



UNIVERSIDAD
DE LA REPÚBLICA
URUGUAY



FACULTAD DE
INGENIERÍA
UDELAR

UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA FACULTAD DE INGENIERÍA

Análisis Exploratorio escáner Leica RTC360

Alfonso Altez Bentancort

María Valentina Diez Graña

Proyecto de grado presentado en Facultad de Ingeniería de la Universidad
de la República
En cumplimiento parcial de los requerimientos para la obtención del título de
Ingeniero Agrimensor

Tutor

Prof. Luis Calderón

Tribunal

Prof. Adj. Hebenor Bermúdez
Prof. Bruno Silveira
Prof. Martín Wainstein

Montevideo, Uruguay

2025

PÁGINA DE APROBACIÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA

El tribunal docente integrado por los abajo firmantes aprueba la Tesis de Investigación.

Título

.....
.....

Autor/s

.....

Tutor/s

.....

Carrera

.....

Puntaje

.....

Tribunal

Profesor..... (Nombre y firma)

Profesor..... (Nombre y firma)

Profesor..... (Nombre y firma)

Fecha:

Agradecimientos

En primer lugar, queremos expresar nuestro profundo agradecimiento a nuestras familias, que estuvieron presentes en cada etapa de esta carrera. Gracias por el apoyo incondicional. Sin su confianza y compañía, este trabajo no habría sido posible.

A nuestro tutor, Ing. Agrim. Luis Calderón, por su dedicación y guía constante a lo largo de todo este proyecto. Su apoyo no solo impulsó este proyecto, sino que también fortaleció nuestro crecimiento académico y profesional.

A Adrián Santos, por su enorme disposición y buena voluntad cada vez que necesitamos acceder a distintas áreas del edificio.

Finalmente, a nuestros amigos, compañeros de carrera y docentes, que compartieron con nosotros estos años de estudio, desafíos y aprendizajes. Cada uno aportó algo esencial para que hoy podamos cerrar esta etapa con orgullo.

Resumen

Este trabajo presenta un análisis exploratorio del escáner láser terrestre Leica RTC360 mediante el relevamiento completo de la fachada de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República. Para el cumplimiento de la tarea se generan nubes de puntos a partir de 53 estaciones de escaneo, registradas y procesadas con los softwares Cyclone Register 360 y Cyclone 3DR, incorporando además datos LiDAR aéreos del vuelo realizado sobre Montevideo en 2024.

La comparación de los resultados con mediciones obtenidas mediante estación total permitió analizar la precisión y eficiencia del equipo en la captura masiva de datos. Los resultados confirman el alto rendimiento del Leica RTC360 para la documentación arquitectónica, destacando su aplicabilidad en entornos complejos y de gran escala.

Palabras clave: Escáner láser terrestre, Leica RTC360, nube de puntos, LiDAR aéreo, modelado 3D.

Tabla de ilustraciones

Figura 1: Funcionamiento básico LiDAR aéreo. Fuente: Lohani & Ghosh (2017). Airborne LiDAR technology: A review of data collection and processing systems.	13
Figura 2: Principio de funcionamiento del TLS. Fuente: Application of terrestrial laser scanning in the architecture, engineering and construction industry. Wu, Yuan, Tang y Tian, 2022.....	16
Figura 3: Principio de funcionamiento del TLS. Fuente: Application of terrestrial laser scanning in the architecture, engineering and construction industry. Wu, Yuan, Tang y Tian, 2022.....	17
Figura 4: Escáner RTC360. Fuente: Página oficial del fabricante.	19
Figura 5: Fotografía tomada por el escáner. Fuente: Elaboración propia.	21
Figura 6: Ejemplo de conjunto de datos. Fuente: Elaboración propia.....	22
Figura 7: Flujo de trabajo con el escáner y el paquete de softwares. Fuente: Elaboración propia.....	23
Figura 8: Interfaz Cyclone Register 360. Fuente: Página oficial de Leica.....	24
Figura 9: Interfaz Cyclone 3DR. Fuente: Página oficial de Leica.....	25
Figura 10: Vuelo LiDAR sobre Montevideo. Fuente: Intendencia de Montevideo.	26
Figura 11: Edificios seleccionados para el relevamiento. Fuente: Elaboración propia.	28
Figura 12: Obstrucción parcial por vehículos. Fuente: Elaboración propia.	29
Figura 13 Etapa de captura de datos en el cuerpo norte del edificio. Fuente: Elaboración propia.....	30
Figura 14: Distribución de configuraciones de escaneo. Fuente: Elaboración propia.	31
Figura 15: Alineación visual vista superior. Fuente: Elaboración propia.	33
Figura 16: Alineación visual vista lateral. Fuente: Elaboración propia.	34
Figura 17 Alineación mediante puntos en común. Fuente: Elaboración propia.	34
Figura 18: Distinta calidad de enlaces. Fuente: Elaboración propia.	35
Figura 19: Limpieza de nube por polígonos. Fuente: Elaboración propia.	37
Figura 20: Limpieza de nube de puntos por limit box. Fuente: Elaboración propia.....	38
Figura 21: Resultado luego de limpieza de nube. Fuente: Elaboración propia.	39
Figura 22: Limpieza de nube por superficies. Fuente: Elaboración propia.	40
Figura 23: Detección automatizada de autos en la nube de puntos. Mediante método de superficie lisa. Fuente: Elaboración propia.....	41
Figura 24: Estacionamiento en ala sur tras limpieza de la nube de puntos. Fuente: Elaboración propia.....	42
Figura 25: Ejemplo de zonas a limpiar. Fuente: elaboración propia.....	43
Figura 26: Resumen del informe generado. Fuente: Elaboración propia.....	44
Figura 27: Cuerpo sur del edificio seleccionado en amarillo. Fuente: Elaboración propia.	45
Figura 28: Fotografía del equipo resultante de la configuración. Fuente: Elaboración propia.	46
Figura 29: Fotografía del equipo resultante de la configuración. Fuente: Elaboración propia.	47

Figura 30: Resultado de la nube de puntos en la misma zona luego de importar configuración en la terraza. Fuente: Elaboración propia.	47
Figura 31: Zonas incompletas inaccesibles. Fuente: Elaboración propia.	48
Figura 32: Parte de nube de puntos del ala sur a la izquierda - parte de nube de puntos del vuelo LiDAR a la derecha. Fuente: Elaboración propia.	50
Figura 33: Puntos en común para la unión de ambas nubes de puntos. Fuente: Elaboración propia.	51
Figura 34: Resultado luego de integradas las nubes. Fuente: Elaboración propia.	53
Figura 35: Resultado luego de integradas las nubes. Fuente: Elaboración propia.	53
Figura 36: Resultado de la superficie. Fuente: Elaboración propia.	55
Figura 37: Paredes seleccionadas para la comparación sobre nube de puntos. Fuente: Elaboración propia.	57
Figura 40: Primer paso para activar licencia. Fuente: Elaboración propia.	70
Figura 41: Segundo paso para activar licencia. Fuente: Elaboración propia.	70
Figura 42: Tercer paso para activar licencia. Fuente: Elaboración propia.	71
Figura 43: Estacionamiento sobre Julio María Sosa. Fuente: Escáner utilizado.	71
Figura 44: Cuerpo sur de Facultad. Fuente: Escáner utilizado.	72
Figura 45: Fachada norte, cuerpo sur. Fuente: Escáner utilizado.	73
Figura 46: Cuerpo sur fachada oeste. Fuente: Escáner utilizado.	74
Figura 47: Azotea sobre cuerpo sur. Fuente: Escáner utilizado.	75
Figura 48: Azotea sobre cuerpo Norte. Fuente: Escáner utilizado.	76
Figura 49: Nube de puntos del Teatro Solís. Fuente: Centro de Información Digital - Facultad de Arquitectura.	78

Índice de tablas

Tabla 1: Puntos utilizados para la unión de nube generada con escáner terrestre y vuelo. Fuente: Software Cyclone 3DR.	52
Tabla 2: Comparación de medidas entre estación total y nube de puntos. Fuente: Elaboración propia.	57
Tabla 3: Errores entre coordenadas de estación vs nube de puntos. Fuente: Software Cyclone Register.	58
Tabla 4: Comparación de requisitos de los softwares y atributos de la computadora utilizada. Fuente: Elaboración propia.	74

Tabla de contenidos

1. Introducción	8
2. Objetivos.....	10
2.1. Objetivo general	10
2.2. Objetivos específicos.....	10
3. Marco teórico	12
3.1. Light Detection and Ranging (LiDAR).....	12
3.2. Escáner láser terrestre (TLS)	14
4. Marco Metodológico	19
4.1. Láser Escáner 3D Leica RTC360	19
4.2. Vuelo LIDAR Montevideo 2024	25
5. Metodología.....	27
5.1. Escaneo terrestre	27
5.2. Registro de nube de puntos.....	32
5.3. Integración con datos LiDAR aéreos	46
5.4. Modelado 3D.....	54
5.5. Comparación con estación total	56
6. Conclusiones	59
7. Bibliografía.....	64
8. Anexos	67
8.1. Cursos.....	67
8.2. Activación de la licencia en Leica CLM – License Manager.....	69
8.3. Especificaciones de la PC para uso de software Cyclone Register 360.....	71
8.4. Especificaciones recomendadas de la estación de trabajo.....	72
8.5. Especificaciones de la PC para uso de software Cyclone 3DR	72
8.6. Especificaciones de la computadora que se utilizó para realizar el trabajo ..	73
8.7. TLS en Uruguay	77

1. Introducción

El desarrollo de nuevas tecnologías ha transformado profundamente la práctica profesional del Ingeniero Agrimensor, incorporando herramientas que permiten una captura más precisa, eficiente y detallada del entorno. Entre ellas, el escaneo láser terrestre (TLS, Terrestrial Laser Scanning) se ha consolidado en los últimos años como una de las metodologías más avanzadas para la obtención de información tridimensional de alta densidad. Esta tecnología ofrece una representación fiel de la realidad mediante nubes de puntos, facilitando la generación de modelos digitales, la documentación arquitectónica y el control geométrico de obras.

La Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República, a través del Instituto de Agrimensura, adquirió recientemente un escáner láser terrestre Leica RTC360 con fines de docencia e investigación. La incorporación de este equipo representa un avance significativo para la institución, al permitir la formación de estudiantes en el uso de tecnologías de captura masiva de datos y abrir nuevas posibilidades en proyectos académicos y profesionales vinculados a la medición, modelado y gestión del territorio.

En ese contexto, el presente trabajo surge con el propósito de realizar un análisis exploratorio del escáner Leica RTC360 y sus softwares asociados. La motivación principal fue aprovechar la oportunidad de aprender y experimentar sobre una tecnología que hasta el momento no había sido utilizada en la carrera, comprendiendo su funcionamiento, alcances y limitaciones.

Existen antecedentes recientes dentro del Instituto que complementan esta línea de trabajo. Entre ellos se destaca el informe de los ingenieros agrimensores Ugalde y Ogeda¹, centrado en el rol de la profesión en la implementación de metodologías BIM en construcciones preexistentes, que pone de manifiesto la importancia de incorporar herramientas 3D en el ámbito del ejercicio profesional. Asimismo, otro proyecto de grado, como *“Comparación de resultados topográficos altimétricos en el relevamiento de una cantera utilizando dron fotogramétrico, dron RTK/PPK y estación escáner”*², han explorado el potencial del escaneo láser terrestre como método de medición y comparación con técnicas convencionales.

El empleo de esta tecnología aporta grandes beneficios a la práctica profesional del Ingeniero Agrimensor, ya que permite una captura rápida de millones de puntos con alta precisión, reduciendo los tiempos de trabajo en campo y mejorando el nivel de detalle de los resultados. Además, posibilita la integración con flujos de trabajo BIM y con sistemas de información geográfica (SIG), ampliando el campo de actuación de nuestra profesión hacia áreas vinculadas a la ingeniería civil, la arquitectura y la gestión del patrimonio.

2. Objetivos

2.1. *Objetivo general*

El objetivo general de este trabajo es realizar un análisis exploratorio del escáner láser terrestre Leica RTC360 en un entorno arquitectónico como la Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República.

Se busca analizar su precisión, su eficiencia y aplicabilidad en la captura de datos tridimensionales, valorando además la utilidad y potencial de esta tecnología dentro del ejercicio profesional del Ingeniero Agrimensor.

2.2. *Objetivos específicos*

En primer lugar, se pretende realizar un relevamiento completo del edificio de la Facultad de Ingeniería, con el fin de obtener una representación tridimensional detallada.

Se busca también generar una nube de puntos con color realista, empleando las imágenes capturadas por el equipo para mejorar la visualización y el reconocimiento de los elementos constructivos.

Posteriormente se busca integrar la nube de puntos terrestre con datos aéreos obtenidos mediante tecnología Light Detection and Ranging (LiDAR), provenientes de un vuelo sobre la ciudad de Montevideo, para analizar la compatibilidad entre ambos tipos de captura.

Otro objetivo específico consiste en modelar tridimensionalmente el edificio a partir de la nube obtenida, utilizando los softwares de procesamiento asociados al sistema del escáner, con el propósito de evaluar sus capacidades para el modelado y representación.

Finalmente, se busca comparar los datos obtenidos con el escáner respecto a mediciones realizadas con estación total para establecer diferencias y evaluar la precisión relativa del equipo en trabajos de topografía.

3. Marco teórico

3.1. *Light Detection and Ranging (LiDAR)*

El LiDAR es una tecnología que permite medir distancias con alta precisión mediante la emisión de pulsos de luz láser. Su principio de funcionamiento se basa en el tiempo de vuelo (TOF). Conociendo la velocidad de la luz y el tiempo de retorno, el sistema calcula la distancia y genera una coordenada tridimensional (X, Y, Z). El conjunto de millones de mediciones constituye una nube de puntos que representa la geometría del terreno o de las estructuras observadas con gran nivel de detalle (Seidaliyeva et al., 2025).

A diferencia de los sistemas pasivos, el LiDAR emite su propia fuente de energía, lo que le permite capturar información incluso durante la noche o en condiciones de iluminación variable. (NOAA, 2012). Además, la capacidad del LiDAR para registrar múltiples retornos de un mismo pulso posibilita diferenciar estructuras verticales, como copas de árboles, fachadas o el suelo (WWF, 2019).

Según Zubizarreta Gisaso (2019), los sistemas LiDAR pueden clasificarse según la plataforma donde se instala el sensor, lo que determina su alcance, resolución y campo de aplicación: el LiDAR aéreo (ALS, por su sigla en inglés Airborne Laser Scanning) que se instala en aeronaves o drones; el LiDAR terrestre (TLS, por su sigla en inglés Terrestrial Laser Scanning) que se coloca sobre trípodes o estructuras fijas; y el LiDAR móvil (MLS, Mobile Laser Scanning) que se integra en vehículos, mochilas o plataformas portátiles.

