



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería Geodésica,  
Cartográfica y Topográfica

Integración de técnicas geomáticas y geofísicas para la  
modelización del  
Cenador de Carlos V en Sevilla.

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería Geomática y Topografía

AUTOR/A: Zaragoza Pareja, María

Tutor/a: García García, Francisco

Cotutor/a externo: BAYARRI CAYON, VICENTE

CURSO ACADÉMICO: 2023/2024



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR  
DE INGENIERÍA GEODÉSICA  
CARTOGRÁFICA Y TOPOGRÁFICA

*Grado en Ingeniería Geomática y Topografía*  
TRABAJO FIN DE GRADO  
*Mayo de 2024*

# INTEGRACIÓN DE TÉCNICAS GEOMÁTICAS Y GEOFÍSICAS PARA LA MODELIZACIÓN DEL CENADOR DE CARLOS V EN SEVILLA

*Autora: María Zaragoza Pareja*

*Tutor: D. Francisco García García*

*Cotutor externo: D. Vicente Bayarri Cayón*

*Curso académico: 2023-2024*

## **Agradecimientos**

*“En este momento significativo de mi trayectoria académica, deseo expresar mi más profundo agradecimiento a todas aquellas personas cuya contribución ha sido fundamental en la realización de este Trabajo de Fin de Grado.*

*En primer lugar, quiero reconocer el invaluable trabajo de mis tutores, D. Francisco García García y D. Vicente Bayarri Cayón, cuya guía experta, dedicación, calidad humana y apoyo constante han sido esenciales en el desarrollo y perfeccionamiento de este trabajo académico. Me gustaría agradecer a World Monuments Fund por financiar esta investigación y es especial a P. Longoria por su generoso apoyo.*

*A continuación, deseo expresar mi más sincero agradecimiento a mis padres, Encar y Enrique, que por su incansable dedicación, estímulo e inquebrantable fuerza son los pilares fundamentales en mi formación personal y académica, el ejemplo que me guía día a día y el mayor orgullo que una hija puede tener.*

*A mi abuela Encarnita y a mi abuelo Pepe, cuya sabiduría, amor y ejemplo de vida han dejado una huella imborrable en mi persona. Su legado y valores suponen para mí una inspiración constante, un bálsamo en los momentos de adversidad y un motivo de celebración en los logros alcanzados.*

*A Julián, por ser el ancla que me mantiene firme en la tempestad y el faro que me ilumina en los desafíos, por su infinito amor y su inalterable compromiso.*

*A mis compañeros de viaje, en especial a Marc, por hacer del camino compartido una aventura. Y a mi compañera y amiga Luna, por su inagotable fuerza y por enseñarme el verdadero sentido de la amistad.*

*A todos. Gracias de corazón”.*

### **Compromiso**

*“El presente documento ha sido realizado completamente por el firmante; no ha sido entregado como otro trabajo académico previo y todo el material tomado de otras fuentes ha sido convenientemente entrecomillado y citado su origen en el texto, así como referenciado en la bibliografía”*

---

*María Zaragoza Pareja*

## Resumen

*El Cenador de Carlos V, ubicado en el Real Alcázar de Sevilla, es una construcción que data del siglo XVI cuya relevancia histórica, arquitectónica y patrimonial son inigualables. Este edificio renacentista no solo representa un hito arquitectónico de la época, sino también un testimonio vivo de la fusión cultural entre el Renacimiento europeo y las influencias mudéjares y góticas presentes en la región.*

*Las técnicas geomáticas y geofísicas desempeñan un papel crucial en la conservación del Cenador de Carlos V. Estas herramientas nos permiten obtener información detallada sobre la estructura y el entorno del edificio, ayudando así a guiar las decisiones para su conservación y preservación. El uso de tecnologías como el Escáner Láser Terrestre, el Sistema de Navegación Satelital Global y el Ground Penetrating Radar (GPR) permite a los expertos realizar un análisis exhaustivo de la arquitectura del Cenador, identificar posibles daños o debilidades estructurales y evaluar el estado general de la construcción.*

*Además, estas técnicas proporcionan información invaluable sobre el entorno geológico y arqueológico que rodea al Cenador, pueden revelar la presencia de restos arqueológicos enterrados cerca del edificio, así como mapear con precisión el terreno circundante y detectar posibles riesgos naturales, como la erosión del suelo o la presencia de humedad.*

*Para poder gestionar de manera eficiente los recursos de los que disponemos, nacen las metodologías BIM (Modelado de Información del Edificio). Con ellas generamos reconstrucciones virtuales a partir de nubes de puntos, abarcando no solo el edificio sino también su subsuelo, sin que sea necesaria la participación de un experto permitiéndonos así la centralización de la información del proyecto, lo que facilitará a posteriori la cooperación entre arquitectos, arqueólogos, aparejadores y organismos públicos para llevar a cabo las intervenciones necesarias.*

*Conseguimos así, un producto que es la difusión como realidad aumentada de apoyo a la visita o realidad virtual de forma online. En los últimos años, para la documentación, gestión y divulgación de los bienes culturales, la virtualización del patrimonio se ha convertido en un recurso fundamental. Se trata de tecnología no invasiva que además no exige una gran inversión económica y resulta atractiva al público por su carácter sensorial.*

## Resum

*El Cenador de Carlos V, situat al Reial Alcázar de Sevilla, és una construcció del segle XVI amb una rellevància històrica, arquitectònica i patrimonial sense igual. Aquest edifici renaixentista no solament representa un hito arquitectònic de l'època, sinó també un testimoni viu de la fusió cultural entre el Renaixement europeu i les influències mudèjars i gòtiques presents en la regió.*

