los targets, considerando tener al menos tres por cada par de estaciones (ver Figura 3). Cuando no existe una planeación, se requiere determinar la resolución de captura y la posición del instrumento en campo, que consideren, al menos, cuatro aspectos: cobertura total de las superficies, traslapes adecuados, el rango de captura del instrumento y el ángulo de incidencia de captura (Ahn y Wohn, 2016, p. 3655). El registro dependerá de la destreza y concepción espacial del equipo de trabajo de campo.

Figura 3

Colocación de instrumento de captura y alienación de targets.

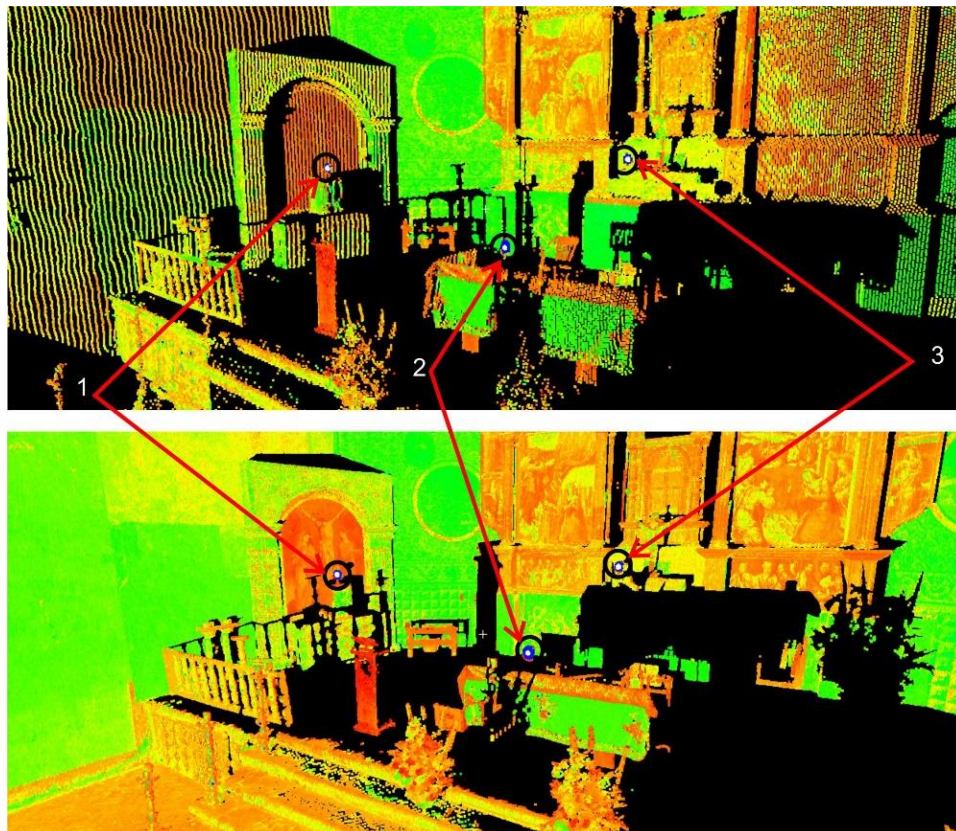


Nota. A la izquierda, se muestra el proceso de ajuste de TLS. Al centro el monitoreo de ajustes del instrumento. A la derecha, se muestra la colocación adecuada de los targets alineados al TLS según la planeación.



Una vez finalizado el TC se procede a la tercera etapa de PosTC. Esta inicia con el procesamiento de las nubes de puntos. Este se puede dividir en preprocesamiento y posprocesamiento. El preprocesamiento consiste en unir las nubes en un proceso conocido como registro de nubes de puntos. El registro tiene dos etapas: el registro tosco y el registro fino (Aryan et al., 2021; Gu et al., 2020; Dong et al., 2020). La primera es el registro tosco que es el proceso que consiste en alinear, rotar y mover las nubes. El segundo proceso es el registro fino, que es de optimización, este es un proceso digital en el cual un software calibra la posición para reducir el error. El registro tosco puede realizarse de tres maneras diferentes: la primera es de forma manual por punto, que consiste en seleccionar tres puntos por par de nubes (ver Figura 4). La segunda forma es manual visual, que consiste en aproximar las nubes de puntos de la estación global de manera visual (Xu et al., 2021, p. 2864) (ver Figura 5). Y finalmente, la tercera forma es automática, pero depende de las superficies de traslapes y de la identificación de puntos en común, y es acá donde los targets facilitan el proceso. Dentro del preprocesamiento se incluyen las actividades de eliminación de datos atípicos, ruido y transformación de formatos de trabajo (Wu et al., 2021). El posprocesamiento consiste en realizar actividades como el remuestreo de puntos, interpolación, segmentación y clasificación, proyecciones de textura, generación de planos proyectados, creación de modelos 3D (superficies o sólidos) o BIM una vez que se tiene la nube de puntos completa. Por último, los análisis corresponden a las aplicaciones del modelo. Esto ha sido una revisión en cuanto a las reglas generales de trabajo para la adopción del uso de TLS. Adicionalmente, en Xu & Stilla (2021) se pueden encontrar otros flujos de trabajo relacionados con propósitos de análisis.