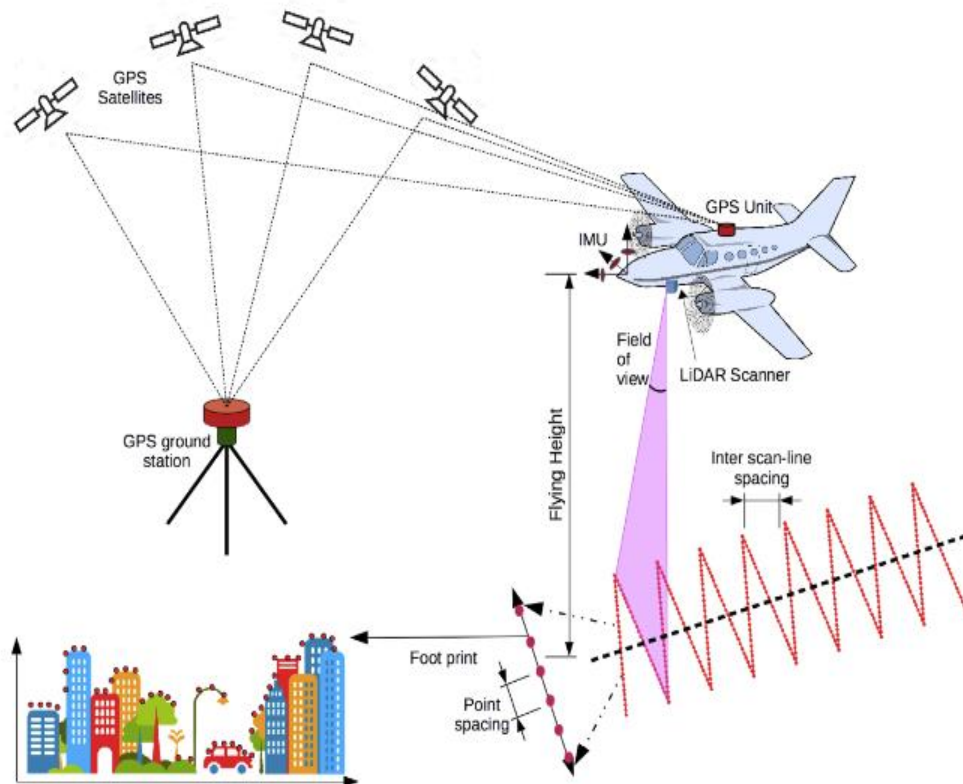


Figura 1: Funcionamiento básico LiDAR aéreo. Fuente: Lohani & Ghosh (2017). Airborne LiDAR technology: A review of data collection and processing systems.

Un sistema LiDAR aéreo, cómo el utilizado en el presente trabajo, está compuesto por varios componentes integrados que permiten registrar con alta precisión la superficie terrestre desde una aeronave. En primer lugar, la plataforma aérea (avión, helicóptero o drone) transporta el sistema sobre el área de estudio. El sensor LiDAR integrado en la plataforma emite pulsos láser hacia el suelo y registra los retornos reflejados, midiendo el tiempo de viaje de cada pulso para calcular la distancia. Simultáneamente, un receptor GNSS determina la posición del avión, mientras que una unidad de medición inercial (IMU) registra la orientación y aceleración del sistema con alta frecuencia.

Toda la información se sincroniza mediante un computador a bordo, que asocia los datos de posición y orientación a cada pulso láser. Además, suele incorporarse una cámara digital para obtener imágenes que aporten información de color al modelo generado. Estos elementos trabajan de forma conjunta para obtener nubes de puntos georreferenciadas con precisión centimétrica, representando en tres dimensiones el terreno y los objetos sobre él (Lohani & Ghosh, 2017).

3.2. *Escáner láser terrestre (TLS)*

Los escáneres láser terrestres (TLS por su sigla en inglés) son instrumentos que emplean tecnología láser para realizar mediciones tridimensionales de los objetos o superficies que lo rodean desde una posición fija, combinando la medición de distancias (rango oblicuo) mediante un telémetro láser con las mediciones angulares horizontales y verticales obtenidas por codificadores. (Shan & Toth, 2018, p.29).

De acuerdo con Wu, Yuan, Tang y Tian (2022), la tecnología láser, originada en 1960 con los primeros experimentos de Theodore Maiman, tardó varias décadas en evolucionar hasta su aplicación práctica en instrumentos de medición. Fue recién en los años noventa cuando comenzaron a comercializarse los primeros TLS, y desde entonces su desarrollo se ha visto impulsado por los avances en componentes ópticos, electrónicos y de procesamiento de datos. Estas mejoras permitieron aumentar la precisión, reducir el peso de los equipos y optimizar su velocidad de adquisición.

Pueden registrar con alta densidad superficies y estructuras complejas desde una estación fija. El resultado de este proceso es una nube de puntos que representa la geometría capturada, permitiendo obtener información espacial de manera eficiente y en tiempos reducidos, registrando millones de puntos en pocos minutos.

Según Bornaz y Rinaudo (2003), este tipo de escáneres láser pueden considerarse estaciones totales altamente automatizadas, compuestas por un láser optimizado para levantamientos de alta velocidad y mecanismos que permiten dirigir el haz en el espacio según el instrumento utilizado.

El principio fundamental de su funcionamiento se basa en la medición precisa del intervalo que tarda la señal láser en viajar desde el instrumento hasta el objeto y regresar tras su reflexión. A partir de esta información, y en combinación con la determinación de los ángulos de emisión del haz, es posible calcular las coordenadas tridimensionales de millones de puntos que conforman la denominada nube de puntos. Cuando el haz incide sobre una superficie reflectante, parte de la señal regresa al receptor. Mediante distintos métodos de medición, se calcula la distancia (S) entre el escáner y el objeto. Finalmente, a partir de los ángulos de azimut (horizontal) y elevación (vertical) del rayo (α , β), se determinan las coordenadas del punto reflejado (X_p , Y_p , Z_p) en el sistema de referencia del instrumento. (Wu, Yuan, Tang y Tian, 2022).

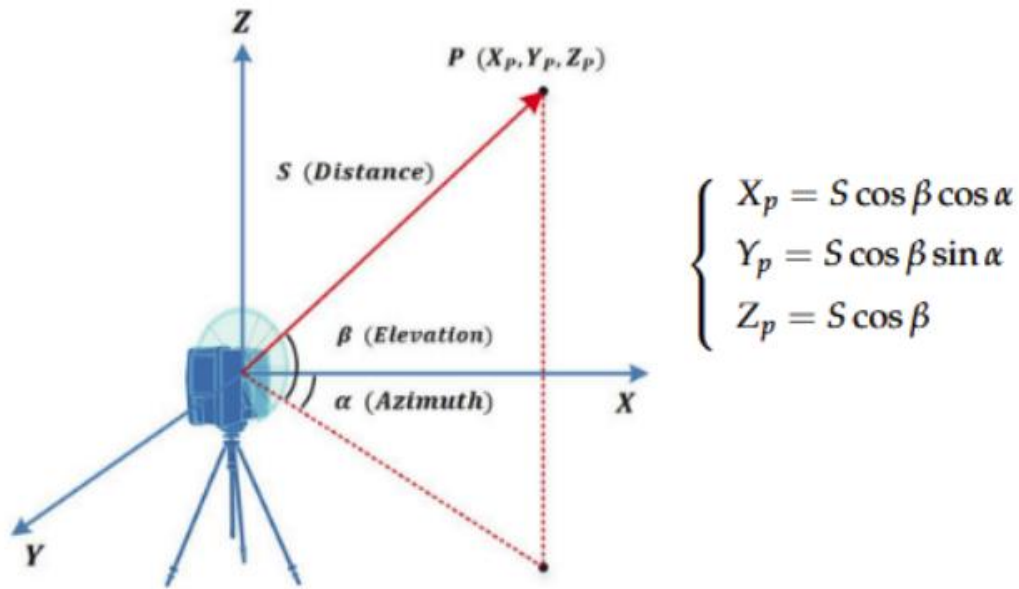


Figura 2: Principio de funcionamiento del TLS. Fuente: Application of terrestrial laser scanning in the architecture, engineering and construction industry. Wu, Yuan, Tang y Tian, 2022

Existen dos métodos principales para determinar la distancia en un TLS. El primero es el método de tiempo de vuelo (Time of Flight, TOF), que calcula la distancia en función del tiempo que tarda un pulso láser en recorrer el trayecto de ida y vuelta. El segundo método es el de comparación de fase, que se basa en la emisión de un haz de radiación láser continua modulada y la medición de la diferencia de fase entre la señal emitida y la reflejada. Este último ofrece gran precisión en distancias cortas, aunque requiere técnicas adicionales para resolver las ambigüedades de ciclo. (Shan & Toth, 2018, p.19).

Para generar un modelo tridimensional del entorno, el TLS incorpora mecanismos de escaneo que permiten desviar el haz láser en diferentes direcciones. Mediante espejos giratorios o prismas se logra el movimiento vertical del haz, mientras que el instrumento rota en azimuth para cubrir el campo horizontal. De esta manera, el escáner registra perfiles sucesivos que,

al integrarse, conforman una nube de puntos densa y detallada, capaz de describir tanto geometrías complejas como superficies amplias.

Los principales componentes de un TLS incluyen la fuente láser, el sistema de emisión y recepción compuesto por lentes, filtros y fotodiodos, el mecanismo de escaneo mecánico que asegura la cobertura espacial, y una unidad de procesamiento que se encarga de calcular las distancias y almacenar los datos. En algunos sistemas móviles, estos elementos se complementan con sensores GNSS e IMU que permiten la georreferenciación directa de las nubes de puntos.

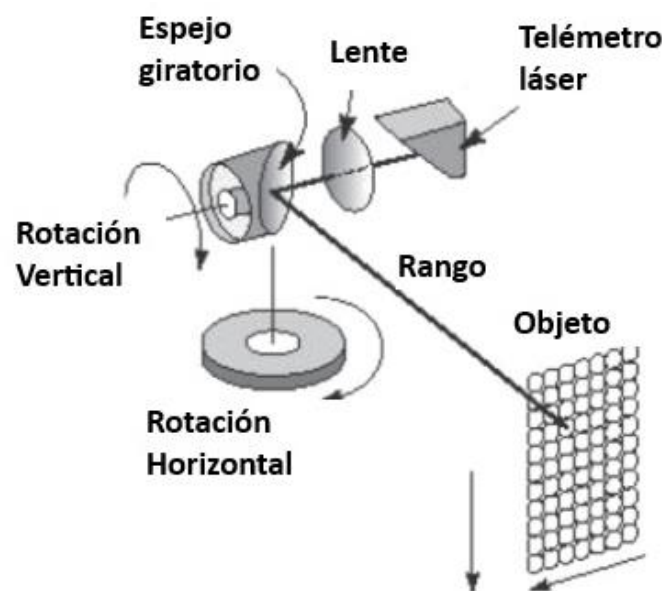


Figura 3: Principio de funcionamiento del TLS. Fuente: Application of terrestrial laser scanning in the architecture, engineering and construction industry. Wu, Yuan, Tang y Tian, 2022

En términos prácticos, los escáneres láser terrestres alcanzan precisiones del orden de milímetros a centímetros, con alcances que varían desde decenas hasta varios cientos de metros. Sin embargo, la calidad de la medición puede verse afectada por factores como la reflectividad de las superficies, el ángulo de incidencia del haz, las condiciones atmosféricas y la divergencia del rayo

(Shan & Toth, 2018). A pesar de estas limitaciones, el uso de longitudes de onda en el rango del infrarrojo cercano, generalmente clasificadas como seguras para la vista, asegura que estos equipos puedan emplearse de manera confiable en aplicaciones topográficas, arquitectónicas e industriales.

Para los autores Wu, Yuan, Tang y Tian (2022) esta tecnología presenta varias ventajas. Una de ellas es la alta densidad de datos en poco tiempo, ya que registra millones de puntos en pocos minutos generando representaciones tridimensionales detalladas, a diferencia de la medición puntual de una estación total o un receptor GNSS, esta captura masiva de datos reduce el tiempo en campo.

Otra ventaja es también la gran cantidad de información que puede obtenerse a partir de los escaneos. Además de las coordenadas tridimensionales, el TLS registra valores de intensidad reflejada y colores RGB.

Otro punto favorable para los autores es que el proceso de medición con escáner láser es no invasivo y sin contacto, lo cual representa una ventaja importante en entornos peligrosos o de difícil acceso. Al no requerir contacto físico con el objeto y se mejora así la seguridad del operador y se minimizan los riesgos.

Finalmente, el TLS proporciona una buena precisión, que puede mejorarse mediante técnicas de ajuste. Aunque la exactitud puntual sea ligeramente inferior a la de los métodos tradicionales, la gran cantidad de puntos capturados permite generar modelos tridimensionales detallados y con alta fidelidad geométrica.

4. Marco Metodológico

4.1. *Láser Escáner 3D Leica RTC360*

El Leica RTC360 es un escáner láser 3D portátil de alta velocidad y precisión, diseñado para maximizar la productividad en aplicaciones tanto en interiores como en exteriores.



Figura 4: Escáner RTC360. Fuente: Página oficial del fabricante.

Forma parte de una solución integral que incluye los softwares Leica Cyclone FIELD 360 y Leica Cyclone REGISTER 360, que permiten un flujo de trabajo desde la captura hasta la entrega de datos.

El RTC360 incorpora la tecnología TruRTC, que permite capturar nubes de puntos de alta resolución e imágenes HDR con alta calidad de datos. Permite escaneo láser 3D rápido, preciso y libre de interferencias.

Tiene un espejo giratorio que permite velocidades de medición altas, con hasta 2 millones de puntos por segundo, lo que da como resultado una duración de escaneo corta.

La precisión de la medición de la distancia del láser se especifica en 1,0 mm + 10 ppm. El ruido de las mediciones es de 0,4 mm a 10 m y 0,5 mm a 20 m.

Tiene 3 posibles configuraciones de resolución de escaneo:

Resolución	Alcance máximo	Duración del escaneo	Escaneo + imágenes
Alta (3mm a 10m)	65 m.	01:42 minutos	02:42 minutos
Media (6 mm a 10 m)	130 m.	00:51 minutos	01:51 minuto
Baja (12 mm a 10 m)	130 m.	00:26 minutos	01:26 minutos

Tabla 1: Configuraciones del escáner RTC360

El RTC 360 utiliza un sistema inercial visual (VIS) para determinar, en tiempo real, la posición relativa y la orientación del escáner cuando se mueve entre diferentes configuraciones. Esta tecnología consta de 5 cámaras VIS específicas, independientes de las cámaras utilizadas para la captura de imágenes HDR, una unidad de medida inercial (IMU) compuesta por acelerómetros y giroscopios, que apoya el componente visual del VIS en la determinación de la posición relativa y los cambios de dirección del escáner cuando se mueve. Los datos de las cinco cámaras VIS y la IMU se fusionan y procesan con algoritmos, que calculan la posición relativa y la orientación del escáner cuando se mueve entre diferentes configuraciones.



Figura 5: Fotografía tomada por el escáner. Fuente: Elaboración propia.

Algunas definiciones necesarias para el uso del equipo y para este trabajo puntualmente son:

Una *configuración* consiste en un escaneo individual y los datos capturados desde esa posición al utilizar el escáner láser. Esto puede incluir fotos tomadas por el escáner y otra información adicional. Se indica con el círculo azul en la figura 6.

Un *enlace* es la unión de dos configuraciones, ya sea por geometría común en la nube de puntos o mediante el uso de objetivos. Se indica mediante una línea que une los iconos de las configuraciones.

Un *conjunto* es donde tenemos 2 o más configuraciones todas vinculadas entre sí en un grupo.

La representación de estas definiciones puede observarse en la Figura 6.