*Les tècniques geomàtiques i geofísiques juguen un paper crucial en la conservació del Cenador de Carlos V. Aquestes eines ens permeten obtenir informació detallada sobre l'estructura i l'entorn de l'edifici, ajudant a guiar les decisions per a la seua conservació i preservació. L'ús de tecnologies com l'Escàner Làser Terrestre, el Sistema de Navegació Satel·lital Global i el Ground Penetrating Radar (GPR) permet als experts realitzar una anàlisi exhaustiva de l'arquitectura del Cenador, identificar possibles danys o debilitats estructurals i avaluar l'estat general de la construcció.*

*A més, aquestes tècniques proporcionen informació valuosa sobre l'entorn geològic i arqueològic que envolta el Cenador, poden revelar la presència de restes arqueològiques enterrades prop de l'edifici així com mapejar amb precisió el terreny circumdant i detectar possibles riscos naturals, com l'erosió del sòl o la presència d'humitat.*

*Per a poder gestionar de manera eficient els recursos dels quals disposem, naixen les metodologies BIM (Modelat d'Informació de l'Edifici). Amb elles generem reconstruccions virtuals a partir de núvols de punts, abraçant no solament l'edifici sinó també el seu subsòl, sense que siga necessària la intervenció d'un expert permetent-nos així la centralització de la informació del projecte, la qual cosa facilitarà després la cooperació entre arquitectes, arqueòlegs, aparelladors i organismes públics per a dur a terme les intervencions necessàries.*

*Aconsegum així un producte que és la difusió com a realitat augmentada de suport a la visita o realitat virtual de forma online. En els últims anys, per a la documentació, gestió i divulgació dels béns culturals, la virtualització del patrimoni s'ha convertit en un recurs fonamental. Es tracta de tecnologia no invasiva que a més no exigeix una gran inversió econòmica i resulta atractiva al públic pel seu caràcter sensorial.*

## **Abstract**

*The Charles V Pavilion, located in the Real Alcazar of Seville, is a construction dating back to the 16th century whose historical, architectural, and heritage relevance are unparalleled. This Renaissance building not only represents an architectural landmark of the time but also a living testimony to the cultural fusion between the European Renaissance and the Mudéjar and Gothic influences present in the region.*

*Geomatic and geophysical techniques play a crucial role in the conservation of the Charles V Pavilion. These tools allow us to obtain detailed information about the structure and surroundings of the building, thus helping to guide decisions for its conservation and preservation. The use of technologies such as Terrestrial Laser Scanner, Global Navigation Satellite System, and Ground Penetrating Radar (GPR) enables experts to conduct a comprehensive analysis of the Pavilion's architecture, identify possible damages or structural weaknesses, and assess the overall condition of the construction.*

*Furthermore, these techniques provide invaluable information about the geological and archaeological environment surrounding the Pavilion. They can reveal the presence of buried archaeological remains near the building as well as accurately map the surrounding terrain and detect potential natural risks, such as soil erosion or the presence of moisture.*

*In order to efficiently manage the resources available to us, BIM methodologies (Building Information Modeling) are developed. With them, we generate virtual reconstructions from point clouds, encompassing not only the building but also its subsurface, without the need for expert intervention, thus allowing us to centralize project information, which will facilitate subsequent cooperation between architects, archaeologists, surveyors, and public bodies to carry out the necessary interventions.*

*We thus achieve a product that is diffusion as augmented reality to support visits or virtual reality online. In recent years, for the documentation, management, and dissemination of cultural assets, heritage virtualization has become a fundamental resource. It is non-invasive technology that also does not require a large financial investment and is attractive to the public for its sensory nature.*

## Índice de Figuras

Figura 1. Cenador de Carlos V en los Jardines del Real Alcázar de Sevilla. ....	10
Figura 2. Interior del Cenador de Carlos V del Real Alcázar de Sevilla.....	11
Figura 3. a) Nube de puntos del bloque ajustado b) Sección transversal de la nube de puntos ajustada .....	16
Figura 4. Cuadrícula creada para el estudio de GPR .....	17
Figura 5. Flujo de Trabajo General para facilitar la integración de GPR al BIM .....	19
Figura 6. Vistas del Modelo BIM del Cenador de Carlos V: a) Vista 3D, b) Vista inferior, c) Sección ortográfica del modelo 3D, d) Sección del modelo 3D. e) Planta y f) Posiciones de las secciones horizontal y vertical. ....	22
Figura 7. a) Perfil de reflexión P15 y b) Imágenes de sección radar en 3D después de procesar los datos crudos, mostrando evidencia subterránea de estructuras y capas culturales, cuyos espesores de capa están indicados por flechas negras; c) imagen de isosuperficie en el volumen estudiado, mostrando las principales anomalías (estructuras enterradas) detectadas y otros puntos de reflexión coloreados en gris- negro.....	23
Figura 8. Ejemplos de anomalías raster superpuestas en el modelo 3D debido las diferentes estructuras detectadas en cada capa cultural: a) 66 cm de profundidad en la capa cultural 1, b) 133 cm de profundidad en la capa cultural 2, c) 222 cm de profundidad en la capa cultural 3 y d) 311 cm de profundidad en la capa cultural 4. ....	25
Figura 9. Integración de los datos del GPR en el Modelo 3D .....	26
Figura 10. Vista Combinada Interior de la Integración.....	27