Figura 4
Tipos de registro digital de nubes de punto realizados en Cyclone 9.0.

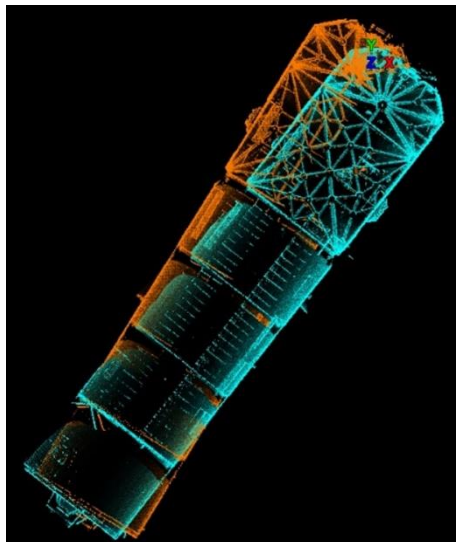


Nota. Registro elaborado por V. Uribe-Piedras. Figura editada por L. C. Cruz Ramírez.



Figura 5

Registro digital tosco manual visual.



Nota. Registro elaborado en Cyclone 9.0 por L. C. Cruz Ramírez.

3. Método

Definiciones conceptuales

En este estudio se evalúa la relación entre el flujo de trabajo y los resultados de un modelo de nube de puntos capturados con un TLS. El flujo de trabajo es el proceso que se sigue y debe de concluirse para obtener al final como resultado el modelo de nube de puntos. Los flujos de trabajo varían según la técnica particular de captura aplicada y los instrumentos.

Por otro lado, cuando se habla de registrar un edificio construido, puede referirse al menos a tres actividades. Primero, puede interpretarse como la acción en la que se examina cuidadosamente un objeto para comprenderlo –a la que llamaremos inspección–. También se puede entender como la acción de almacenar datos o información. Recientemente, con el desarrollo de las técnicas informáticas computacionales aplicadas, registrar también se refiere a la acción de rotar, alinear y unir dos o más conjuntos de puntos espaciales –nubes de puntos– que representan la forma exterior o interior de un edificio (Bosché, 2012). En la práctica se le llama registro arquitectónico al conjunto de información –relacionada con las propiedades del edificio– que es almacenada como resultado de la actividad asociada con la inspección detallada. La información obtenida es referente a las propiedades de la forma, o la apariencia perceptual del contorno que delimita el espacio construido. Entre estas se pueden mencionar las dimensiones, la textura, el color, los materiales, acabados o el estado físico de los materiales.

Cuando se habla de registro efectivo, se hace referencia al hecho que el resultado pueda ser útil para los objetivos con el que se realizó la medición digital. Por ejemplo, entre las diferentes aplicaciones que tienen los modelos de nubes de puntos, se pueden mencionar la capacidad de verificar dimensiones del edificio sin necesidad de retornar a campo, conocer la forma y configuración, identificaciones materiales expuestos de sistemas constructivos siempre que sean visibles, verificar acabados –grabados, relieves o molduras–, agrietamientos y deflexiones. No todo modelo de nube de puntos funciona para todas las

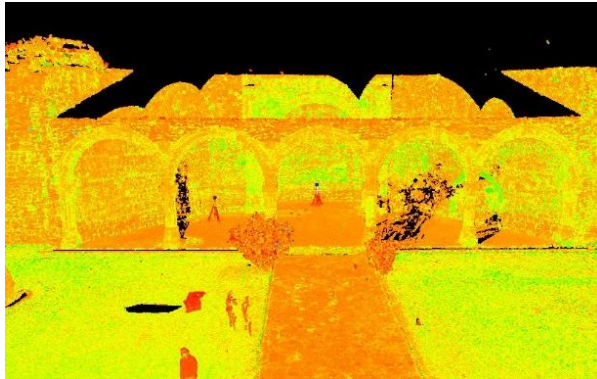


posibles aplicaciones mencionadas anteriormente. Algunos requieren más resolución y cobertura de captura.

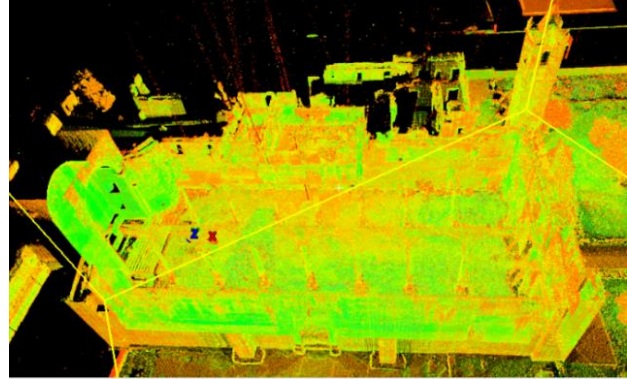
Para esta investigación se consideraron como casos de estudios los levantamientos de 4 edificios mexicanos: Capilla Abierta de Tlalmanalco, Estado de México; Exconvento de Tecali, Tecali de Herrera, Estado de Puebla; Convento San Juan Bautista, Estado de Puebla y Regina 143, Ciudad de México (ver Figura 6).