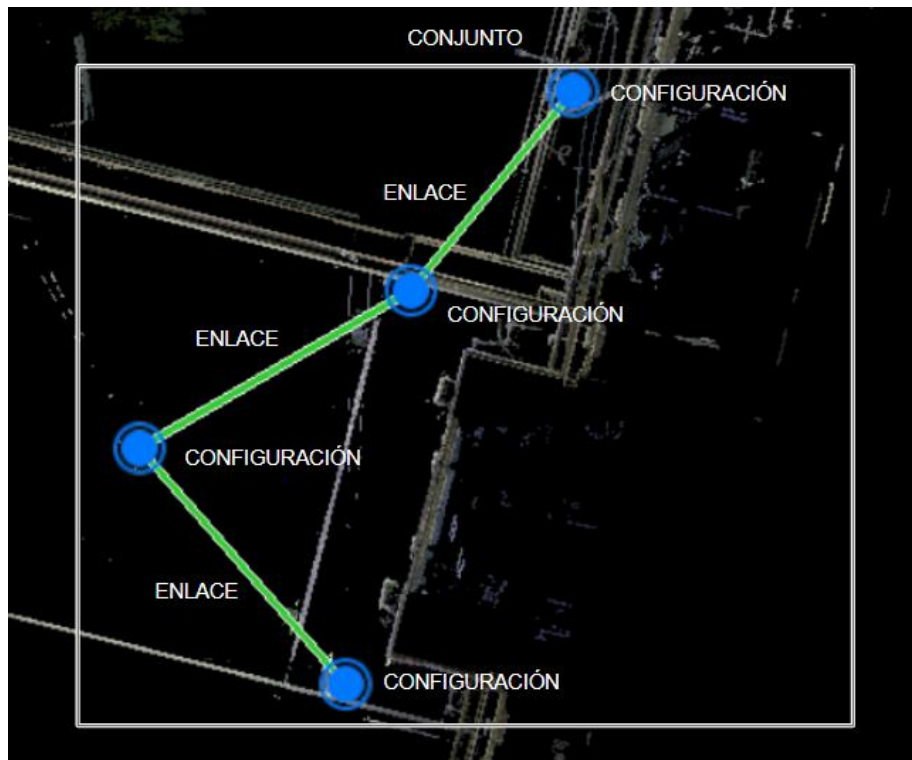


Figura 6: Ejemplo de conjunto de datos. Fuente: Elaboración propia.

El escáner se opera en campo mediante el software *Cyclone FIELD 360*. Es una aplicación para dispositivos móviles que actúa como interfaz para controlar y gestionar los trabajos, permite adjuntar documentos, imágenes, texto, audio y video. Se transfiere una vista previa de todos los datos del trabajo almacenados en el escáner al dispositivo móvil, lo que permite visualizar, verificar y editar los datos.

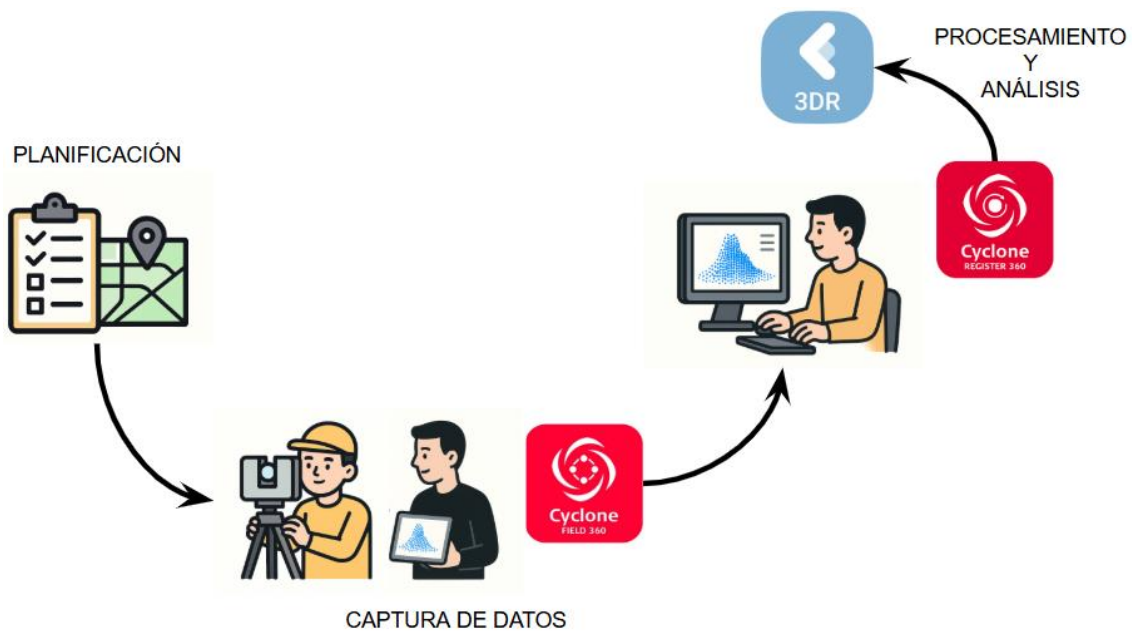


Figura 7: Flujo de trabajo con el escáner y el paquete de softwares. Fuente: Elaboración propia.

Cyclone REGISTER 360 es un software para procesar y registrar datos de los escaneos realizados en campo. Tiene un flujo de trabajo de 4 pasos: importación, optimización, finalización y generación de informe.

En el primer paso el software importa los datos del escáner, tanto sus escaneos como los enlaces de estos, e intenta crear automáticamente otros enlaces y paquetes necesarios para el registro.

El segundo paso es optimizar, que es el paso más importante, donde revisamos y verificamos que todas las configuraciones se han conectado correctamente mediante enlaces, la calidad de los mismos en cuanto a solapamiento y precisión. En esta etapa también se pueden corregir o generar nuevos enlaces que no se pudieron generar automáticamente por el software; esto puede ser visualmente o seleccionando puntos en común entre los escaneos.

Luego de completada esta etapa sigue la de finalización, que consiste en confirmar que el registro ha sido completado de forma satisfactoria luego de ver un resumen general de nuestro trabajo.

Por último, la etapa del informe, donde se genera un archivo PDF con los datos completos del registro: solape de cada enlace, precisión de cada escaneo, capturas de pantalla que se fueron generando en los pasos anteriores, coordenadas de las dianas utilizadas, entre otros. Este archivo final se exporta junto con la nube de puntos en el formato elegido.

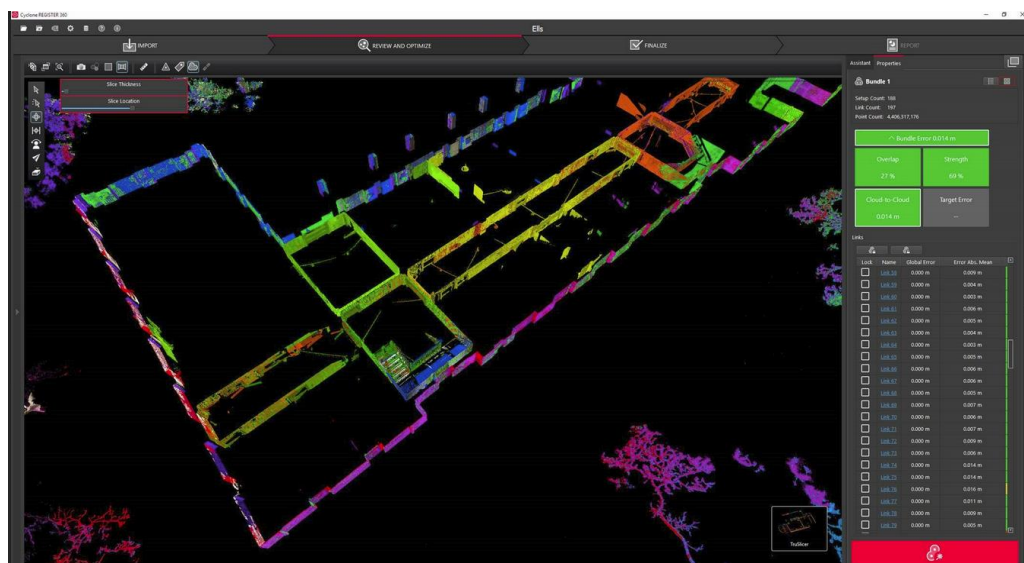


Figura 8: Interfaz Cyclone Register 360. Fuente: Página oficial de Leica.

Cyclone 3DR es un software orientado al post procesamiento avanzado de nubes de puntos. A diferencia de Cyclone REGISTER 360, que se centra en la importación y registro de los datos, Cyclone 3DR permite trabajar sobre las nubes ya registradas para realizar análisis.

Entre sus principales funciones se encuentran la creación de superficies, generación de curvas de nivel, cálculo de volúmenes, comparación de modelos para control de calidad, análisis de verticalidad, así como la

posibilidad de realizar modelado simplificado de estructuras. Además, permite la exportación de resultados en formatos compatibles con software CAD y BIM, facilitando la integración con diferentes flujos de trabajo.

Este software complementa al proceso realizado en REGISTER 360, ya que transforma las nubes de puntos registradas en información procesada y lista para su aplicación.

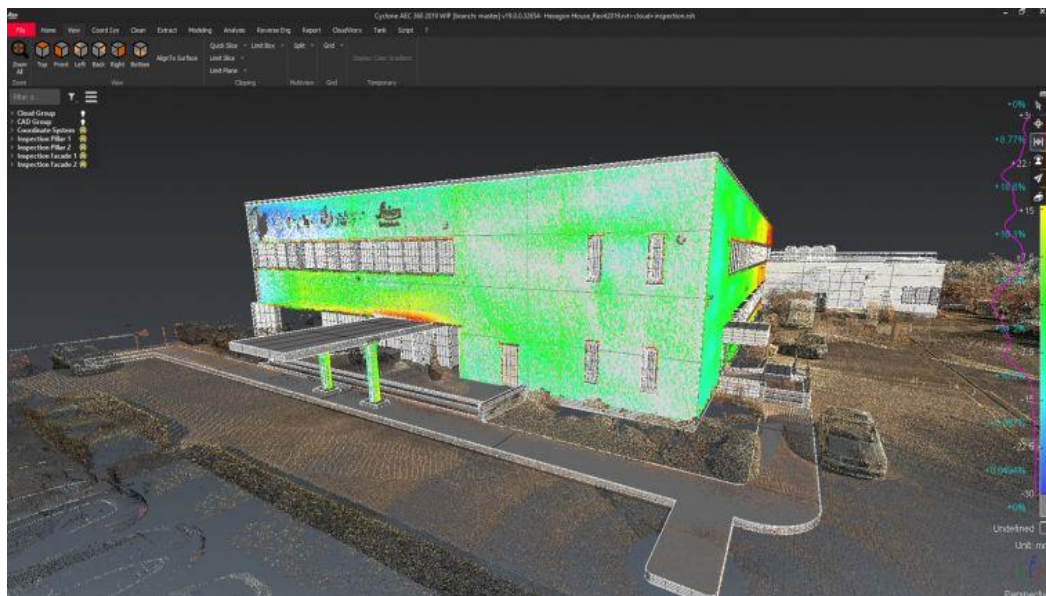


Figura 9: Interfaz Cyclone 3DR. Fuente: Página oficial de Leica.

4.2. *Vuelo LIDAR Montevideo 2024*

La nube de puntos LiDAR utilizada en este trabajo para los techos de la facultad a los que no se tuvo acceso corresponde al vuelo realizado sobre Montevideo en el año 2024, en el marco de una licitación de la Intendencia de Montevideo adjudicada al consorcio GEOIMAGEN – TOPOCART.



Figura 10: Vuelo LiDAR sobre Montevideo. Fuente: Intendencia de Montevideo.

El relevamiento abarcó aproximadamente 600 km², con 32.000 fotografías aéreas, 15.000 millones de puntos LiDAR con hasta siete retornos y una resolución final de hasta 24 puntos por metro cuadrado en la nube clasificada. El vuelo fue ejecutado con un sensor Trimble H68i, operado desde una aeronave equipada además con cámaras RGB e infrarrojas Phase ONE IXU RS1000.

El vuelo se ejecutó entre el 26 de octubre y el 15 de noviembre de 2024, a 600 metros de altura, distribuyéndose en nueve jornadas de relevamiento dentro de una ventana horaria comprendida entre las 10:00 y las 15:00 horas, a fin de asegurar condiciones óptimas de iluminación.

A la par de la información fotogramétrica, los datos LiDAR empleados en este proyecto fueron sometidos posteriormente a un denso proceso de control de calidad integral. El control para las nubes de puntos incluyó verificaciones posteriores al relevamiento aéreo, tales como la revisión de fecha y horarios

de captura, la comprobación de la completitud de la cobertura, control de la densidad de la densidad de nube de puntos por metro cuadrado, controles de clasificación de la nube de puntos; y la exactitud posicional de las mismas.

Uno de los controles principales fue la evaluación de la exactitud posicional, tanto horizontal como vertical, de la nube de puntos y del MDS. Para ello se relevó una red de 43 puntos distribuidos homogéneamente en el departamento, medidos con equipamiento GNSS por método diferencial estático. Las coordenadas obtenidas se compararon con las derivadas de la nube de puntos conforme al estándar NSSDA, obteniéndose una precisión horizontal de 0,094 m y una precisión vertical de 0,103 m, ambos valores para un nivel de confianza del 95 %.

5. Metodología

5.1. *Escaneo terrestre*

Se puede dividir el escaneo en tres grandes etapas: planificación, captura de datos en campo y procesamiento y análisis.

Para la primera etapa, la de planificación, se realizó un reconocimiento del área de trabajo y se definió una estrategia de captura que asegure una cobertura completa de la zona a relevar. Ésta fue la etapa más corta debido a que ya se conocía la edificación. En esta etapa lo que más tiempo de

dedicación llevó fue la manipulación del equipo y sus licencias para luego llevar a la práctica lo aprendido en los diferentes cursos.

Se estableció qué partes del edificio de la facultad incluiríamos y cuáles no. Se relevó el cuerpo sur, norte y principal. En esta etapa también se definió el recorrido, así como los puntos donde se realizarán las configuraciones para asegurar una superposición correcta de datos.



Figura 11: Edificios seleccionados para el relevamiento. Fuente: Elaboración propia.

Sin embargo, en la práctica el flujo de trabajo no se desarrolló de manera estrictamente lineal como el planteado teóricamente, sino que la planificación debió ajustarse durante la captura de datos por diversos motivos.

Durante el relevamiento surgieron diversas situaciones que exigieron ajustes sobre la marcha. En primer lugar, el movimiento constante de personas y vehículos en el estacionamiento generó sombras en la nube de puntos y reducían la superposición. En la figura 12 se muestra un ejemplo, donde parte de la construcción queda oculta por vehículos, indicado con los recuadros rojos durante el escaneo.



Figura 12: Obstrucción parcial por vehículos. Fuente: Elaboración propia.

Además, al no contar con experiencia previa en la planificación de un escaneo de esta magnitud, en las primeras jornadas se presentaron dificultades para estimar adecuadamente el solape necesario entre estaciones, lo que hizo necesario regresar a campo en varios sectores para incorporar configuraciones intermedias y así mejorar la continuidad del registro. También se encontraron imprevistos propios del sitio, como el acceso a terrazas donde inicialmente se desconocía su disposición y los elementos presentes, por ejemplo, se encontraron paneles solares que limitaron ciertos ángulos de captura.

Estos ajustes fueron menores, pero reflejan que en la práctica es difícil realizar una planificación perfecta desde el inicio, ya que las condiciones reales del

entorno suelen obligar a modificar la estrategia planteada para garantizar la calidad final del relevamiento.