## **Índice de Tablas**

Tabla 1. Presupuesto del Proyecto. ....	29
---	----

## Índice

1. Introducción .....	10
2. Objetivos.....	13
3. Datos.....	14
4. Metodología .....	15
4.1 Georreferenciación y Proyección del Sistema.....	15
4.2 Digitalización 3D a través de 3DTLS.....	16
4.3 Digitalización Subterránea a través de GPR.....	18
4.4 Integración del Modelo GPR en BIM.....	19
4.5 Procesamiento y Análisis de Datos.....	21
5. Resultados.....	22
5.1 Digitalización en 3D del Cenador de Carlos V.....	23
5.2 Levantamiento con GPR.....	24
5.3 Integración de los Datos de 3DLTS y GPR.....	25
5.4 Análisis Cuantitativo y Visualización.....	28
6. Presupuesto... ..	29
7. Conclusiones.....	31
8. Bibliografía.....	32
9. Cartografía.....	34
10. Anexos.....	39
Anexo I. Relación del Trabajo con los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la Agenda 2030. ....	39
Anexo II. Fichas técnicas de FARO® Laser Scanner <i>Focus<sup>3D</sup></i> X 330 HDR y de GSSI modelo SIR4000 +antena de 300/800 MHz .....	43

## 1. Introducción

Con más de mil años de historia, el Alcázar de Sevilla emerge como uno de los edificios más complejos y ricos del mundo. Sus salas, diversas, singulares y a veces laberínticas, poseen un valor incalculable y nos permiten viajar a momentos clave de nuestra historia con cada paso. Declarado **Patrimonio de la Humanidad por la UNESCO** en **1987**, este complejo monumental compuesto por la Catedral, el Real Alcázar y el Archivo de Indias ejemplifica las diferentes etapas históricas de la ciudad de Sevilla. El Cenador de Carlos V es uno de los edificios más emblemáticos dentro de los jardines del Real Alcázar (*Figura 1*). Aunque originalmente fue una construcción musulmana del siglo XII, su desarrollo tal como lo conocemos hoy en día ocurrió debido al matrimonio del Emperador Carlos V e Isabel de Portugal.



*Figura 1. Cenador de Carlos V en los Jardines del Real Alcázar de Sevilla.*

Su estructura está rodeada por columnas de mármol genovés, y toda la superficie externa, así como los parapetos y parterres que lo rodean, estaban cubiertos con azulejos, iniciando así la transformación del antiguo huerto musulmán en los jardines de estilo renacentista que han llegado hasta nosotros hoy en día. La decoración cerámica que adorna el Cenador (*Figura 2*) data del siglo XVI y emplea la técnica de azulejos en relieve, con la intención de lograr una estética distinta a la de la azulejería hispano-morisca. Sus azulejos se consideran una de las colecciones cerámicas más importantes del Renacimiento español.

Las técnicas geomáticas y geofísicas representan una herramienta esencial para la preservación y comprensión del patrimonio histórico y arquitectónico. A través de estas técnicas, se logra una documentación detallada y precisa de la estructura del Cenador, incluidas sus características arquitectónicas, materiales utilizados y detalles ornamentales. Esto no solo contribuye a preservar la integridad física del Cenador, sino que también proporciona una base sólida para la investigación histórica y arqueológica. Los modelos 3D permiten a los investigadores estudiar el Cenador desde diferentes perspectivas y realizar análisis comparativos con otras estructuras similares de la época. Además, la visualización en 3D del Cenador facilita su comprensión y apreciación por parte del público en general, permitiendo a las personas explorar virtualmente cada rincón y detalle de esta importante obra arquitectónica.



Figura 2. Interior del Cenador de Carlos V del Real Alcázar de Sevilla.

Este trabajo abre nuevas posibilidades para la difusión del patrimonio cultural, ya que los modelos se pueden utilizar en exposiciones, publicaciones y aplicaciones interactivas que acerquen el Cenador y su historia a un público más amplio. En resumen, las técnicas integradas son una herramienta poderosa para preservar, investigar y compartir la riqueza cultural y arquitectónica de este emblemático monumento histórico.

Para comprender la importancia de tales esfuerzos, algunos trabajos con georradar realizados en el Cenador de Carlos V en septiembre de 2023 han revelado posibles restos arqueológicos bajo esta área. Pablo Longoria, Director de *World Monuments Fund* España, enfatiza que el análisis del subsuelo indica inequívocamente "**3.000 años de historia**", abarcando no solo enterramientos, ya que las lecturas sugieren "**restos de varias épocas hasta cuatro metros de profundidad**". Se sospecha que entre estos restos se encuentran las tumbas de los antiguos Reyes musulmanes, representando una fuente significativa de información capaz de arrojar luz y abrir nuevas investigaciones sobre el pasado que nos precede.

Este trabajo se basa en una integración de datos obtenidos mediante Escáner Láser Terrestre, GNSS y GPR que nos ha proporcionado una nube de puntos del edificio mismo y su subsuelo. El software **FARO Scene** procesa y gestiona los datos del escaneo para aplicaciones de documentación en 3D de manera simple y eficiente, empleando reconocimiento automático de objetos, registro y posicionamiento de escaneo. Estas operaciones permiten crear modelos BIM para asegurar que el resultado final sea lo más preciso, completo y detallado posible, por lo tanto, se han generado automáticamente el modelo BIM del Cenador de Carlos V a partir de la nube de puntos obtenida. Esto nos ha permitido modelar su estructura y todos los elementos intrincados que posee en detalle.

Utilizando software BIM, se ha centralizado toda la información del proyecto en un modelo digital tridimensional, lo que facilita la coordinación entre equipos, detecta conflictos durante el desarrollo del proyecto, optimiza el diseño y genera documentación precisa y detallada para diversos fines.