Figura 6

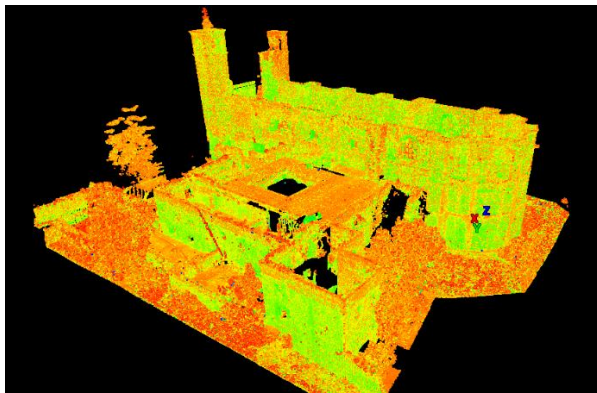
Objetos de estudios analizados.



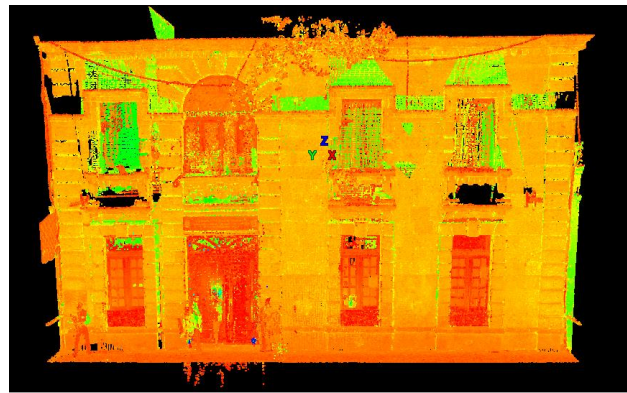
(A) Capilla Abierta de Tlalmanalco, Estado de México. Registros por L. C. Cruz-Ramírez



(B) Exconvento de Tecali, Tecali de Herrera, Puebla. Registros por L.C. Cruz-Ramírez, Sh. Cruz-Acevedo, J. P. Flores-Eroca.



(C) Convento San Juan Bautista, Puebla. Registros por V. Uribe-Piedras



(D) Regina 143, Ciudad de México. Registros por V. Uribe-Piedras

Nota. Figuras extraídas de los registros realizados en el software Cyclone 9.0. Registros elaborados por V. Uribe-Piedras, L. C. Cruz-Ramírez, V. H. Alejo-García y Sh. Cruz-Acevedo.

Instrumentos

Los registros que se presentan en la sección de resultados fueron realizados con un escáner láser terrestre *Leica ScanStation C10*. Este equipo captura superficies que se encuentren entre los 0.1-300 metros. Tiene una velocidad de captura de 50,000 puntos por segundos. Además, posee una cámara de 4 megapíxeles integrada que es utilizada para capturar las fotografías. Cada estación capturada fue procesada en el software Cyclone 9.0 de Leica. Posteriormente las nubes fueron exportadas manualmente para ser editadas en Autodesk ReCap 2023, versión educativa. (ver Figura 7).



Figura 7

Escáner láser terrestre modelo Leica ScanStation C10.



Nota. Proyecto de dimensionamiento de Exconvento de Tecali, Puebla. Configuración de estación por C. I. Gómez-Calderón.

Análisis

El proceso que se siguió para la captura de datos se describe en la Figura 8. Con base en los casos de estudio, sobre cada etapa temporal se identificaron los problemas que pueden impedir la ejecución, el seguimiento y la calidad del registro. El análisis es conducido en las tres etapas temporales relacionadas con el TC. Se identificaron errores comunes en el proyecto de registro con TLS. Estos se describen estableciendo la relación que ejercen sobre otras actividades del proyecto de registro y la posible relación con el modelo de nube de puntos final.

Figura 8

Flujo de trabajo para el registro de edificios con nubes de puntos con TLS.

PrTC	TC	PosTC
<ul style="list-style-type: none"> • 20 horas de preparación • Planeación • Visita de campo • Obtención de planos existentes • Diagramación de estaciones de captura • Determinación de ajustes de parametros de captura • Acuerdos con participantes • Creación de cuadrillas de trabajo de campo • Asignación de roles de campo • Los aspectos logísticos implican aumento del tiempo de levantamiento de campo 	<ul style="list-style-type: none"> • Seguimiento de plan de levantamiento • Instalación de targets en campo • Ejecución de actividades • Monitoreo del proceso de captura • Solución a problemas de campo imponderables • Seguimiento de estaciones en bitacora de trabajo de campo • Clasificación y almacenamiento de tados por categorías 	<ul style="list-style-type: none"> • Elaboración de diagrama de seguimiento de estaciones de campo • Registro de nubes de puntos • Registro tosco • Registro Fino • Proyección de texturas • Exportar modelo a formato E57 • Limpieza de nube de puntos en Recap • Proyección de planos proyectados en AutoCAD.