La captura de datos abarcó los tres cuerpos del edificio de la Facultad de Ingeniería (norte, sur y principal), incluyendo todas las terrazas a las que se tuvo acceso.



Figura 13 Etapa de captura de datos en el cuerpo norte del edificio. Fuente: Elaboración propia.

Se utilizaron 53 estaciones con configuración de resolución intermedia y captura fotográfica para darle color a la nube de puntos. El escáner permite tres niveles de resolución, y optamos por un balance entre calidad y tiempo operativo, trabajamos entonces con el nivel medio de resolución.

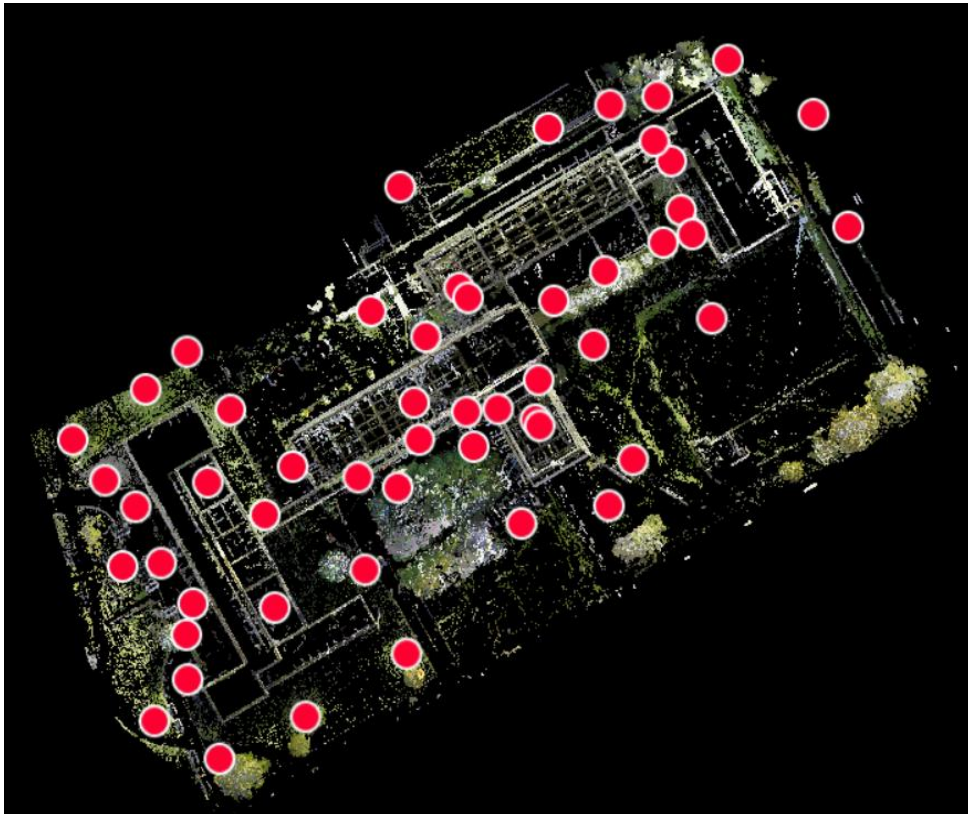


Figura 14: Distribución de configuraciones de escaneo. Fuente: Elaboración propia.

El relevamiento se dividió en cinco jornadas, debido a distintos factores como solapes insuficientes entre configuraciones; problemas con las licencias del equipo; o la necesidad de coordinar el acceso a determinadas zonas restringidas, como las terrazas y el sector del túnel. En condiciones normales este tipo de relevamiento podría haberse realizado con un menor número de jornadas, pero las circunstancias mencionadas anteriormente hicieron necesario extender el trabajo en campo.

La incorporación de configuraciones adicionales en las terrazas permitió registrar tanto los planos de piso superiores como las porciones de paredes que quedaban fuera del campo de visión del escáner en las posiciones a nivel de suelo.

En cuanto a los enlaces entre configuraciones, el escáner permite realizar la unión preliminar de los distintos escaneos directamente en campo mediante el uso de una tablet vinculada al equipo mediante el software *Cyclone FIELD 360*, lo que brinda una visualización inmediata del avance del relevamiento. Esta funcionalidad resulta especialmente útil para verificar la cobertura y continuidad de los escaneos en tiempo real. Sin embargo, si bien estas alineaciones automáticas ofrecen una vinculación aceptable, el refinamiento de los enlaces puede mejorarse durante el procesamiento posterior en gabinete.

A través del uso del software Leica Cyclone Register 360, es posible optimizar los ajustes, corregir pequeñas desviaciones y mejorar la precisión global de la nube, logrando una integración más sólida y confiable entre las distintas estaciones. Se realizan estas mejoras utilizando la funcionalidad de alineación automática con verificación manual o puntos en común entre escaneos.

5.2. *Registro de nube de puntos*

Para mejorar la precisión de los enlaces entre escaneos, Cyclone Register 360 ofrece distintas estrategias. El software puede realizar un registro automático utilizando datos de posición adquiridos en campo (por ejemplo, mediante el sistema VIS del RTC360 o el registro previo en el software Field 360 de la tablet usada en campo). El software cuenta con la función *AutoCloud*, que permite realizar un registro automático basándose en la coincidencia de superficies solapadas entre nubes de puntos.

En los casos en que esta alineación automática no sea suficiente, es posible realizar una alineación manual mediante distintas herramientas. Una opción consiste en el alineamiento visual que permite mover y rotar manualmente una nube respecto a otra para lograr una superposición aproximada, como se muestra en las figuras 15 y 16, correspondientes a las vistas superior y lateral, respectivamente.

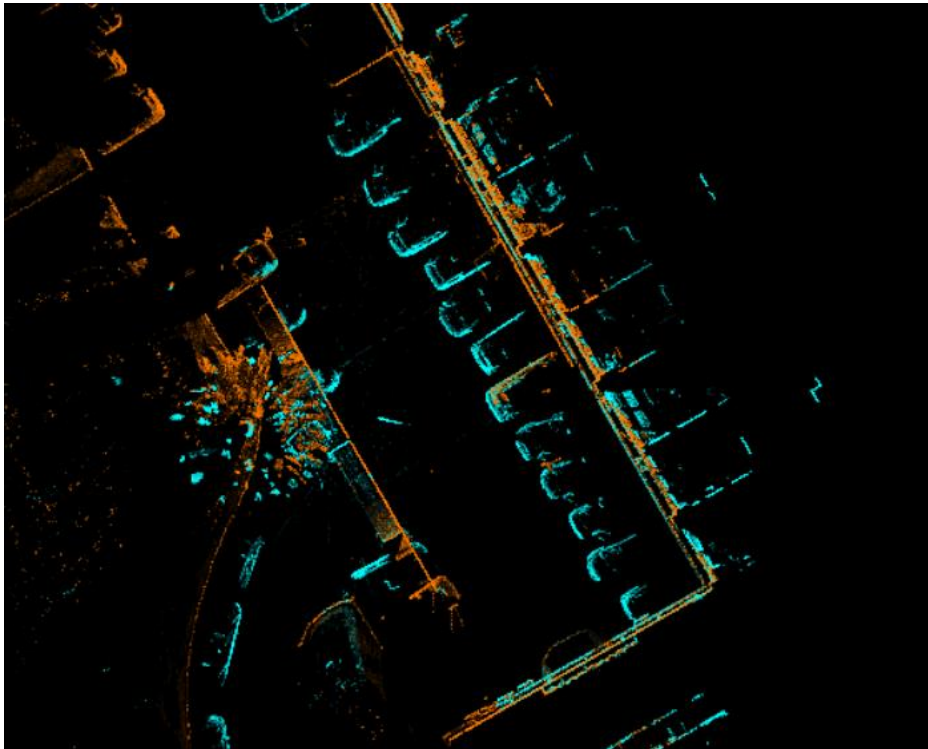


Figura 15: Alineación visual vista superior. Fuente: Elaboración propia.

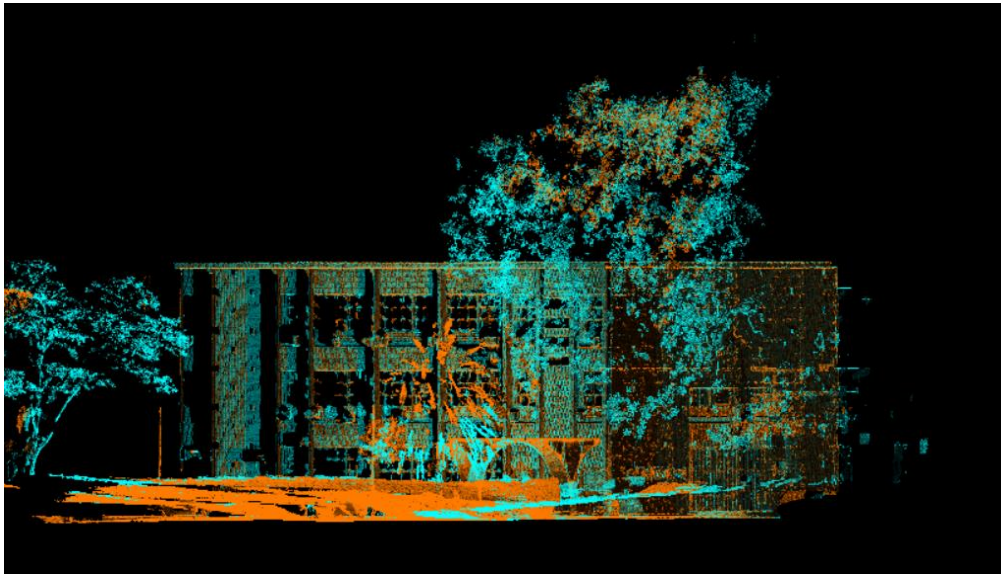


Figura 16: Alineación visual vista lateral. Fuente: Elaboración propia.

Otra función para esta tarea, la función de vista dividida facilita visualizar simultáneamente dos escaneos, y alinear los datos de las dos configuraciones al seleccionar al menos tres puntos que se correspondan en ambas nubes. Si se utilizan dianas, el software puede reconocer automáticamente estas marcas y realizar la correspondencia entre escaneos de forma rápida y exacta, tal como se observa en la Figura 17.

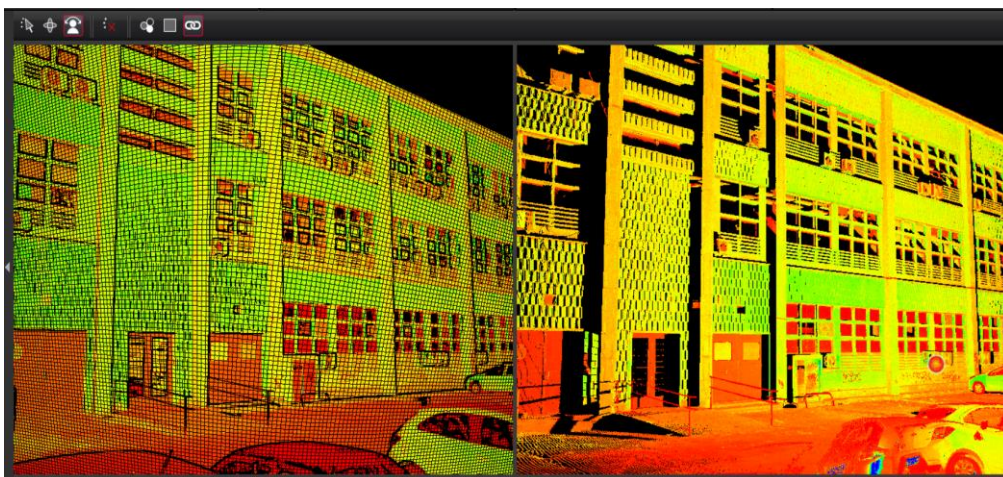


Figura 17 Alineación mediante puntos en común. Fuente: Elaboración propia.

Durante el proceso de revisión y optimización, el software analiza la calidad de los enlaces generados entre los distintos escaneos y los codifica cromáticamente según su error de ajuste. Por defecto, los enlaces se representan en color verde cuando el error es bajo, amarillo cuando es moderado, y rojo cuando excede el umbral aceptable, aunque estos valores pueden ser configurados por el usuario en los parámetros del proyecto. Esta codificación facilita la identificación de enlaces problemáticos que deben ser revisados o eliminados antes de finalizar el registro. En la Figura 18 se ejemplifica la representación de los enlaces en función de su error.

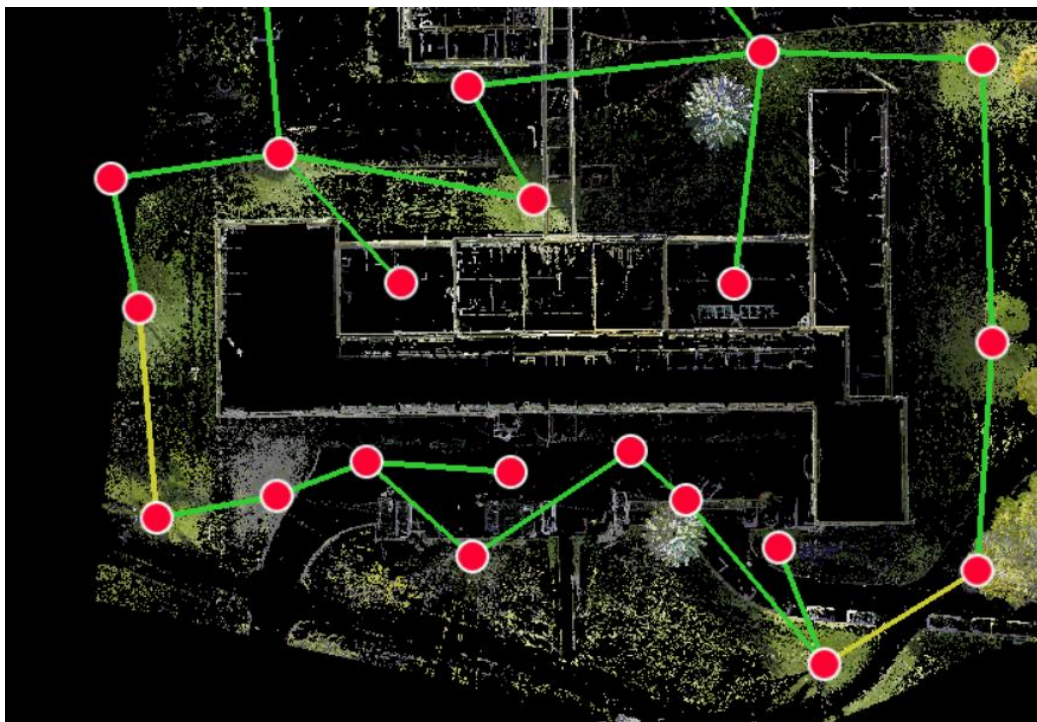


Figura 18: Distinta calidad de enlaces. Fuente: Elaboración propia.

Limpieza de la nube de puntos

Una vez realizado el registro de los escaneos y unificar la nube de puntos, se procede a su limpieza con el fin de eliminar todos los datos que no forman parte del área de estudio, y que existen gracias al barrido de 360 grados del

equipo. Esta etapa es fundamental para reducir el ruido y facilitar el análisis posterior.