Un ejemplo reciente de un proyecto BIM en el ámbito de la arquitectura y la preservación del patrimonio es el proyecto de restauración de la **Catedral de Notre Dame** en París, Francia, después del devastador incendio en 2019. Tras el desastre, se iniciaron esfuerzos para reconstruir y restaurar la catedral utilizando la tecnología BIM. Esta metodología permitió a arquitectos y especialistas en preservación del patrimonio crear modelos digitales detallados de la estructura antes del incendio y planificar la reconstrucción con precisión, conservando la autenticidad e integridad histórica del edificio en la mayor medida posible. La aplicación de BIM en este proyecto ayudó a coordinar los esfuerzos de equipos de diseño, construcción y preservación y contribuyó a la planificación y ejecución eficientes de la restauración de este importante sitio de patrimonio cultural.

## 2. Objetivos

En primer lugar, tras fijar el marco de referencia GNSS, se ha procedido a preprocesar y procesar las nubes de puntos obtenidas mediante un FARO Focus X-330 mediante el software FARO Scene, software propietario de la marca para realizar la documentación 3D de forma sencilla y eficiente, empleando para ello el reconocimiento automático de objetos, registro de escaneos y posicionamiento. Estas operaciones permiten crear modelos BIM a partir de la nube de puntos, sin reconstruir el modelo 3D desde cero.

El georadar o GPR nos dará registros en forma de radargramas, y tras su posterior procesado, imágenes en 3D del subsuelo para obtener mayor información y proporcionarnos un contexto más comprensivo del mismo. El uso de cuadrículas con georadar (GPR) es una técnica poderosa para la exploración del subsuelo. La recopilación sistemática de datos permite interpolar cada radargrama con sus vecinos para crear una representación tridimensional del subsuelo.

Un proyecto BIM (Building Information Modeling) para conservación patrimonial tiene varios objetivos clave:

La documentación exhaustiva del patrimonio, que implica utilizar tecnología BIM para crear modelos digitales detallados de edificios históricos y sitios patrimoniales; la planificación de la conservación, que se facilita con la representación virtual precisa del patrimonio para una planificación estratégica a largo plazo; la gestión eficiente de datos, donde el modelo BIM sirve como plataforma centralizada para almacenar y gestionar toda la información relacionada con el patrimonio; la visualización y comunicación, que aprovecha los modelos BIM para crear representaciones visuales realistas, facilitando la comunicación con partes interesadas, tomadores de decisiones y el público en general; el análisis y simulación, utilizando herramientas de análisis integradas en plataformas BIM para evaluar el impacto de intervenciones de conservación propuestas; y finalmente, la colaboración multidisciplinaria, donde el modelo BIM actúa como una plataforma común para que expertos de diferentes disciplinas trabajen juntos en el desarrollo de estrategias integradas de conservación y coordinen actividades.

En resumen, un proyecto de integración para conservación patrimonial tiene como objetivo principal utilizar tecnología avanzada para documentar, gestionar y preservar de manera efectiva el patrimonio cultural y arquitectónico para las generaciones presentes y futuras.

### **3. Datos**

Para la realización de este proyecto, se han utilizado los datos en bruto obtenidos en los escaneos realizados con el Láser Escáner 3D (LE3D), es decir, la nube de puntos tomada con un FARO® Laser Scanner Focus<sup>3D</sup> X 330 y los datos de georradar registrados con un SIR4000 y una antena dual de frecuencias centrales de 300 y 800 MHZ.

Gracias al uso de estas herramientas, hemos obtenido información sobre la estructura del edificio, incluyendo la disposición de los elementos estructurales, como los cimientos y la información sobre las características del subsuelo donde se encuentra el Cenador, como la geología, la presencia de servicios subterráneos, la existencia de ruinas arqueológicas u otras características que puedan afectar la estabilidad del edificio o la planificación de intervenciones de conservación.

Los datos del Cenador de Carlos V sobre su historia e importancia cultural del, incluyendo documentos históricos, registros de patrimonio e informes de conservación, también han jugado un papel importante a la hora de entender el contexto histórico del trabajo.

Crear un modelo BIM de un edificio histórico y su subsuelo requiere la recopilación y la integración de datos provenientes de diversas fuentes, que van desde documentos históricos hasta datos geoespaciales y técnicas avanzadas de escaneo y modelado 3D. Este enfoque integral garantiza que el modelo BIM sea lo más completo y preciso posible, lo que facilita la conservación y gestión efectiva del patrimonio arquitectónico y cultural.

#### **4. Metodología**

La metodología utilizada en este estudio tuvo como objetivo realizar una investigación geofísica integral del Cenador de Carlos V dentro de los jardines del Real Alcázar de Sevilla, utilizando técnicas no destructivas, particularmente GPR. El estudio fue diseñado para lograr la caracterización geométrica y prospección geofísica del Cenador, proporcionando una documentación fiable y objetiva de su estado y diseño. Esta documentación sirve como referencia científica para proyectos de conservación, esfuerzos de investigación adicionales y actividades de difusión.

##### *4.1 Georreferenciación y Proyección del Sistema*

Todo el proyecto fue referenciado utilizando el Sistema de Referencia Terrestre Europeo 1989 (ETRS89), que sirve como el sistema de referencia geodésico oficial en España. El sistema ETRS89 utiliza el elipsoide GRS80 con parámetros específicos para el origen geocéntrico y la orientación del eje. Las observaciones se llevaron a cabo utilizando técnicas GNSS, utilizando métodos diferenciales de cinemática en tiempo real (RTK).

La observación de la red de bases topográficas se ha realizado en el sistema de referencia global ETRS89 materializado por la Red Geodésica Nacional por Técnicas Espaciales (REGENTE). Para operar en este sistema de referencia se han utilizado las estaciones de referencia GPS permanentes del IGN.