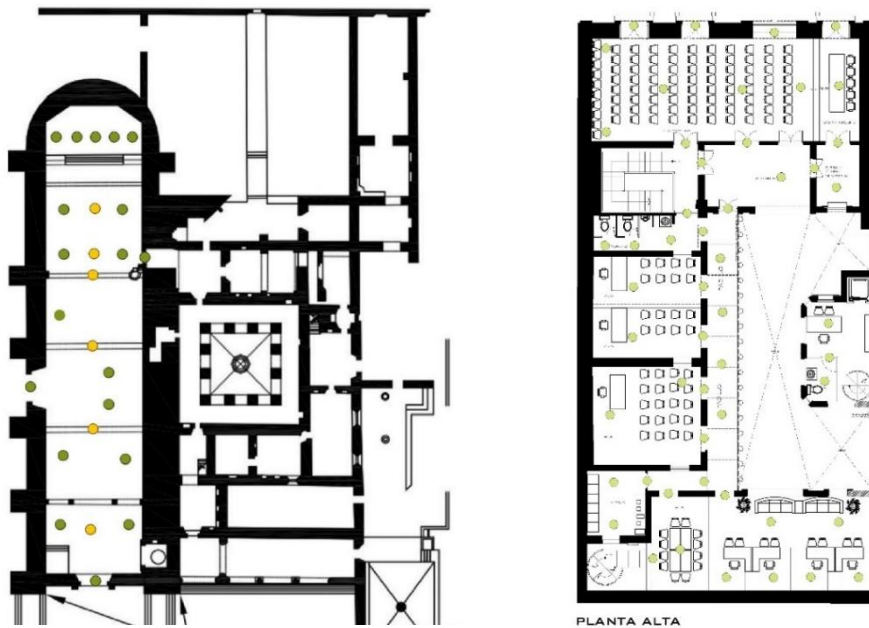


4. Resultados

En la etapa PrTC, es un hecho evidente la necesidad de conocer el instrumento y saberlo utilizar, ya que de lo contrario no se podrá colocar apropiadamente, no se podrá realizar el ajuste apropiado de parámetro de captura, no se logrará la cobertura requerida de captura y se desconocerán los tiempos de ejecución. La planeación de las estaciones tiene implicaciones principalmente en la ejecución del proyecto de registro. Por ejemplo, en la posición y número de estaciones, en la determinación del ajuste de resolución de captura, en el tiempo de captura y en la distribución de roles de los integrantes de las cuadrillas de trabajo (ver Figura 9).

Figura 9

Planeación de ubicación de estaciones de captura.



Nota. Con círculos de colores se indica la localización de la estación TLS en el espacio. En color verde se indica cuando es baja resolución y en amarillo resolución media. Elaborado por L. C. Cruz Ramírez, Sh. Cruz-Acevedo y A. Herrera-Flores.

Durante el TC, los problemas que pueden existir son derivados de la no ejecución de actividades previas –preparación y planeación– y por imprevistos. Por ejemplo, no saber utilizar los equipos, desconocimiento de la colocación y posición del instrumento, cambios en los parámetros de resolución de captura, desconocimiento o incremento en los tiempos de trabajo de campo y la colocación inadecuada de targets.

La indeterminación del ajuste de parámetros de resolución de captura tiene implicaciones en la variación de la resolución del modelo. Además, en conjunto con el desconocimiento del número de estaciones influyen en el tiempo de levantamiento, lo que evita diseñar la estrategia de captura que consiste en determinar los día y horas de TC, además de identificar y distribuir los roles de los participantes en el trabajo de campo.

La posición del instrumento o estaciones de captura se relaciona con los siguientes tipos de problemas: el ruido de las nubes generadas por elementos en movimiento –tales como árboles, personas,



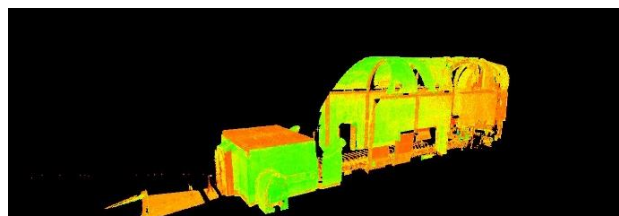
vehículos—, puntos perdidos por oclusión, las sombras causados por las superficies, variaciones de densidad, los ángulos de incidencia —cuando el objeto de registro está más distante, tiene menos resolución porque el instrumento realiza barridos angulares— y los traslapes de superficies, causan diferencias en resoluciones (ver Figura 10) (Dong et al., 2020).