El ruido puede generarse por diversos factores, como objetos temporales presentes durante el levantamiento como personas, vehículos o mobiliario, vegetación, o bien por las características físicas de algunos materiales.

El software ofrece diversas herramientas que permiten realizar esta depuración. La forma más sencilla de limpieza consiste en seleccionar un área de la nube de puntos y eliminar todos los datos contenidos en ella, utilizando herramientas como selección rectangular, poligonal o libre. Este método permite remover rápidamente elementos no deseados, pero puede causar problemas cuando no se controla. Si se aplica sin restricciones espaciales, puede eliminarse también información relevante ubicada detrás o en distintos niveles del modelo.

Por ejemplo, si se quiere eliminar la silla de la figura 16 seleccionando un polígono, se van a eliminar también los puntos en la pared y el piso que están dentro del área seleccionada. Esta herramienta fue la utilizada en la limpieza más robusta, donde se eliminaron los puntos fuera del área de interés con una vista cenital.

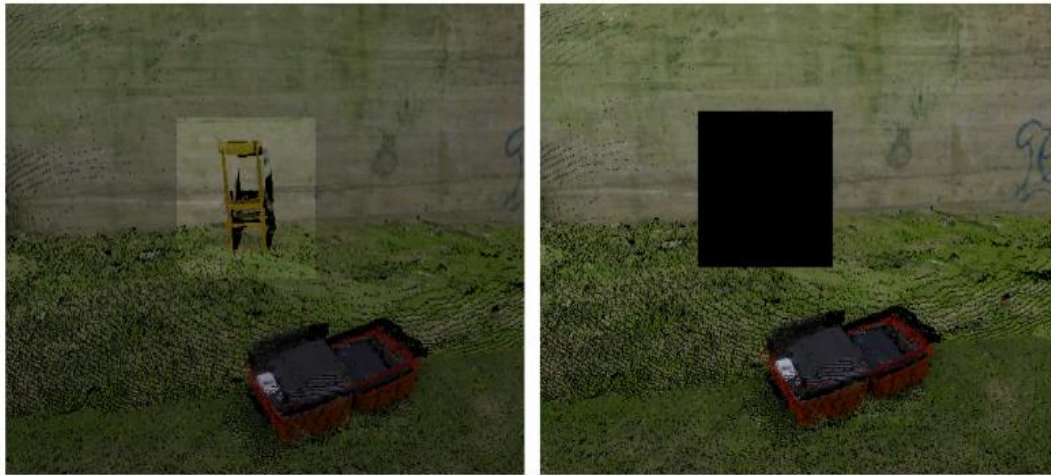


Figura 19: Limpieza de nube por polígonos. Fuente: Elaboración propia.

Para evitar incluir datos importantes en esa selección, se utiliza la herramienta de caja límite (Limit Box). Esta permite aislar visualmente un volumen específico de la nube de puntos, restringiendo la visualización y edición a una región determinada. De este modo, la caja protege el resto de los datos y permite realizar la limpieza de forma más precisa y controlada, reduciendo el riesgo de eliminar información útil ubicada fuera del área de interés.

En el caso de la silla, se crea una caja límite que abarcaba únicamente esa zona como se puede ver en la figura 17. Con la caja activa, se visualizan solo los puntos contenidos dentro del volumen.



Figura 20: Limpieza de nube de puntos por limit box. Fuente: Elaboración propia.

Luego, se selecciona un polígono alrededor de la silla y se eliminan sus puntos. Finalmente, se desactiva la caja límite, obteniendo la nube de puntos sin la silla y sin haber afectado el fondo. Esta herramienta fue la que más se utilizó durante la limpieza por qué permitía mantener el resto de la nube eliminando solamente los volúmenes de obstáculos que no eran parte del edificio.



Figura 21: Resultado luego de limpieza de nube. Fuente: Elaboración propia.

Otra herramienta es la opción de detectar superficies lisas. Esta función permite identificar superficies continuas, como suelos o muros, asignándoles un color distinto. Los objetos que sobresalen de estas superficies, como mobiliario, vehículos o personas, son marcados en rojo y pueden ser eliminados selectivamente.

Esta técnica resulta útil cuando se desea conservar el plano del suelo y remover elementos que no son de interés. Como en el ejemplo anterior, se selecciona el suelo como superficie lisa y la silla se puede eliminar sin modificar el suelo.



Figura 22: Limpieza de nube por superficies. Fuente: Elaboración propia.

De forma similar, la herramienta de detección de objetos en movimiento permite identificar diferencias entre escaneos consecutivos causadas por elementos como personas o vehículos que se desplazaron durante la toma. El software detecta estos cambios y resalta los puntos correspondientes en color rojo, permitiendo su eliminación sin comprometer los puntos del fondo.

En la práctica, luego del procesamiento de la nube de puntos, donde se llevó a cabo una alineación manual inicial, seguida por los procesos de ajuste y optimización automática ofrecidos por la plataforma, se procedió a su depuración con el objetivo de aislar exclusivamente el cuerpo edilicio de la Facultad de Ingeniería, eliminando elementos irrelevantes o interferencias como autos, personas, construcciones frentistas a la facultad, etc.

Para ello, se aplicaron diversos métodos de limpieza, entre los que se incluyeron herramientas automatizadas como la detección de superficies planas y la identificación de objetos en movimiento, así como procedimientos manuales mediante la definición de polígonos los cuales permitieron seleccionar y suprimir regiones específicas no deseadas. Este trabajo fue clave para garantizar una nube de puntos consistente y centrada en el objeto de estudio, eliminando ruido proveniente del entorno, personas en movimiento y otros elementos urbanos fuera del edificio.

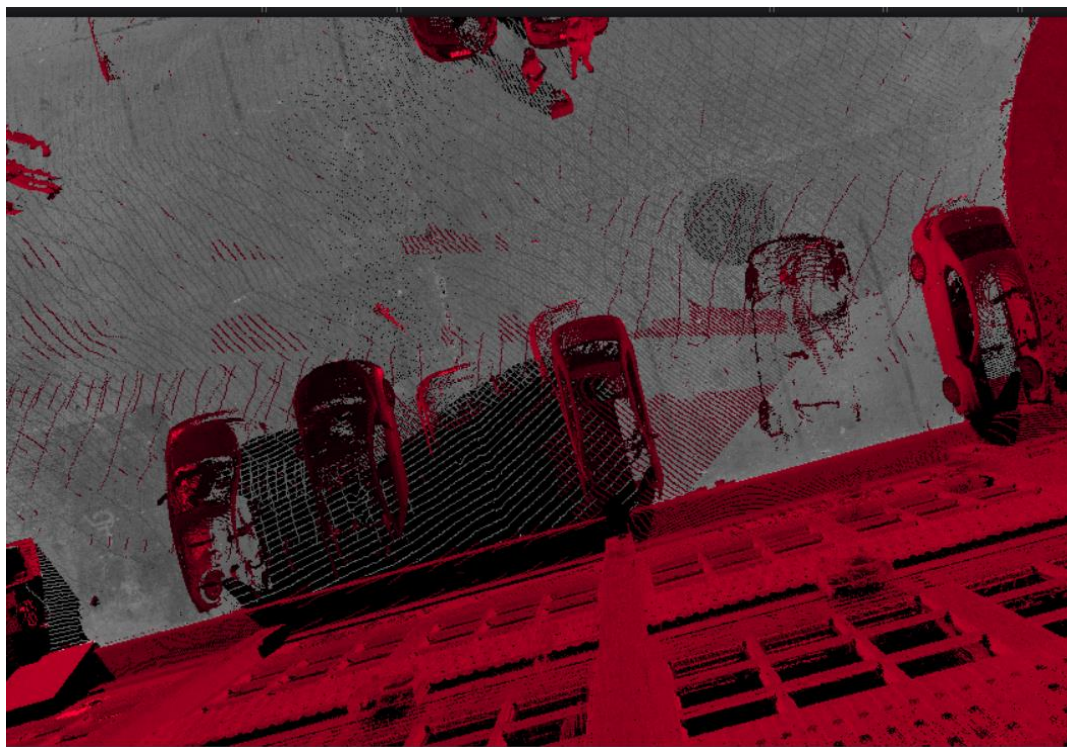


Figura 23: Detección automatizada de autos en la nube de puntos. Mediante método de superficie lisa. Fuente: Elaboración propia.



Figura 24: Estacionamiento en ala sur tras limpieza de la nube de puntos. Fuente: Elaboración propia.

Luego del proceso de limpieza, la nube final quedó compuesta por 1.178.732.914 puntos, un 6.43% menos de la nube original. Este porcentaje podría haber sido mayor, eliminando puntos sobre la cancha, o el parking, pero para la presente etapa no contábamos con las deficiencias que tuvo el hardware más adelante para los siguientes procesos.

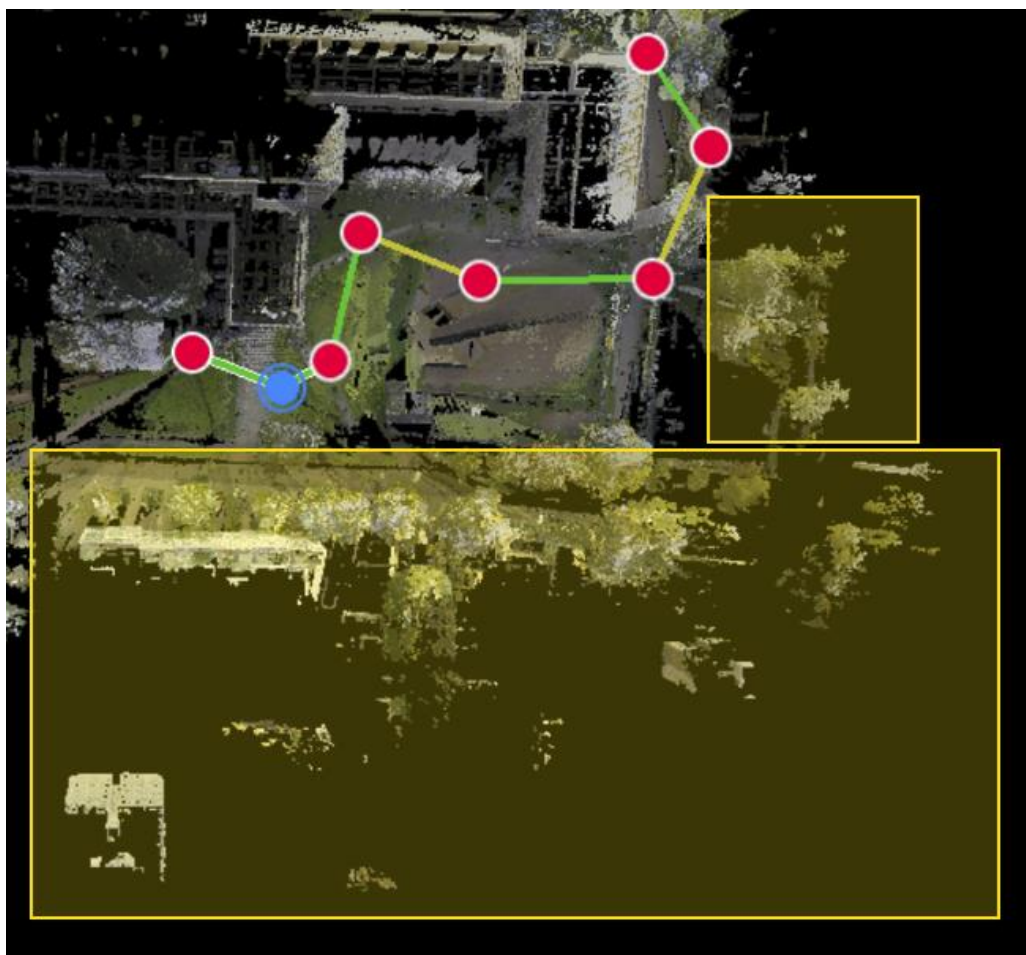


Figura 25: Ejemplo de zonas a limpiar. Fuente: elaboración propia

Al finalizar estos procesos, se genera en el software antes de exportar la nube de puntos, un informe donde se detalla la información general de la nube de puntos: cantidad de escaneos, cantidad de enlaces, calidad posicional de los escaneos, solape entre escaneos enlazados. Adicionalmente a este informe se le pueden agregar una foto carátula y capturas de pantalla que se pueden ir obteniendo desde el software para dejar registrado los distintos pasos seguidos (ver Anexo).

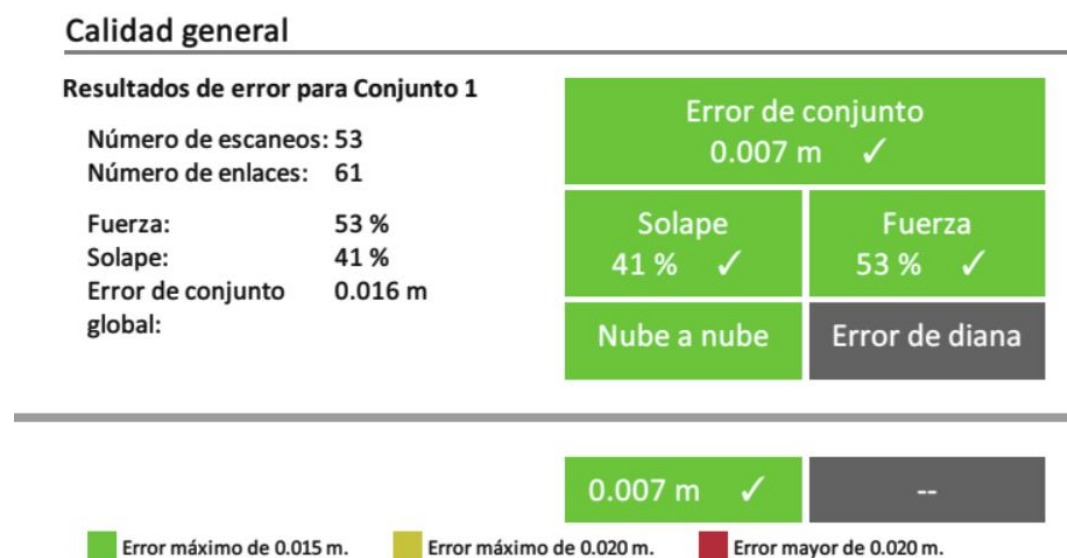


Figura 26: Resumen del informe generado. Fuente: Elaboración propia.

Una vez finalizados los procesos de alineación y limpieza, y con la nube de puntos consolidada, se procedió a la exportación de los escaneos con el objetivo de continuar el trabajo en el software Leica Cyclone 3DR, particularmente para realizar mediciones, integrar los datos del vuelo LiDAR y modelar el edificio de facultad. Sin embargo, al importar los 53 archivos correspondientes al relevamiento completo, el software presentó dificultades de rendimiento: el equipo informático se volvía extremadamente lento, llegando incluso a detener su funcionamiento, lo que impidió seguir trabajando con normalidad.

Ante esta limitación técnica, se optó por trabajar únicamente con los escaneos correspondientes al cuerpo sur del edificio (resaltado en la figura 27 en amarillo) cuya carga y procesamiento sí resultaron viables.



Figura 27: Cuerpo sur del edificio seleccionado en amarillo. Fuente: Elaboración propia.