Se consideran el sistema de referencia ETRS89 (acrónimo inglés de European Terrestrial Reference System 1989, Sistema de Referencia Terrestre Europeo 1989), que es un sistema de referencia geodésico ligado a la parte estable de la placa continental europea.

Su origen se remonta a la resolución de 1990 adoptada por EUREF (Subcomisión de la Asociación Internacional de Geodesia, IAG, para el Marco de Referencia Europeo) y trasladada a la Comisión Europea en 1999, por lo que está siendo adoptado sucesivamente por todos los países europeos.

Desde el 29 de agosto de 2007 un Real Decreto regula la adopción en España del sistema de referencia geodésico global ETRS89, sustituyendo al sistema geodésico de referencia regional ED50, oficial hasta entonces en el país y sobre el que actualmente se está compilando toda la cartografía oficial en el ámbito de la Península Ibérica y las Islas Baleares, y el sistema REGCAN95 en el ámbito de las Islas Canarias, permitiendo una completa integración de la cartografía oficial española con los sistemas de navegación y la cartografía de otros países europeos.



Mediante REAL DECRETO 1071/2007, de 27 de julio, (BOE núm. 207 Miércoles 29 agosto 2007) por el que se regula el sistema geodésico de referencia oficial en España, se adopta el sistema ETRS89 (European Terrestrial Reference System 1989) como nuevo sistema de referencia geodésico oficial en España y se propone un nuevo conjunto de coordenadas para las esquinas de hojas del MTN50 y sus divisiones. Para adaptarse a la norma, se dispone de un periodo transitorio hasta el 2015 en el que podrán convivir los dos sistemas.

Este sistema está constituido por:

- Elipsoide GRS80
- $a = 6.378.137$
- $\alpha = 1 / 298,257222101$
- Origen geocéntrico
- Eje x intersección del meridiano de Greenwich y el plano del ecuador medio, eje z en la dirección del polo OCI y eje Y perpendicular y formando un triedro directo con los ejes x,z.

Se ha utilizado como sistema de coordenadas planimétrico la Proyección Universal Transversa de Mercator (UTM) huso 30 referida al elipsoide GRS80, Datum ETRS89.

En altimetría, las cotas quedan referenciadas al nivel medio del mar definido por el mareógrafo fundamental de Alicante.

Los datos fueron observados utilizando un receptor **TOPCON Hyper II** y fueron procesados para calcular coordenadas en el sistema ETRS89 utilizando el software **Topcon Tools**.

#### 4.2 Digitalización 3D a través de 3DTLS

El trabajo de campo se llevó a cabo en diciembre de 2023; se utilizó un **FARO FOCUS X-330**, y se necesitaron **32 escaneos**. Se utilizaron esferas calibradas como puntos de apoyo y las tablas de referencia del ajuste en bloque como referencias, que se ajustaron con una precisión de 2.7 mm para el 95% de los puntos (*Figura 3*).

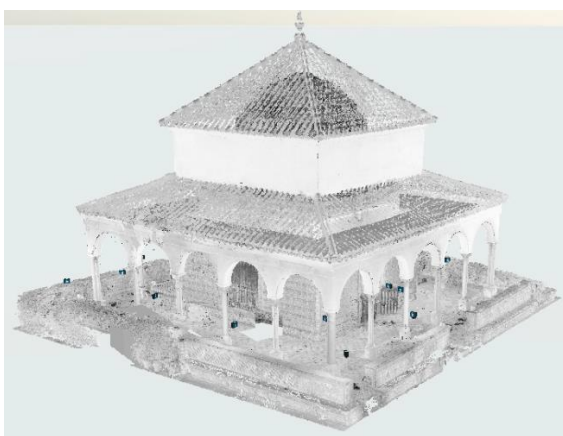
El primer paso del proceso de digitalización implicó la identificación y establecimiento de puntos de control estratégicamente posicionados alrededor del Cenador. Estos puntos de control sirvieron como marcadores de referencia para actividades de escaneo posteriores, garantizando un registro espacial preciso y una alineación de los datos adquiridos.

Durante el proceso de escaneo, se prestó especial atención para lograr una cobertura y superposición óptimas para reducir los vacíos de datos y garantizar la continuidad en la representación en nube de puntos. La operación de escaneo se llevó a cabo meticulosamente desde varios puntos de vista que rodean el Cenador, permitiendo una cobertura integral de todas las superficies exteriores, incluidas fachadas, columnas y elementos decorativos.

Para mejorar la precisión y confiabilidad del modelo digitalizado, se realizaron pases de escaneo adicionales en áreas de interés o complejidad particular, como detalles arquitectónicos ornamentados o áreas con geometrías complejas. Este enfoque específico garantizó la captura de detalles de grano fino esenciales para una comprensión integral de la morfología arquitectónica del Cenador para el posterior modelado BIM.

Después de completar el proceso de escaneo, los datos recopilados en nube de puntos fueron sometidos a rigurosos procedimientos de control de calidad para identificar y rectificar cualquier anomalía o inconsistencia. Se eliminaron ruidos y artefactos, y los datos se refinaron aún más mediante técnicas de filtrado y optimización para mejorar la claridad y precisión.

Los datos de la nube de puntos procesados se transformaron en un modelo digital tridimensional unificado utilizando el software **FARO Scene v. 2019** (FARO Technologies Inc., Lake Mary, FL, USA). Se utilizó la técnica de ajuste de bloque para refinar la alineación espacial de los puntos de datos, garantizando consistencia y precisión en todo el conjunto de datos. Este modelo digital (*Figura 3*) representó con precisión la geometría y la morfología del Cenador, facilitando el análisis detallado y la visualización de sus elementos arquitectónicos y configuración espacial.



a)



b)

*Figura 3. a) Nube de puntos del bloque ajustado b) Sección transversal de la nube de puntos ajustada*

Este modelo digital sirve como un recurso valioso para la documentación arquitectónica, la conservación del Patrimonio y los esfuerzos de investigación, lo que permite a las partes interesadas explorar y analizar el rico patrimonio arquitectónico del Cenador con una profundidad y claridad incomparables.