Figura 10

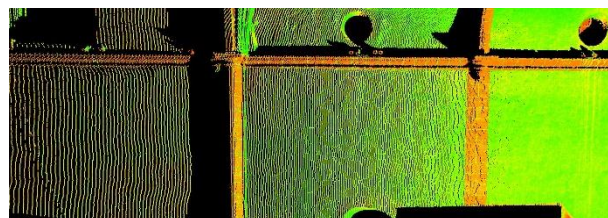
Problemas comunes relacionados con el posicionamiento del instrumento TLS.



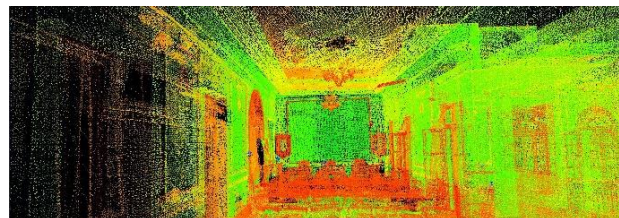
(A) Ruido en nubes de puntos. Capilla Abierta de Tlalmanalco, Tlalmanalco, Estado de México. Registros por L. C. Cruz-Ramírez.



(B) Puntos perdidos por oclusión. Convento San Juan Bautista, Puebla. Registros por V. Uribe-Piedras



(C) Efecto de la variación en los ángulos de incidencia. Convento San Juan Bautista, Puebla. Registros por V. Uribe-Piedras



(D) Traslapes de superficies. Regina 143, Ciudad de México. Registros por V. Uribe-Piedras

Nota. Registro elaborado en Cyclone 9.0.

El problema de precisión de los datos se reduce al incrementar el número de estaciones de captura durante el TC, pero el problema con esta solución está relacionado con el aumento del tiempo del TC que tiene implicaciones en costos. Además, genera redundancias en duplicidad de puntos espaciales que es ineficiente (Aryan et al., 2021).

Los problemas de posicionamiento del instrumento durante el trabajo de campo tienen implicaciones en el procesamiento en la etapa de PosTC. La colocación inadecuada de targets aumenta el tiempo de registro y el error de superposición en el registro tosco. La ausencia de targets puede aumentar aún más los tiempos de registro digital y complica el registro tosco de manera automática. Los traslapes inadecuados generan el mismo problema que los targets, pero además tienen implicaciones en la generación de oclusiones. La variación en la densidad aumenta los tiempos de procesamiento y puede tener implicaciones en aumentar el error de superposición cuando existen densidades bajas. Las oclusiones impiden el registro digital. Los errores de superposición impiden optimizar el registro digital en el proceso de registro fino. Los errores de optimización de superposición y las bajas densidades de captura que se tienen reducen la precisión y calidad del modelo final. El resumen de este proceso se presenta en la Tabla 1.



Tabla 1
Relación entre origen e implicación de los problemas de registro.

Origen del problema					Problemas relacionados	Implicaciones				
Etapas						Etapas				
PrTC	TC	PosTC				PrTC	TC	PosTC		
Subetapas						Subetapas				
Preparación	Planeación	Ejecución en campo	Preprocesamiento	Posprocesamiento		Preparación	Planeación	Ejecución en campo	Preprocesamiento	Posprocesamiento
					Falta de cobertura de captura					
					Ajuste inapropiado de parámetro de captura					
					Desconocimiento del tiempo de captura del TC					
					Colocación inapropiada del instrumento					
					Imprecisión de la posición y número de estaciones					
					Imprecisión en la determinación del ajuste de resolución de captura					
					Mayor tiempo de captura					
					Distribución inapropiada de roles de cuadrillas de trabajo					
					Colocación inadecuada de targets					
					Puntos perdidos por oclusiones					
					Variación en la densidad necesaria de puntos					
					Traslapes inadecuados de superficies					
					Mayor tiempo de procesamiento					
					Incremento en el error de superposición de puntos en el registro digital					
					Calidad inapropiada del modelo					



5. Discusión

El TLS es un instrumento digital que captura las dimensiones del espacio de manera automática, pero dentro de su proceso existen numerosas situaciones en las que se pueden cometer errores, las cuales también varían según el tipo de instrumento. Dichos errores pueden tener implicaciones en el resultado final alterando la precisión, el tiempo de procesamiento o incluso impedir que se logre generar el modelo completo. En resumen, el impacto en la determinación del flujo de trabajo sobre el registro puede estar relacionado con el tiempo de captura, la resolución del modelo, la cobertura del registro, la complejidad de realizar el registro digital del modelo y la precisión del modelo. A manera de conclusión se puede afirmar que optimizar un flujo de trabajo tiene implicaciones en la reducción del tiempo de TC, que puede mejorar la tarea de procesamiento y la calidad del modelo final.

Se considera necesario que el equipo de trabajo tenga conocimiento del proceso completo del proyecto de registro porque le permitirá tener una visión global del proyecto. Esto contribuye en el TC, porque en caso de presentarse un problema cualquiera puede resolverlo. Antes de realizar el proyecto de registro de un edificio, será necesario realizar acuerdos sobre los roles que se ejecutarán en campo, para acelerar los procesos del TC.