Previo a la exportación se realizó la georreferenciación de la nube de puntos a un sistema local, primero se identificaron puntos reconocibles en la nube, los cuales se consideraron adecuados para actuar como referencias. Estos puntos fueron creados directamente en Cyclone Register como puntos de control. Posteriormente estos puntos fueron medidos con la estación total, obteniendo sus coordenadas. Una vez cargadas estas coordenadas en el software, se realizó la correspondencia entre tres de los puntos de control y sus respectivas coordenadas.

La estación utilizada fue la Trimble S5.

5.3. *Integración con datos LiDAR aéreos*

Durante el relevamiento, la mayoría de las configuraciones se realizaron a nivel del suelo o en terrazas accesibles. Si bien esta estrategia permitió cubrir la mayor parte del edificio, las zonas más elevadas y los sectores con cubiertas escalonadas quedaron fuera del rango visual del equipo. Esta limitación se debe al principio de funcionamiento de los TLS, que requieren línea de visión sin obstáculos y no pueden registrar superficies ocultas detrás de otros elementos.



Figura 28: Fotografía del equipo resultante de la configuración. Fuente: Elaboración propia.

En la figura 28 se observa, por ejemplo, cómo la proximidad del escáner a un muro impide registrar parte de las paredes de la terraza y, en la figura 29 se observan los vacíos que generó.



Figura 29: Fotografía del equipo resultante de la configuración. Fuente: Elaboración propia.

Por esa razón, para completar las paredes y el piso de la terraza se realizaron nuevas configuraciones accediendo a las terrazas como se observa en la figura 30.

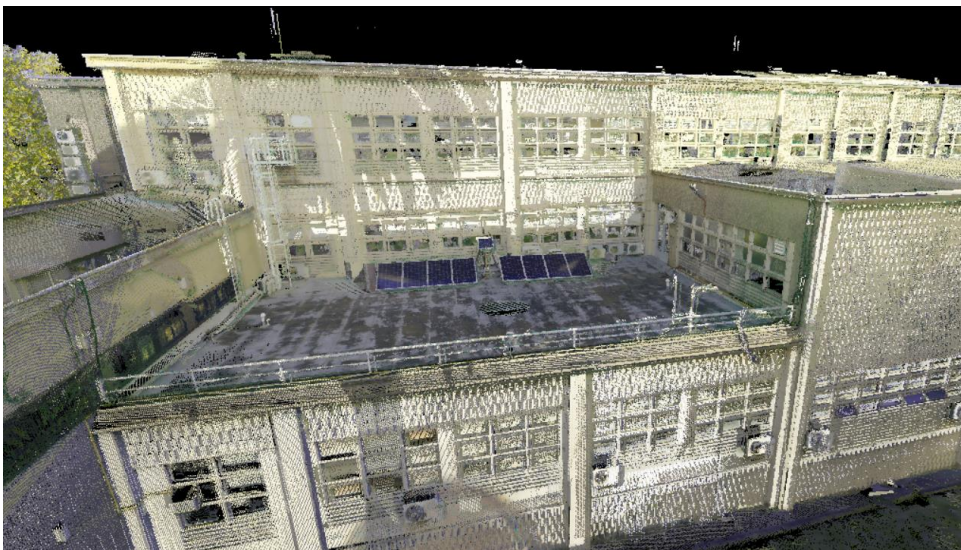


Figura 30: Resultado de la nube de puntos en la misma zona luego de importar configuración en la terraza. Fuente: Elaboración propia.

Esto permitió mejorar parcialmente la cobertura, aunque persistieron vacíos en sectores altos y de difícil acceso.



Figura 31: Zonas incompletas inaccesibles. Fuente: Elaboración propia.

La observación de estas zonas incompletas permitió reconocer la conveniencia de integrar una fuente de datos aérea, que aportará una perspectiva cenital complementaria al escáner. De esta manera, la combinación de ambas capturas —terrestre y aérea— se planteó como una estrategia para obtener un modelo más continuo y completo del edificio, aprovechando así, las fortalezas de cada técnica la cobertura del RTC360 en niveles inferiores, y la cobertura global del LiDAR aéreo sobre las cubiertas. Esta integración no sólo facilitaría información en las terrazas inaccesibles, sino que también permitiría mejorar el modelo tridimensional que se pensaba realizar en la siguiente etapa.

Inicialmente, se estudió la idea de complementar el relevamiento terrestre con un vuelo LiDAR realizado con el dron perteneciente al Instituto de Agrimensura. Sin embargo, no fue posible coordinar con un piloto habilitado que pudiera llevar a cabo el vuelo en las fechas previstas, por lo que esta etapa debió postergarse.

Coincidentemente, durante el desarrollo del proyecto se hicieron públicos los datos LiDAR correspondientes al vuelo realizado por la Intendencia de Montevideo en 2024. Este conjunto de información, generado recientemente y con una buena densidad de puntos, representó una alternativa viable para complementar el relevamiento terrestre, permitiendo incorporar una visión aérea de toda la zona de estudio y cubrir las áreas inaccesibles desde el nivel del suelo.

Al incorporar ambos conjuntos de datos se observó inicialmente una gran separación espacial dentro del entorno del software, producto de sus distintos sistemas de referencia. Los datos del vuelo LiDAR estaban referidos a SIRGAS ROU98 y expresados en coordenadas UTM (huso 21S). En cambio, la nube generada con el escáner terrestre se encontraba en un sistema de coordenadas local definido para el relevamiento

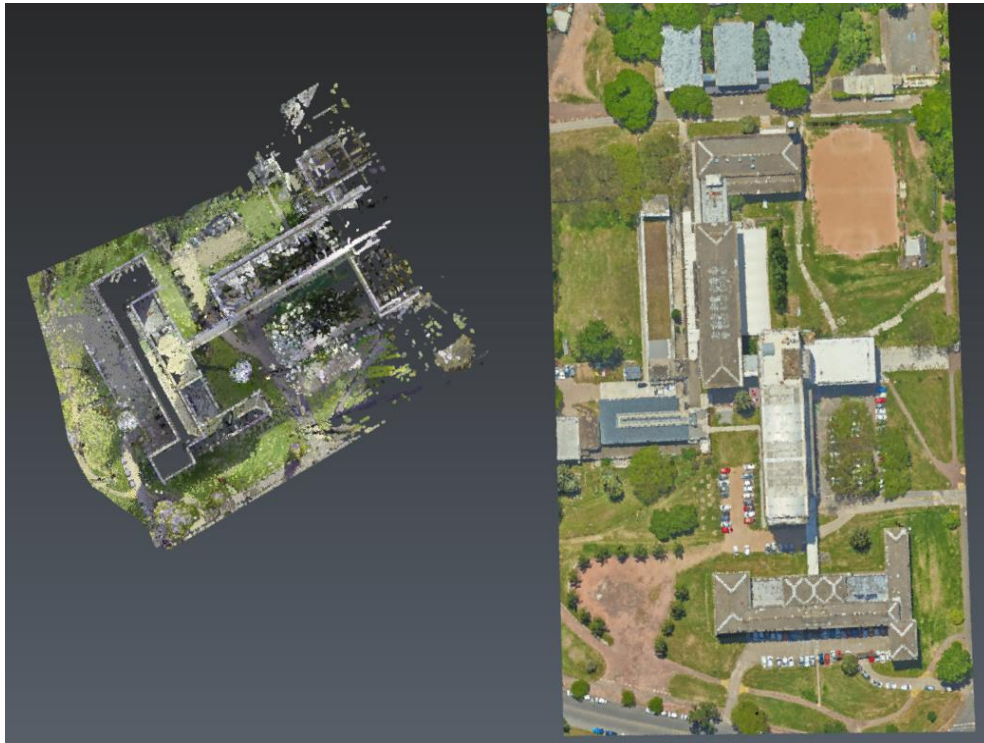


Figura 32: Parte de nube de puntos del ala sur a la izquierda - parte de nube de puntos del vuelo LiDAR a la derecha. Fuente: Elaboración propia.

Esto dificultaba su empalme manual. Para resolverlo, trasladamos la nube correspondiente al vuelo de forma aproximada, acercándola a la nube del cuerpo sur. Se decidió recortar la nube a un área un poco más extensa que el propio cuerpo para facilitar la obtención de puntos en común entre ambos conjuntos de puntos.

Para realizar la integración entre la nube del escaneo terrestre y la nube del vuelo, se seleccionaron 4 puntos ubicados en el suelo.

Debido a que no existían marcas físicas específicas visibles en ambos levantamientos, se utilizaron elementos presentes como intersecciones de caminos y cambios de color (por ejemplo, baldosas claras alternadas con baldosas oscuras).

En el escaneo terrestre estos detalles se encontraban muy bien definidos debido a su alta resolución y precisión. Sin embargo, en la proveniente del vuelo, con una densidad de hasta 24 puntos por metro cuadrado, estos mismos elementos se observaban con menor nivel de detalle, dificultando la identificación precisa del punto correspondiente.

Aun así, los cuatro puntos seleccionados fueron suficientes para obtener una alineación coherente entre ambas nubes, con errores residuales consistentes con la diferencia de precisión entre ambas fuentes (milimétrica en el escaneo terrestre y centimétrica en el vuelo).

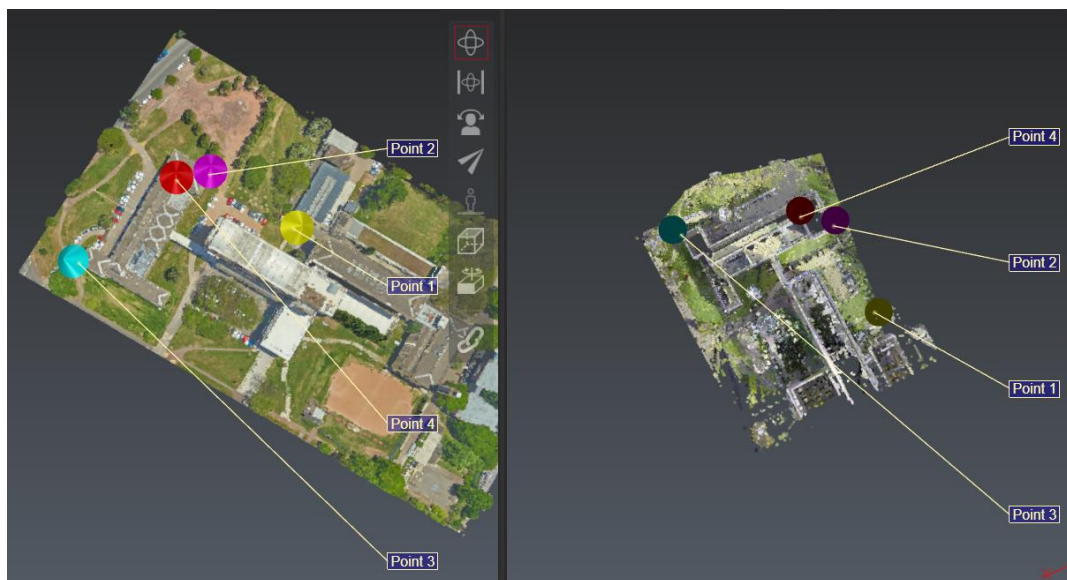


Figura 33: Puntos en común para la unión de ambas nubes de puntos. Fuente: Elaboración propia.

Punto	ΔX (m)	ΔY (m)	ΔZ (m)	Distancia total (m)
1	-0.036	-0.052	0.026	0.068
2	0.005	-0.072	-0.011	0.073
3	0.013	0.068	-0.002	0.070
4	0.019	0.056	-0.013	0.060

Tabla 1: Puntos utilizados para la unión de nube generada con escáner terrestre y vuelo.

Fuente: Software Cyclone 3DR.

Las diferencias (ΔX , ΔY y ΔZ) representan las desviaciones entre las coordenadas obtenidas en la nube generada mediante el relevamiento terrestre y las coordenadas resultantes de la transformación aplicada sobre la nube del relevamiento aéreo.

Las distancias totales, comprendidas entre 0,060 m y 0,073 m, corresponden al error asociado a cada uno de los puntos utilizados en la integración. Estos valores son coherentes con la naturaleza de ambas fuentes: los puntos seleccionados se encuentran claramente definidos en la nube del escáner terrestre, mientras que en la nube proveniente del vuelo su identificación es menos precisa debido a su menor resolución.

En este contexto, los errores obtenidos son esperables y adecuados para lograr una integración geométrica fiable entre ambas nubes de puntos.

Este método fue el único posible debido a la imposibilidad de realizar una georreferenciación mediante coordenadas conocidas o puntos de apoyo, por la diferencia temporal entre ambos trabajos de campo. Si bien este tipo de integración no permite garantizar una precisión absoluta en la superposición de ambas fuentes, resulta adecuada para una evaluación visual y cualitativa de la compatibilidad entre las nubes de puntos.



Figura 34: Resultado luego de integradas las nubes. Fuente: Elaboración propia.



Figura 35: Resultado luego de integradas las nubes. Fuente: Elaboración propia.

5.4. *Modelado 3D*

Se intentó realizar una malla tridimensional del edificio a partir de la nube de puntos generada, utilizando el software Cyclone 3DR. Sin embargo, el proceso presentó diversas limitaciones asociadas principalmente al hardware disponible y a la capacidad de manejo de grandes volúmenes de datos del equipo. En el anexo del presente trabajo se pueden observar las especificaciones mínimas requeridas para el hardware y las del equipo con el que finalmente realizamos los procesamientos.

El software permitió generar superficies parciales a partir de la nube, pero el intento de modelar la totalidad del edificio resultó fallido debido a la imposibilidad de crear *breaklines* previo a generar la superficie y a la lentitud del proceso. Estas *breaklines* son líneas de quiebre que delimitan bordes o intersecciones entre planos y resultan fundamentales para definir correctamente los contornos de las fachadas y las discontinuidades geométricas. Cabe destacar que la nube de puntos del cuerpo sur y sus techos tiene aproximadamente 100 millones de puntos.

A pesar de estas limitaciones, luego de muchos intentos fallidos, se logró obtener una superficie del cuerpo sur del edificio. El resultado obtenido, como se puede observar en la figura 36, no se pudo considerar aceptable desde el punto de vista geométrico ni visual. La malla resultante presentó deformaciones evidentes, con zonas que deberían ser verticales u horizontales que en el modelado no lo eran. En resumen, el modelo no reproduce fielmente la morfología arquitectónica del edificio ni cumple los

criterios mínimos de precisión esperables para un producto tridimensional derivado de una nube de puntos.

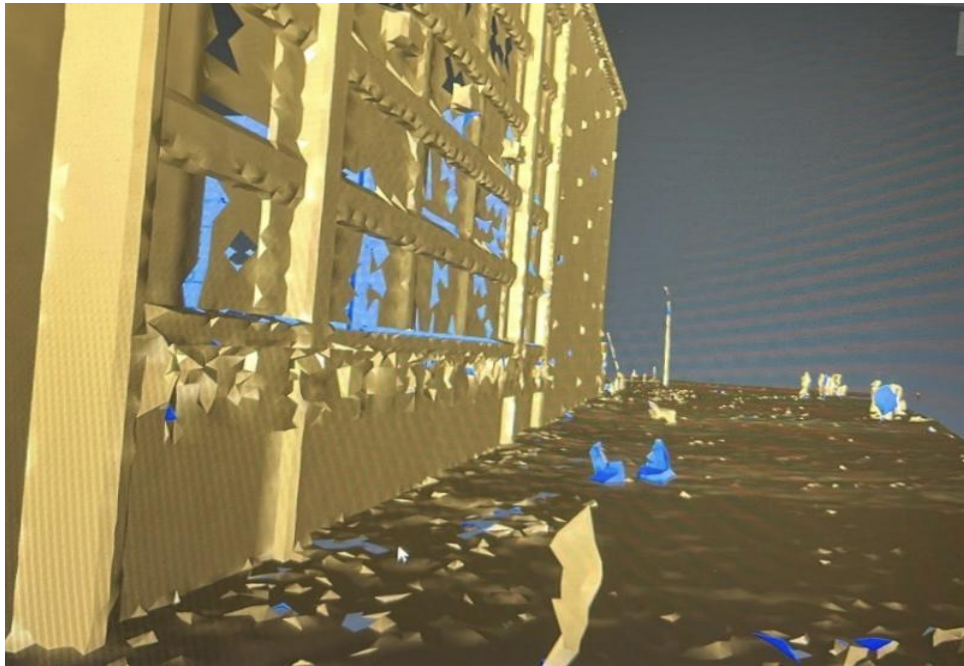


Figura 36: Resultado de la superficie. Fuente: Elaboración propia.