#### 4.3 Digitalización Subterránea a través de GPR

El método de Radar de Penetración Terrestre (GPR, por sus siglas en inglés) es generalmente más efectivo que otros métodos geofísicos para el levantamiento de estructuras subterráneas. El GPR se ha vuelto cada vez más importante como tecnología común para la detección de estructuras y artefactos en levantamientos arqueológicos y de patrimonio cultural. Esta herramienta es frecuentemente más efectiva en el estudio de estructuras subterráneas que otros métodos geofísicos. Proporciona resultados precisos y asegura una cobertura completa del sitio. Esta técnica también es una herramienta cartográfica valiosa debido a su capacidad para la imagen de alta resolución del subsuelo y representación de datos en 3D. El GPR es una técnica no destructiva que emite pulsos electromagnéticos de corta duración en el rango de frecuencia UHF-VHF y depende de la reflexión de estos pulsos para detectar variaciones electromagnéticas en los materiales del subsuelo.

Se requirió la recolección de datos para todo el Cenador bajo estudio. Por lo tanto, se realizaron metodologías de GPR tridimensionales para identificar y definir estructuras subterráneas y anomalías dentro de la proximidad del Cenador de Carlos V. El sistema GPR utilizado fue el **GSSI SIR4000 con Utilityscan DF**, equipado con antenas de doble frecuencia (300/800 MHz), ideales para penetraciones superficiales y más profundas de hasta 4-5 metros. Las frecuencias elegidas aseguraron versatilidad en la detección de características en el subsuelo manteniendo una alta resolución y sensibilidad a las variaciones sutiles en las propiedades electromagnéticas.

Antes de la recolección de datos, el área de estudio se cuadrículó (*Figura 4*) sistemáticamente cada 0.5 m para ayudar con la cobertura sistemática y garantizar un muestreo uniforme del subsuelo. Los perfiles se planearon cuidadosamente basados en la importancia histórica del sitio, la disposición arquitectónica y las áreas de interés sospechosas identificadas mediante investigaciones previas y consultas con expertos arqueólogos.

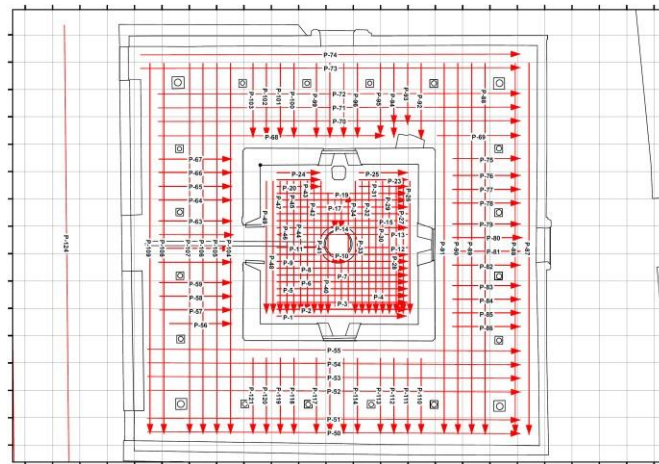


Figura 4. Cuadrícula creada para el estudio de GPR.

Después de la adquisición de datos, se realizó una suposición de estimación de velocidad para el objetivo propuesto de localizar las estructuras y características enterradas, considerando que posibles cambios en las condiciones del subsuelo podrían causar variaciones en la velocidad que afectarían las conversiones de velocidad a profundidad. La velocidad promedio de la onda GPR se determinó utilizando el método de ajuste de hipérbolas en un conjunto de hipérbolas registradas en diferentes perfiles, obteniendo un valor de velocidad promedio de 0,0874 cm/ns. La permitividad dieléctrica ( $\epsilon$ ) se calculó como 11,76, según la siguiente ecuación:

$$\epsilon = \left(\frac{c}{v}\right)^2,$$

Todos los intervalos de tiempo fueron convertidos a profundidad utilizando esta permitividad dieléctrica ( $\epsilon$ ). Este valor se aplicó para el cálculo de las profundidades procesadas en el Cenador investigado.

#### 4.4 Integración del Modelo GPR en BIM

En el contexto del análisis GPR en 3D, los radargramas adquiridos pasan por un proceso crítico de transformación para facilitar su integración en los flujos de trabajo de BIM. En el flujo de trabajo para integrar datos GPR en 3D en entornos BIM, se llevan a cabo los siguientes pasos secuenciales:

- Cortado: Inicialmente, las isosuperficies en 3D se seccionan en representaciones en 2D con una equidistancia y grosor de 3 cm para establecer perfiles de profundidad precisos.

- **Fusión:** Varias secciones se combinan en un solo archivo, un nuevo conjunto de datos de salida utilizando una herramienta de fusión, asegurando una integración completa de los datos.
- **Reclasificación:** Los valores dentro de los datos raster se reclasifican utilizando un umbral para ser o no anomalía y de esta manera mejorar la precisión y relevancia en la representación.
- **Conversión a Polígono:** Los conjuntos de datos raster reclasificados se convierten en características de polígono, facilitando una interpretación y visualización más sencillas dentro del entorno BIM.
- **Exportación a CAD:** Se crean dibujos CAD basados en las características de polígono convertidas utilizando la herramienta Exportar a CAD, proporcionando un formato compatible con el software CAD.
- **Extrusión:** Los dibujos CAD exportados se someten a extrusión para convertir representaciones en 2D en modelos 3D, capturando las relaciones espaciales de las características del subsuelo con los elementos arquitectónicos.
- **Integración en el Modelo BIM:** Finalmente, los modelos 3D extruidos se integran en el entorno BIM, enriqueciendo el modelo con información detallada sobre las características del subsuelo del sitio de patrimonio cultural, como el Cenador de Carlos V.