Se recomienda que para la subetapa de planeación se realice una visita de campo al inmueble para tener una idea más precisa del plan de registro y poder programar los tiempos de captura con mayor precisión. Como experiencia se puede comentar que el plan de localización de las estaciones sin conocer el complejo del exconvento San Juan Bautista en Cuautinchán, fue de 64 estaciones. El plan ajustado después de la visita de reconocimiento del inmueble fue de 160 estaciones. El número de estaciones registradas al finalizar el trabajo de campo fue de 164.

La estrategia que se sigue para la planeación de estaciones es colocar por medio de puntos en un plano, los lugares donde se localizará el TLC con una leyenda de colores que indican los parámetros de captura de campo. Los planos de levantamiento se realizan por día, lo que permite ejecutar un cronograma de avance de ejecución de captura con mayor precisión y monitorear el avance.

La resolución debe ser ajustada considerando las superficies y los alcances que se requieren del levantamiento, debido a que una vez capturado no se puede obtener más resolución. Otro aspecto que ha servido para mejorar el proceso de registro digital en la etapa de procesamiento ha sido crear una bitácora de levantamiento de campo, para luego identificar las estaciones relacionadas para unir las nubes de puntos. Esto además permite que pueda ser registrada incluso por quienes no conocen el edificio.

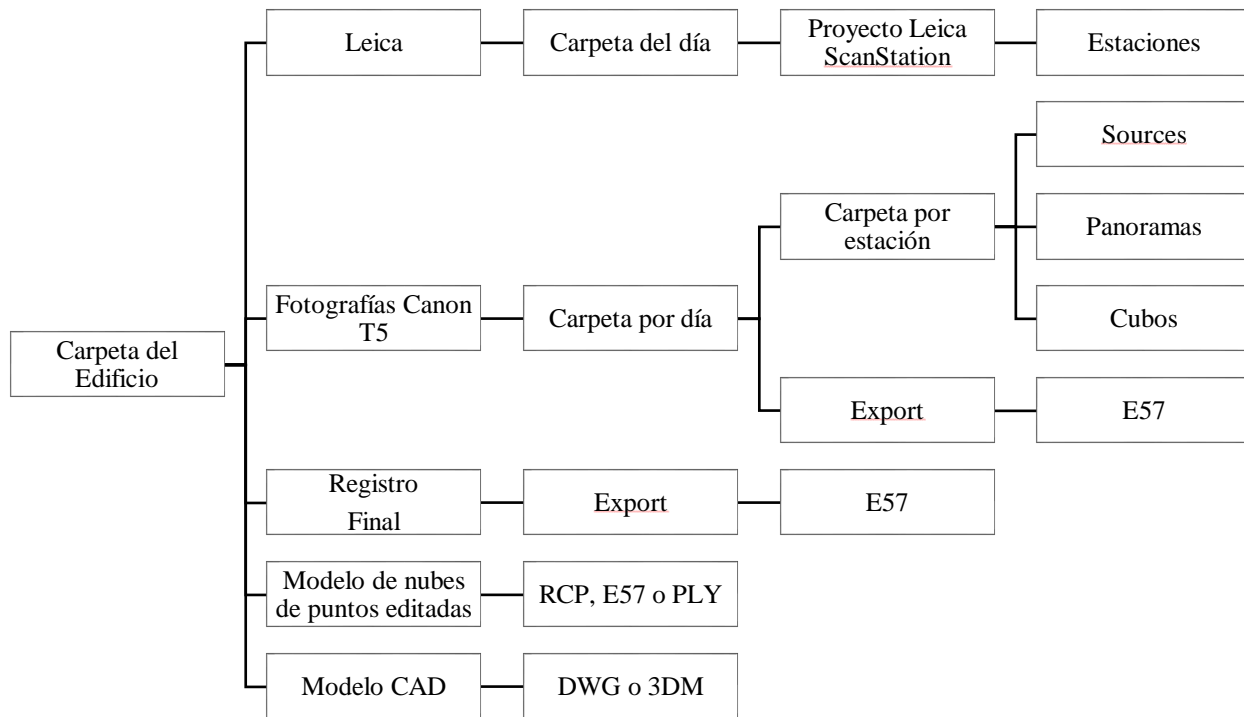
El TLS al tratarse de instrumento que se opera desde la altura del pavimento, este tiene la desventaja de no poder capturar las superficies externas de la cubierta. Esto solo se podría realizar si existiese un lugar por encima del plano de cubierta donde colocar la estación para hacer la captura 3D. La solución a este problema viene resuelta con la implementación de herramientas mixtas de captura como es el uso de RPAS o tabletas con cámaras LiDAR.