Este proceso evidenció que, para generar modelos tridimensionales de calidad, es necesario disponer de equipos con mayor capacidad de procesamiento y memoria RAM, así como planificar los escaneos con posiciones elevadas o complementarlos con información aérea (por ejemplo, LiDAR o fotogrametría) para cubrir las partes superiores de la estructura.

Cabe aclarar que inicialmente se intentó procesar los datos del trabajo utilizando nuestras computadoras personales, pero el volumen de datos superó ampliamente la capacidad de ambas, imposibilitando incluso la carga completa de los escaneos. Finalmente, el Instituto de Agrimensura nos proporcionó una laptop que fue la que se utilizó para procesar los datos de campo. Si bien esta máquina posibilitó ejecutar las tareas básicas, tampoco alcanzaba las especificaciones mínimas recomendadas por el fabricante para

el uso de los softwares, por lo que los tiempos de procesamiento fueron muy prolongados y las operaciones más exigentes resultaron limitadas.

5.5. *Comparación con estación total*

La finalidad principal de esta comparación fue analizar si los resultados obtenidos mediante el escáner láser terrestre pueden considerarse equivalentes, en términos de precisión y confiabilidad, a los relevamientos tradicionales realizados con estación total.

El objetivo no fue únicamente contrastar valores numéricos, sino evaluar la posibilidad de que el escaneo láser pueda, en determinadas circunstancias, sustituir o complementar los métodos convencionales. Potencialmente los TLS podrían obtener más cantidad de datos con menos tiempo en campo.

Se seleccionaron sectores representativos del edificio del cuerpo sur para comparar mediciones obtenidas con el escáner y con la estación total del Instituto. También se tomaron puntos con la finalidad de comparar las coordenadas de ambos en el mismo sistema de referencia local.

Esta comparación permitió evaluar de forma directa la precisión relativa de la nube en zonas críticas. Por motivos de comodidad y volumen de movimiento, se eligieron las paredes del cuerpo sur sobre la Avenida Julio María Sosa.



Figura 37: Paredes seleccionadas para la comparación sobre nube de puntos. Fuente: Elaboración propia.

Elemento	Nube de Puntos (m)	Estación Total (m)	Diferencia (m)
Largo Pared A	22.812	22.891	-0.079
Largo Pared B	72.570	72.571	-0.001
Largo Pared C	14.180	14.132	0.048
Altura Pared C	13.470	13.440	0.030
Ángulo B-C	89° 46' 33"	89°46'16"	0°0'17"

Tabla 2: Comparación de medidas entre estación total y nube de puntos. Fuente: Elaboración propia.

Número de punto	Error (m)	Vector de error YXZ (m)
1	0.014	(0.009, 0.009, -0.005)
2	0.018	(-0.009, -0.015, 0.005)
3	0.010	(0.008, 0.006, 0.002)
4	0.019	(-0.006, 0.018, -0.001)
5	0.017	(-0.001, 0.017, -0.001)

Tabla 3: Errores entre coordenadas de estación vs nube de puntos. Fuente: Software Cyclone Register.

En la Tabla 3, los errores puntuales calculados a partir de las coordenadas comparadas presentan valores comprendidos entre 0.010 m y 0.019 m, con vectores de error sin dirección predominante, lo que indica una distribución homogénea del ajuste y ausencia de sesgos sistemáticos en el registro.

En conjunto, estos resultados demuestran que el Leica RTC360 ofrece una precisión adecuada para relevamientos arquitectónicos de alta fidelidad, incluso sin el uso de dianas o control geodésico adicional, siempre que se asegure un solape suficiente entre escaneos y una verificación visual cuidadosa durante el registro.

6. Conclusiones

El relevamiento realizado con el escáner terrestre en la Facultad de Ingeniería permitió hacer un análisis exploratorio del equipo en forma práctica, analizando sus ventajas y limitaciones en comparación con otras formas de medición. En primer lugar, se logró cumplir con el objetivo de realizar un relevamiento completo del edificio, capturando los cuerpos Norte y Sur, así como todas las terrazas accesibles.

En cuanto a los tiempos de trabajo en campo, el uso del escáner redujo significativamente la duración del relevamiento respecto a métodos tradicionales como la estación total. La captura de los 53 escaneos, con resolución media y registro fotográfico, demandó 5 jornadas de campo de aproximadamente dos horas efectivas cada una, aunque al principio fueron más extensas por la falta de ductilidad para usar el escáner y su controladora. Este poco tiempo en campo para lograr tanto nivel de detalle en el producto derivado evidencia la eficiencia de este tipo de equipos para relevamientos de grandes estructuras.

Por el contrario, los tiempos de trabajo en gabinete resultaron considerablemente más extensos. Las etapas de registro, limpieza, depuración y exportación de la nube de puntos consumieron varias jornadas, debido tanto al volumen de información procesada como a las limitaciones del hardware disponible. Esta disparidad entre rapidez en campo y complejidad en gabinete es un factor clave a considerar al planificar proyectos con el equipo.

Cumpliendo el objetivo de comparar las mediciones entre la nube de puntos y la estación total, los resultados obtenidos fueron aceptables incluso sin el uso de dianas. Las diferencias registradas con la estación total estuvieron dentro de márgenes de tolerancia para trabajos de arquitectura y documentación patrimonial (del orden de pocos centímetros). No obstante, la incorporación de puntos de control habría permitido una georreferenciación más robusta y un ajuste más confiable de los escaneos.

Relacionado con el tiempo de trabajo en gabinete, se observó que las diferencias de hardware, especialmente en cuanto a la memoria RAM, la potencia de procesamiento y la tarjeta gráfica, aumentaron significativamente los tiempos entre pruebas y errores. La computadora utilizada permitió ejecutar Cyclone Register 360, logrando realizar la alineación de los escaneos y las tareas básicas de registro de la nube de puntos. Sin embargo, dado que la memoria RAM instalada (12 GB) está por debajo del mínimo requerido (16 GB), el rendimiento no fue óptimo, el software funcionó de forma lenta e incluso se bloqueaba en algunos momentos.

En cuanto al software Cyclone 3DR las limitaciones fueron mayores, lo que impidió trabajar con la totalidad de los escaneos y condicionaron el intento de modelado 3D, haciendo necesario reducir el proyecto a un sector más pequeño para poder avanzar.

El objetivo de modelar tridimensionalmente el edificio no pudo cumplirse debido a los problemas de hardware detallados. Si bien el procesador y la GPU cumplen

con los requisitos mínimos, la falta de memoria RAM fue determinante en el rendimiento, provocando lentitud y restricciones. En síntesis, el equipo resulta aceptable para tareas de registro en Cyclone Register 360, pero inadecuado para procesamiento avanzado y modelado 3D en Cyclone 3DR. Para aprovechar plenamente el potencial del RTC360, es necesario contar con computadoras de mayor capacidad de RAM, CPU y GPU.

En el plano de los softwares, tanto el Cyclone Field (usado en campo), como el Cyclone Register resultaron dos programas muy prácticos. Ambos cuentan con una interfaz sencilla y clara que facilita su uso, haciendo en el caso del Cyclone Field que nos acorte los tiempos de escaneo en campo. Un aspecto para destacar es que la posibilidad de llevar los diferentes escaneos alineados previamente desde la tablet en campo agiliza posteriormente su optimización en el Cyclone Register. Cyclone 3DR, tiene una interfaz más robusta y hubo que apoyarse más en los cursos online y distintos tutoriales para poder utilizarlo y comprender los errores que fuimos cometiendo. También mostró limitaciones al momento de generar superficies y mallas 3D. Esto derivó en geometrías imprecisas y procesos excesivamente lentos. En futuros trabajos, sería recomendable evaluar alternativas de software más orientadas al modelado de superficies, que permitan un mejor aprovechamiento de la nube de puntos.

La integración con datos LiDAR aéreos se logró de forma satisfactoria, aunque mediante un empalme visual con puntos en común. Esta experiencia demostró que la fusión de datos terrestres y aéreos es factible, pero también que la precisión de la unión podría mejorarse significativamente si se realizara un vuelo

propio con puntos de control coincidentes entre ambos relevamientos. En particular, para trabajos que requieran alta precisión métrica sería lo ideal planificar un vuelo LiDAR específicamente vinculado al relevamiento terrestre definiendo previamente una red de puntos de apoyo medidos con estación total o GNSS, garantizando así que ambas nubes compartan un mismo sistema de referencia y que la superposición no dependa de ajustes visuales.

En cuanto a lo académico, el presente trabajo abre futuras líneas de investigación luego de conseguir una mejora de hardware. Sería valioso profundizar en cómo varía la precisión del equipo utilizando dianas georreferenciadas en los escaneos y que tan próximo son los resultados con los dados por el fabricante; evaluar la influencia de distintos parámetros de resolución del equipo sobre la precisión global. También podría explorarse si es posible integrar la nube de puntos de la edificación en el Marco de Referencia Geodésico del Instituto de Agrimensura (MaRGIA) lo que podría ser útil en futuras reformas. El resultado del presente trabajo puede ser útil para distintas materias, como topografías o el Taller de representación y comunicación gráfica dictado por el Departamento de Inserción Social del Ingeniero (D.I.S.I.). Quedan a disposición diferentes nubes de puntos: escaneos crudos, nube de puntos registrada y cruda, nube de puntos de los cuerpos norte y sur del edificio limpias, y la nube de puntos con los techos LiDAR integrados.

El uso de TLS abre múltiples aplicaciones en la profesión, sobre todo en casos de relevamientos que tengan mucho detalle estructural. Nos parece que los mejores casos para usar el equipo podrían ser: documentación para la

preservación de patrimonio arquitectónico, control de deformaciones en obras civiles, monitoreo de avances constructivos, o integración de información tridimensional en proyectos BIM. La rapidez en campo y el nivel de detalle alcanzado lo convierten en una herramienta con gran potencial, siempre que se disponga de recursos computacionales para su procesamiento posterior.

Finalmente, este trabajo permitió no solo evaluar el rendimiento del Leica RTC360 en un caso real, sino también identificar las condiciones necesarias para su uso eficiente, resaltando la importancia de equilibrar la captura rápida en campo con la planificación de recursos para el gabinete, tanto en hardware como en software.

7. Bibliografía

- Shan, Jie y Toth, Charles K. 2018. *Topographic Laser Ranging and Scanning: Principles and Processing*. Segunda edición. CRC Press. ISBN 9781032476292.
- (Wu, C., Yuan, Y., Tang, Y., & Tian, B. (2022). *Application of terrestrial laser scanning (TLS) in the architecture, engineering and construction (AEC) industry*.
- Ogeda, N. y Ugalde, S. (2024). *El rol del Ingeniero Agrimensor en la implementación de metodología BIM en construcciones preexistentes: Desafíos y oportunidades*. Tesis de grado. Universidad de la República (Uruguay). Facultad de Ingeniería.
- Alvariza Banchero, G, Rodriguez Rodriguez, F y Settin Lugo, V. (2019). *Comparación de resultados topográficos altimétricos en el relevamiento de una cantera utilizando drone fotogramétrico, drone RTK/PPK y estación escáner*. Tesis de grado. Universidad de la República (Uruguay). Facultad de Ingeniería.
- NOAA Coastal Services Center. (2012). *LiDAR 101: An introduction to LiDAR technology, data, and applications*. National Oceanic and Atmospheric Administration.
- Seidaliyeva, U., Temirbek, A., Sadykova, A., & Akanov, A. (2025). *LiDAR Technology for UAV Detection: From Fundamentals and Operational Principles to Advanced Detection and Classification Techniques*. *Sensors*, 25(9), 2757.

- Lohani, B., & Ghosh, S. (2017). Airborne LiDAR technology: A review of data collection and processing systems. Proceedings of the National Academy of Sciences, India Section A: Physical Sciences. <https://doi.org/10.1007/s40010-017-0435-9>
- WWF. (2019). *Remote sensing: LiDAR. Guidelines* (WWF-UK, Woking, Reino Unido).
- Cruz, L.; Uribe, V.; Zárate, J.; 2023. *Modelos de nubes de puntos con Escáner Láser Terrestre (TLS) aplicado en el registro del patrimonio construido: Implicaciones del Flujo de trabajo en calidad de los resultados. Revista Arquitectura+*. Vol. 8. pg. 37-52. Facultad de Arquitectura, Nicaragua. ISSN: 2518-2943.
- Zubizarreta, Nerea. 2018. *LiDAR: introducción a la tecnología*. Revista Mapping. Vol. 27, p. 56-63. ISSN: 1131-9100.
- Bornáz, L.; Rinaudo, F. *Terrestrial Laser Scanner Data Processing*. In: Proceedings of the XXXV Congress of the ISPRS, Commission 5. Torino: ISPRS, 2002. p. 608. <https://www.isprs.org/proceedings/xxxv/congress/comm5/papers/608.pdf>
- Van Genechten, Bjorn; DEMEYERE, T.; HERINCKX, S.; 2019. Terrestrial Laser Scanning in Architectural Heritage – Deformation Analysis and the Automatic Generation of 2D Cross-sections. 22nd CIPA Symposium, Kyoto, Japón). <https://www.cipaheritagedocumentation.org/wp-content/uploads/2018/12/Van-Genechten-e.a.-Terrestrial-Laser->

[Scanning-in-Architectural-Heritage-Deformation-Analysis-and-the-Automatic-Generation-of-2D-Cross-sections.pdf](#)

- LEICA GEOSYSTEMS. Cyclone REGISTER 360 PLUS – Computer specifications. Heerbrugg (Suiza): Leica Geosystems, 2025.
[<https://rcdocs.leica-geosystems.com/cyclone-register-360/latest/computer-specifications>]

8. Anexos

8.1. Cursos

Para la correcta ejecución del proyecto, se realizó inicialmente una capacitación presencial “Captura de la Realidad, uso de RTC360 LT y Procesamiento de Software de la familia Cyclone” dictada por Leica Geosystems LATAM, que abordó el flujo de trabajo completo desde la planificación y toma de datos en campo hasta el procesamiento y registro de nubes de puntos en los softwares Cyclone Register 360 y Cyclone 3DR.



Figura 38: Curso presencial en la Facultad de Ingeniería. Fuente: Redes sociales del Instituto de Agrimensura.