El objetivo de este enfoque integrado es mejorar la comprensión del sitio y ayudar en la toma de decisiones informadas para estrategias de conservación e investigación dentro del marco de BIM.

El flujo de trabajo (*Figura 5*), también conocido como proceso de trabajo o workflow, es fundamental en cualquier organización o proyecto, ya que establece la secuencia de tareas necesarias para completar una actividad o alcanzar un objetivo específico.

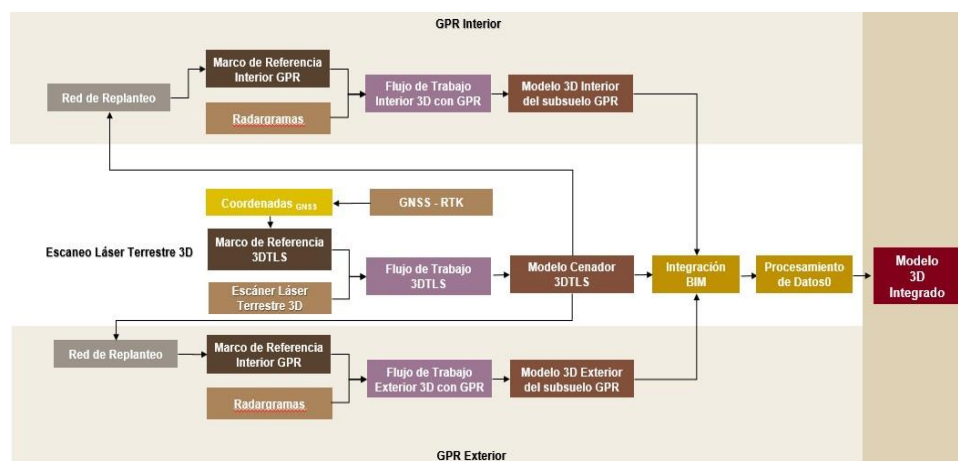


Figura 5. Flujo de Trabajo General para facilitar la integración de GPR al BIM.

Aquí se presentan algunas de las principales razones por las que el flujo de trabajo es importante:

Un flujo de trabajo bien definido y optimizado ayuda a mejorar la eficiencia operativa al eliminar redundancias, minimizar los tiempos de inactividad y garantizar que las tareas se realicen de manera oportuna y coordinada.

Al estandarizar los procesos y procedimientos a través de un flujo de trabajo, se puede garantizar una mayor consistencia y calidad en los resultados. Esto reduce la probabilidad de errores y mejora la confiabilidad de los productos o servicios entregados.

En resumen, el flujo de trabajo es esencial para optimizar la operación y la gestión de cualquier organización o proyecto. Proporciona estructura, consistencia y transparencia en las actividades diarias, promueve la colaboración y la comunicación, y facilita la adaptación y la mejora continua en un entorno empresarial en constante cambio.

#### *4.5 Procesamiento y Análisis de Datos:*

El procesamiento y análisis de los datos recolectados tanto de los levantamientos 3DTLS como de GPR fueron esenciales para extraer información significativa sobre el Cenador de Carlos V y sus alrededores.

Para los datos de 3DTLS, se utilizó un flujo de trabajo sistemático para procesar los datos brutos de la nube de puntos obtenidos del proceso de escaneo. Se realizaron pasos de preprocesamiento, incluida la eliminación de ruido, la detección de valores atípicos y el registro, para garantizar la integridad y precisión de los datos.

Luego se aplicaron algoritmos de extracción y segmentación de características, como Consenso de Muestra Aleatoria (RANSAC) y crecimiento de región, para identificar elementos arquitectónicos clave y detalles ornamentales. Los algoritmos para la reconstrucción de superficies y generación de mallas ayudaron en la creación de modelos 3D detallados tanto de los espacios exteriores como interiores del Cenador.

Paralelamente, los datos de GPR fueron sometidos a una serie de pasos de procesamiento para mejorar la claridad y la interpretabilidad de los perfiles de radar. Antes de que se pueda producir una imagen renderizada en 3D con todos los perfiles de reflexión en una cuadrícula, se deben aplicar procedimientos de procesamiento posteriores a la adquisición a los datos de campo de GPR crudos. En este estudio, se aplicó un procedimiento básico de procesamiento de datos al conjunto de datos crudos utilizando el software RADAN 7 desarrollado por Geophysical Survey Systems, Inc (GSSI).

Como primer paso, se aplicó corrección de tiempo cero, eliminación de fondo y función de ganancia para amplificar la señal recibida y mejorar la identificación de las reflexiones. Los datos 2D crudos también fueron procesados mediante la aplicación de filtros como el filtro de migración de Kirchhoff utilizando la velocidad promedio para eliminación de difracción.

Se obtuvo un modelo GPR-3D del subsuelo al alinear los perfiles 2D procesados para localizar con precisión estructuras enterradas y evidencia de pavimento debajo del sector estudiado. Los mapas de amplitud de corte de profundidad del modelo 3D se utilizaron para identificar características a una profundidad constante.