Es necesario considerar aspectos logísticos sobre la operación y clasificación de la información, tales como determinar la estrategia de recarga de pilas en campo, la estrategia de clasificación de datos por día, asegurarse del resguardo de equipos en campo. Considerar que los aspectos logísticos implican aumento del tiempo de levantamiento de campo



Con base en las experiencias aprendidas se sugiere utilizar la siguiente lista de verificación en cada estación para asegurar la óptima colocación y ajuste de parámetros de captura para equipos Leica ScanStation C10: (a) Colocación de la estación en la ubicación planeada, (b) verificar la visibilidad desde la estación, (c) confirmar el ajuste del perno de fijación, (d)ajustar del nivel de burbuja, (e) ajustar el nivel digital, (f) localizar los targets en el espacio de captura (al menos 3), (g) girar los targets para (h) confirmar la visibilidad de targets desde la estación, (i) crear nueva estación digital desde el instrumento, (j) ajustar los parámetros de captura desde la estación, (k) quitar la manecilla de transporte del instrumento, (l) si el espacio lo permite verificar que el perímetro esté libre de personas en movimiento para evitar ruido en el resultado y (m) identificar el espacio de monitoreo del proceso. Adicionalmente, se sugiere adoptar un sistema de gestión de archivos como el que se propone en la Figura 11. Esta lista de verificación puede tomarse como punto de partida y revisarse para adaptarse a otros modelos TLS.

Figura 11
Propuesta de gestión de datos para la etapa de procesamiento.



En cuanto a los problemas abiertos se pueden mencionar al menos tres posibles futuros problemas por resolver. El primero está relacionado con la evaluación de métodos optimizados de diseño de ubicación de estaciones campo. Este tiene relación con reducir el número de estaciones conservando la calidad del registro. El segundo problema está relacionado con mejorar la planeación de captura de campo conociendo los tiempos de registro, por medio del análisis de los tiempos de registro de proyectos anteriores. Este consiste en conocer probabilísticamente los tiempos promedios de colocación de estación y nivelación, según el nivel de expertiz de la cuadrilla de trabajo. El tercer problema está relacionado con evaluar cómo la planeación puede reducir el tiempo invertido en todo un proyecto de registro por las implicaciones que tiene en la etapa de trabajo de campo y en el procesamiento de datos.



6. Agradecimiento

Este artículo fue elaborado en el marco del proyecto SIP No 20230014.

Créditos por edificio registrado:

Capilla Abierta de Tlalmanalco, Tlalmanalco, Estado de México. PrTC: Luis Carlos Cruz-Ramírez y Carlos Iván Gómez-Calderón. TC: Luis Carlos Cruz-Ramírez, Shendell Cruz-Acevedo, Carlos Iván Gómez-Calderón y Ricardo Lozano-Gálvez. PosTC: Luis Carlos Cruz-Ramírez y Víctor Hugo Alejo-García.

Exconvento de Tecali, Tecali de Herrera, Puebla. PrTC: Luis Carlos Cruz-Ramírez y Shendell Cruz-Acevedo. TC: Luis Carlos Cruz-Ramírez, Shendell Cruz-Acevedo, Carlos Iván Gómez-Calderón y Roberto Aaron Duran-Encarnación. PosTC: Luis Carlos Cruz-Ramírez, Shendell Cruz-Acevedo, Juan Pablo Flores-Eroca.

Convento San Juan Bautista, Cuautinchan, Puebla. PrTC: Luis Carlos Cruz-Ramírez y Shendell Cruz-Acevedo. TC: Luis Carlos Cruz-Ramírez, Roberto Aaron Duran-Encarnación, Aylen Reina-Sierra, Lizeth García-García, Claudia Ruiz-Prieto, Diana Monserrat Veloz-García, Juan Pablo Flores-Eroca, Eduardo Galileo Larriba-Quiroz y Víctor Hugo Alejo-García. PosTC: Valentín Uribe-Piedras y Luis Carlos Cruz-Ramírez

Regina 143, Ciudad de México. PrTC: Adrián Herrera-Flores y Luis Carlos Cruz-Ramírez. TC: Luis Carlos Cruz-Ramírez, Adrián Herrera-Flores, Diana Monserrat Veloz-García, Adrián Alejandro Maldonado-Vega, Lizeth García-García, Víctor Hugo Alejo-García, Francisco López-Campo y Cinthia Cruz-Martínez. PosTC: Valentín Uribe-Piedras.