Con el objetivo de reforzar y profundizar los conocimientos adquiridos en esta instancia, se completaron posteriormente, a través de la plataforma oficial de Leica Geosystems, los cursos online “Leica RTC360: Introducción y cómo utilizarla”, que incluyó el entrenamiento en el uso del escáner RTC360 y su solución completa, la preparación del equipo para la captura de datos, el uso

de la aplicación Cyclone FIELD 360 y el proceso de importación de datos en Cyclone REGISTER 360; “Leica Cyclone REGISTER 360 – Introduction and How to Use”, orientado a la comprensión del flujo de trabajo de cuatro pasos (importar, revisar y optimizar, finalizar, y generar el Informe final); “Fundamentals of Aligning Laser Scanner Setups”, enfocado en los principios de registro de datos, técnicas de alineación cloud-to-cloud y uso de targets; “Fundamentals of Survey Control for Laser Scanning Projects”, orientado al uso de puntos de control para optimizar registros y adaptar los datos a sistemas de coordenadas; y “Leica Cyclone 3DR: Fundamentos”, centrado en el uso de las herramientas principales de 3DR para la generación de distintos entregables.

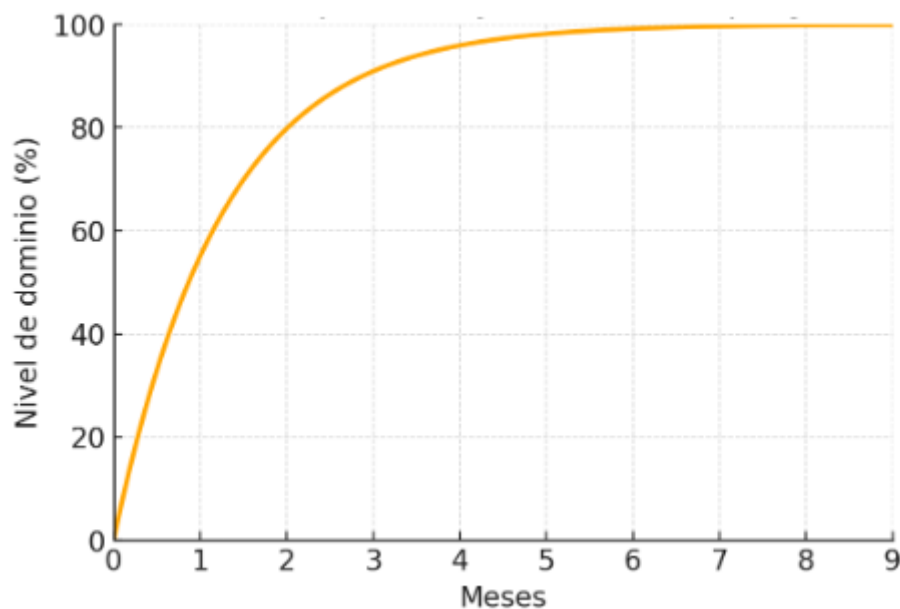


Figura 39: Curva de aprendizaje. Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 39 se representa la curva de aprendizaje correspondiente al proceso de trabajo con el escáner Leica RTC360 y sus softwares asociados. En el eje de las ordenadas se indica el nivel de dominio y en el eje de las

abscisas los meses transcurridos desde el inicio del proyecto (0 a 9). La curva muestra un crecimiento pronunciado durante los primeros cuatro meses, correspondientes a la etapa de capacitación y primeras prácticas de campo, y se estabiliza a partir del mes cinco, cuando ya se adquirió la habilidad del manejo del equipo y el procesamiento de datos.

8.2. *Activación de la licencia en Leica CLM – License Manager*

Para poder utilizar los softwares Leica Cyclone REGISTER 360 y Cyclone 3DR es necesario contar con una licencia válida. La activación de esta licencia se realiza a través del Leica CLM – License Manager siguiendo estos pasos:

Instalación del CLM:

Asegúrese de que el software Leica CLM esté instalado en la computadora donde se realizará el procesamiento de datos.

Activación de la licencia:

Abra Leica CLM y seleccione la opción +Add.

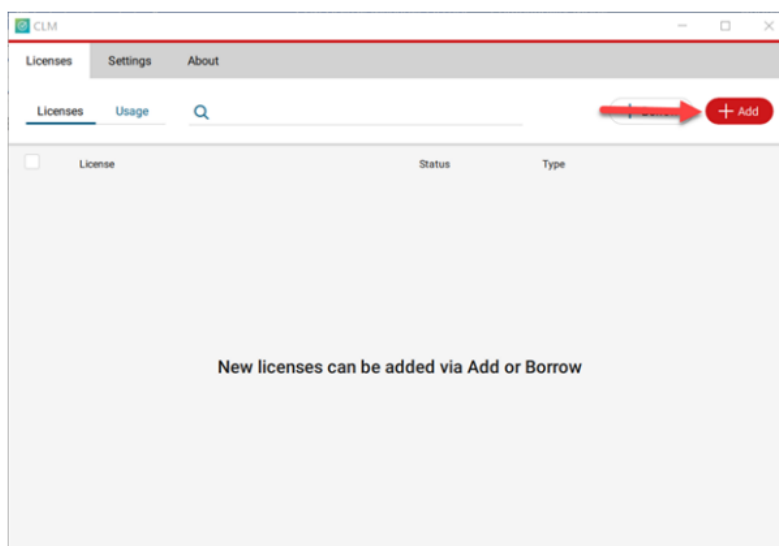


Figura 38: Primer paso para activar licencia. Fuente: Elaboración propia.

Ingresa el Entitlement ID (EID) proporcionado al adquirir el software y seleccione "Add".

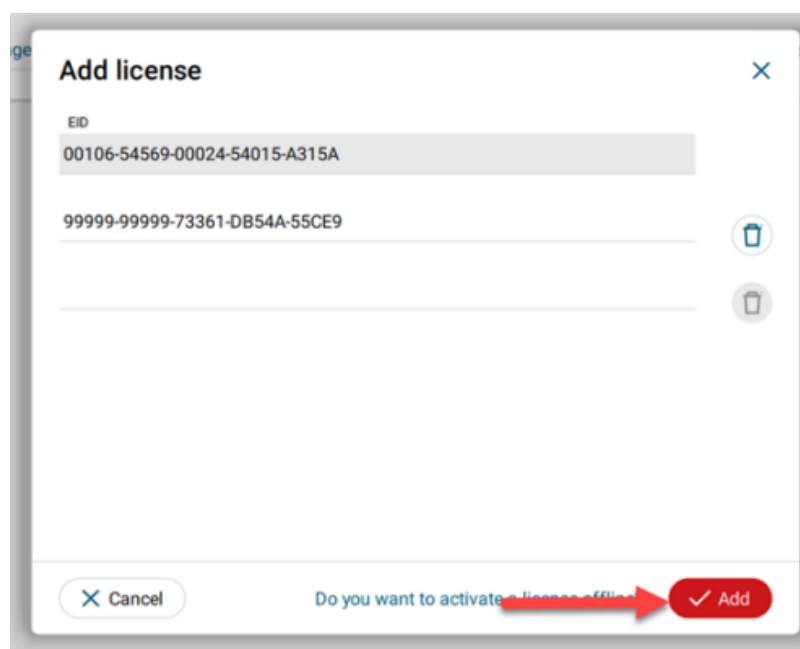


Figura 39: Segundo paso para activar licencia. Fuente: Elaboración propia.

Devolución de la licencia, es útil cuando se necesita transferir la licencia a otro equipo o liberar la activación.

En la interfaz del CLM, seleccione la licencia activa. Haga clic en la flecha a la derecha para la devolución.

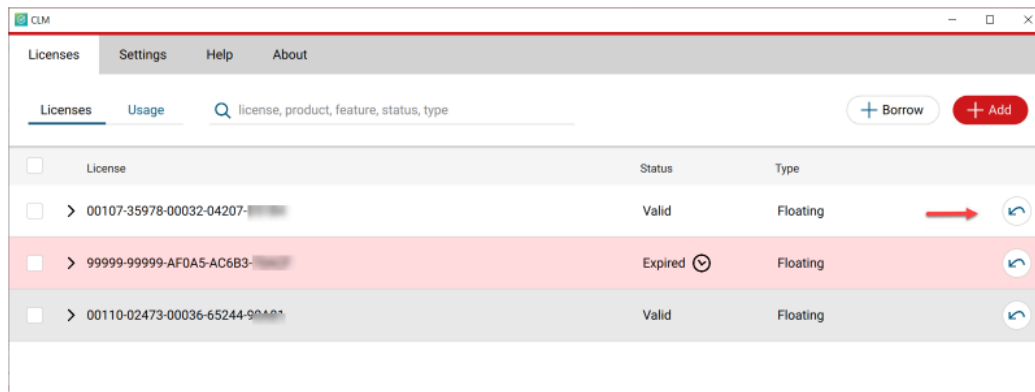


Figura 40: Tercer paso para activar licencia. Fuente: Elaboración propia.

8.3. *Especificaciones de la PC para uso de software Cyclone Register 360*

Especificaciones mínimas

- CPU: Procesador de doble núcleo con una velocidad de 2,5 GHz.
- Sistema operativo: Microsoft® Windows® 10 (64 bits).
- RAM: 16 GB.
- Gráficos: Compatibilidad con OpenGL® 3.3 o superior, con 1 GB de memoria gráfica dedicada.
- Disco duro: Al menos 1 GB de espacio para la instalación.

8.4. *Especificaciones recomendadas de la estación de trabajo*

- CPU: Intel Core™ i7 o equivalente, funcionando a 3,5 GHz.
- Sistema operativo: Microsoft® Windows® 10 (64 bits).
- RAM: 64-257 GB.
- Gráficos: NVIDIA® RTX™ Serie 4000 con 8 GB de memoria de video, o NVIDIA® Quadro RTX® 5000 o equivalente.
- Disco duro: Múltiples SSD internos (almacenamiento, temporal e importación).

8.5. *Especificaciones de la PC para uso de software Cyclone 3DR*

Especificaciones mínimas

- CPU: 2 GHz Dual Quad Core i7.
- Sistema Operativo: Microsoft Windows 10 (compilación 1809), 11 (compatible con 64 bits)
- RAM: 16-32 GB o más para 64 bit OS.
- Gráficos: NVidia – Quadro o GeForce 1GB (with OpenGL support, versions 4.3).
- Disco duro: Al menos 3 GB de espacio para la instalación.

Especificaciones recomendadas de la estación de trabajo

- CPU: Intel® Core™ i7 de 3,5 GHz o superior

- Sistema Operativo: Microsoft Windows 10 (compilación 1809), 11 (compatible con 64 bits)
- RAM: 64-256 GB
- Gráficos: NVidia con capacidades de GPU
- Capacidad de cómputo: 5.0 o superior hasta 9.0
- Memoria mínima de GPU: 4-8 GB (especialmente para mallas con más de 40 millones de triángulos)
- Disco duro: Al menos 20 GB

8.6. *Especificaciones de la computadora que se utilizó para realizar el trabajo*

- Procesador: Intel(R) Core (TM) i7-8750H CPU @ 2.20 GHz
- Sistema operativo: Windows 11 Home 24H2
- RAM: 12 GB
- Gráficos: NVIDIA GeForce GTX 1050 T
- Disco duro: 61.3 GB de espacio, Disco 1 (C:) SSD NVMe. Disco 0 (D:, E:) HDD (RAID)

Atributo	Cyclone Register 360 (mínimo / recomendado)	Cyclone 3DR (mínimo / recomendado)	PC utilizada en el trabajo
CPU	2 núcleos, 2.5 GHz / Intel Core™ i7, 3.5 GHz	i7 Quad Core 2 GHz / i7 ≥ 3.5 GHz	Intel Core™ i7-8750H @ 2.20 GHz
Sistema operativo	Windows 10 (64 bits)	Windows 10 (1809) o 11 (64 bits)	Windows 11 Home 24H2
RAM	16 GB / 64–257 GB	16–32 GB / 64–256 GB	12 GB
Gráficos (GPU)	OpenGL 3.3, 1 GB / NVIDIA RTX 4000 (8 GB) o Quadro RTX 5000	OpenGL 4.3, 1 GB / NVIDIA GPU 4–8 GB (capacidad de cómputo ≥ 5.0)	NVIDIA GeForce GTX 1050 T
Disco duro	1 GB / múltiples SSD internos	3 GB / 20 GB	61.3 GB (SSD NVMe + HDD RAID)

Tabla 4: Comparación de requisitos de los softwares y atributos de la computadora utilizada.

Fuente: Elaboración propia.

La RAM de 12 GB queda por debajo del mínimo de 16 GB, lo que impidió trabajar con la totalidad de los escaneos y ralentizó el flujo en gabinete. El procesador y la GPU cumplieron lo mínimo, pero quedaron cortos frente a lo recomendado para modelado 3D y manejo de grandes volúmenes de datos.

Imágenes del equipo en campo



Figura 41: Estacionamiento sobre Julio María Sosa. Fuente: Escáner utilizado.



Figura 42: Cuerpo sur de Facultad. Fuente: Escáner utilizado.



Figura 43: Fachada norte, cuerpo sur. Fuente: Escáner utilizado.



Figura 44: Cuerpo sur fachada oeste. Fuente: Escáner utilizado.



Figura 45: Azotea sobre cuerpo sur. Fuente: Escáner utilizado.



Figura 46: Azotea sobre cuerpo Norte. Fuente: Escáner utilizado.

8.7. *TLS en Uruguay*

En Uruguay, el escáner láser terrestre (TLS) es una tecnología actualmente en expansión que comienza a ser incorporada por algunas instituciones académicas, organismos públicos y profesionales del ámbito técnico. Su uso permite capturar con rapidez y precisión grandes volúmenes de datos espaciales, generando representaciones tridimensionales a partir de nubes de puntos. Aunque su adopción aún no es generalizada, se han desarrollado experiencias puntuales que muestran su potencial en diversas áreas.

En el ámbito universitario, especialmente en las carreras vinculadas a la agrimensura y la arquitectura, se han implementado proyectos de relevamiento con fines académicos, de investigación y conservación, como los ya citados durante este trabajo. Algunos de estos proyectos han permitido documentar edificios históricos y estructuras de valor patrimonial mediante modelos 3D detallados, lo que resulta útil tanto para su estudio como para tareas de restauración o difusión cultural. También se ha comenzado a integrar el TLS en la formación profesional, promoviendo el conocimiento de flujos de trabajo que incluyen el procesamiento de nubes de puntos y su vinculación con metodologías digitales como BIM.



Figura 47: Nube de puntos del Teatro Solís. Fuente: Centro de Información Digital - Facultad de Arquitectura.

En obras civiles e infraestructura, su aplicación se centra principalmente en la documentación de edificaciones existentes, ofreciendo una base confiable para reformas o ampliaciones mediante el modelado tridimensional a partir de datos reales.

En resumen, si bien no es parte de la práctica habitual en trabajos de relevamiento, existe interés en explorar su incorporación. Los ensayos realizados demuestran que el TLS puede complementar métodos convencionales, sobre todo en áreas urbanas densas o edificaciones complejas, proporcionando un nivel de detalle superior y acortando los tiempos de relevamiento en campo.

El desarrollo de esta tecnología en Uruguay enfrenta desafíos asociados al costo del equipamiento, la necesidad de hardware potente para el procesamiento de datos, y la capacitación técnica que exige. Sin embargo, la

experiencia acumulada en proyectos académicos y profesionales indica que su aplicación irá en aumento, en la medida que se consolide el acceso a los recursos necesarios y se reconozca su valor como herramienta para el análisis espacial preciso y la representación tridimensional del entorno construido.