7. Bibliografía

- Addison, A. C., & Gaiani, M. (2000). Virtualized Architectural Heritage: New Tools and Techniques. *IEEE Multimedia*, 7(2), 26-31.
- Ahn, J., & Wohn, K. (2016). Interactive scan planning for heritage recording. *Multimedia Tools and Applications*(75), 3655-3675. doi:10.1007/s11042-015-2473-0
- Alshawabkeh, Y., & Haala, N. (2004). Integration of digital photogrammetry and laser scanning for heritage documentation. *ISPRS XX. Symposium, Com. V.*, 12-23. Obtenido de <https://www.isprs.org/proceedings/xxxv/congress/comm5/papers/590.pdf>
- Aryan, A., Bosché, F., & Tang, P. (2021). Planning for terrestrial laser scanning in construction: A review. *Automation in Construction* (125). doi:10.1016/j.autcon.2021.103551
- Barber, D. M., Dallas, R. W., & J Mills, o. P. (2006). Laser Scanning for Architectural Conservation. *Journal of Architectural Conservation*, 12(1), 35-52. doi:10.1080/13556207.2006.10784959
- Bosché, F. (2012). Plane-based registration of construction laser scans with 3D/4D building models. *Advanced Engineering Informatics*, 26, 90-102. doi:10.1016/j.aei.2011.08.009
- Cellucci, C. (2016). Models of Science and Models in Science. En E. Ippoliti, F. Sterpetti, & T. Nickles (Edits.), *Models and inferences in science* (págs. 95-112). Switzerland: Springer.
- Dallas, R. (2003). Measured Surveys of Historic Buildings: User Requirements and Technical Progress. *Journal of Architectural Conservation*, 9(2), 58-81. doi:10.1080/13556207.2003.10785343
- Damięcka-Suchocka, M., Katzer, J., & Suchocki, C. (2022). Application of TLS Technology for Documentation of Brickwork Heritage Buildings and Structures. *Coatings*, 12(12). doi:10.3390/coatings12121963



- Dong, Z., Liang, F., Yang, B., Xu, Y., Zang, Y., Li, J., . . . Stilla, U. (2020). Registration of large-scale terrestrial laser scanner point clouds: A review and benchmark. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 163, 327-342. doi:10.1016/j.isprsjprs.2020.03.013
- Eld, M., Mizerák, M., & Trojan, J. (2018). 3d Laser Scanner: History and Applications. *Acta Simulatio*, 1-5. doi:10.22306/asim.v4i4.54
- El-Din Fawzy, H. (2019). 3D laser scanning and close-range photogrammetry for buildings documentation: A hybrid technique towards a better accuracy. *Alexandria Engineering Journal*, 1191–1204. doi:10.1016/j.aej.2019.10.003
- Grussenmeyer, P., Alby, E., Assali, P., Poitevin, V., Hullo, J. F., & Smigiel, E. (2011). Accurate Documentation in Cultural Heritage by merging TLS and high resolution photogrammetric data. *Videometrics, Range Imaging, and Applications XI*, 8085, 79-91. doi:10.1117/12.890087
- Gu, X., Wang, X., & Guo, Y. (2020). A Review of Research on Point Cloud Registration Methods. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 782. doi:10.1088/1757-899X/782/2/022070
- Guarnieri, A., Remondino, F., & Vettore, A. (2006). Digital photogrammetry and TLS data fusion applied to Cultural Heritage 3D modeling. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci*, 36, 1-6. Obtenido de https://www.isprs.org/proceedings/xxxvi/part5/paper/1216_dresden06.pdf.
- ICOMOS. (1990). *Guide to Recording Historic Buildings*. Butterworth Architecture.
- Kwoczyńska, B., Litwin, U., Piech, I., Obirek, P., & Ślędz, J. (2016). The Use of Terrestrial Laser Scanning in Surveying Historic Buildings. *2016 Baltic Geodetic Congress*. Poland: IEEE. doi:10.1109/BGC.GeoMatics.2016.54
- Lercari, N. (2016). Terrestrial Laser Scanning in the Age of Sensing. En M. Forte, & S. Campana (Edits.), *Digital Methods and Remote Sensing in Archaeology* (págs. 3-33). New York: Springer. doi:10.1007/978-3-319-40658-9_1
- Mukupa, W., Roberts, G. W., Hancock, C. M., & Al-Manasir, K. (2016). A review of the use of terrestrial laser scanning application for change detection and deformation monitoring of structures. *Survey Review*. doi:10.1080/00396265.2015.1133039
- Pritchard, D., Sperner, J., Hoepner, S., & Tenschert, R. (2017). Terrestrial laser scanning for heritage conservation: the Cologne Cathedral documentation project. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 4, págs. 213-220. Ottawa, Canada. doi:10.5194/isprs-annals-IV-2-W2-213-2017
- Remondino, F. (2011). Heritage Recording and 3D modeling with photogrammetry and 3d scanning. *Remote Sensing*, 1104-1138. doi:10.3390/rs3061104
- Swallow, P., Dallas, R., Jackson, S., & Watt, D. (2016). *Measurement and Recording of Historic Buildings*. London: Routledge.
- Wu, C., Yuan, Y., Tang, Y., & Tian, B. (2022). Application of Terrestrial Laser Scanning (TLS) in the Architecture, Engineering and Construction (AEC) Industry. *Sensors*. doi:10.3390/s22010265
- Xu, Y., & Stilla, U. (2021). Toward building and civil Infrastructure reconstruction from point clouds: A review on data and key techniques. *Journal Of Selected Topics In Applied Earth Observations And Remote Sensing*, 2857-2885. doi:10.1109/JSTARS.2021.3060568