Una vez que se produjeron los mapas de corte de profundidad, el conjunto de datos fue visualizado utilizando la técnica de renderizado de superficie de isoamplitud (isosuperficie). Además, se realizó una visualización transparente del conjunto de datos GPR en 3D para mejorar la visibilidad de anomalías y características del subsuelo.

La integración de los datos de 3DTLS y GPR se logró mediante técnicas de fusión como el coregistro y la alineación espacial. Esta integración ayudó con la correlación entre características superficiales y anomalías del subsuelo, mejorando la comprensión general del área de estudio.

Se realizó un análisis cuantitativo, que incluyó cálculos volumétricos y mediciones estadísticas, para evaluar las dimensiones, volúmenes y distribución espacial de elementos arquitectónicos y características del subsuelo. Se utilizaron técnicas de visualización, incluido el renderizado en 3D, la realidad virtual (VR) y la realidad aumentada (AR), para comunicar de manera efectiva los hallazgos y permitir una exploración inmersiva.

El flujo de trabajo de procesamiento y análisis de datos proporcionó información valiosa sobre las partes arquitectónicas, arqueológicas y geológicas del Cenador de Carlos V y sus alrededores.

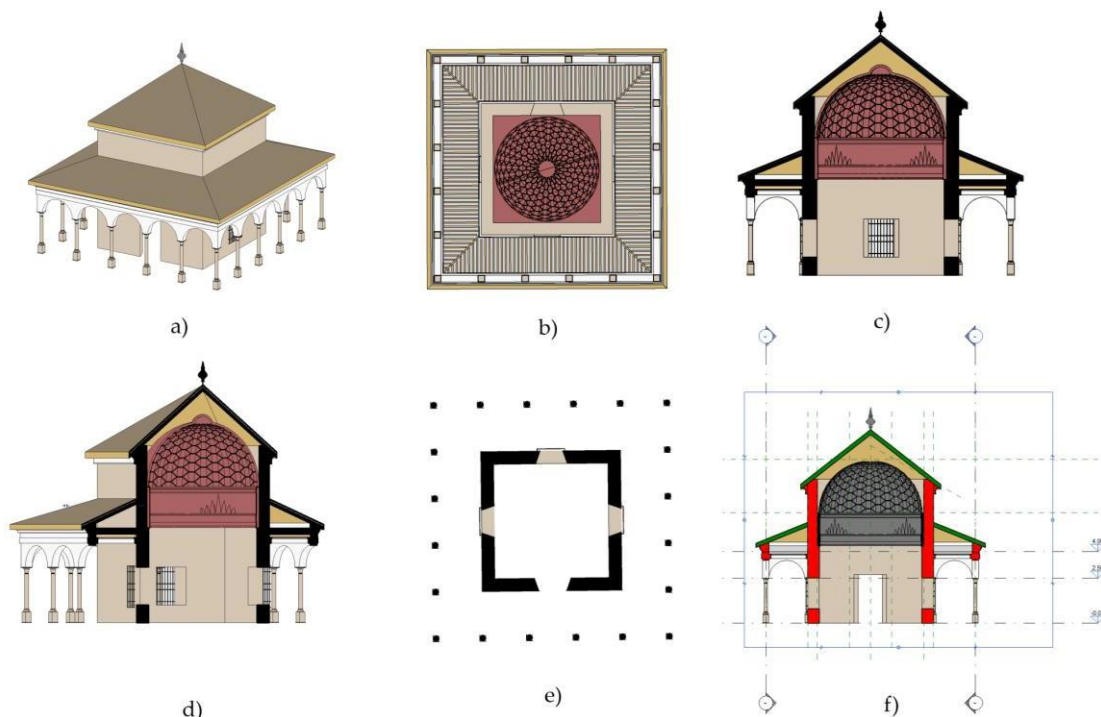
Este enfoque integrado permite una comprensión más profunda de la importancia histórica del Cenador e informa estrategias de conservación e investigación para este sitio de patrimonio cultural. La metodología utilizada sirvió como un marco robusto para la investigación científica y los esfuerzos de conservación, proporcionando información valiosa sobre el patrimonio arquitectónico y geológico del Cenador de Carlos V en Sevilla.

## 5. Resultados

### 5.1 Digitalización en 3D del Cenador de Carlos V

El levantamiento 3DTLS del Cenador de Carlos V produjo un conjunto de datos de nube de puntos completo que capturaba información geométrica detallada sobre el exterior e interior de la estructura. Los modelos 3D resultantes representaban las características arquitectónicas del Cenador, incluidos ornamentos complejos, columnas y fachadas. La documentación digital ayudó con la exploración virtual y visualización del Cenador desde varios puntos de vista, mejorando nuestra comprensión de su distribución espacial y características estéticas.

La nube de puntos se exportó en formato .RCP al software Autodesk ReCap para comprender y verificar las condiciones existentes y los elementos en el sitio para obtener una mejor comprensión y tomar decisiones más acertadas. Posteriormente, se exportó al software Autodesk Revit en formato .RCS y se trabajó como un objeto de modelado 3D completo dentro de la interfaz de Revit. La información de puntos se manipuló para mostrarse en varias vistas de modelado (*Figura 6*): plantas, elevaciones, secciones y en vista 3D. Se creó una estructura de pisos para posicionar con precisión los elementos en el modelo: Nivel 1 (Pavimento), Nivel 2 (Ambas cornisas) y Nivel 3 (Cúpula).



*Figura 6. Vistas del Modelo BIM del Cenador de Carlos V: a) Vista 3D, b) Vista inferior, c) Sección ortográfica del modelo 3D, d) Sección del modelo 3D. e) Planta y f) Posiciones de las secciones horizontal y vertical.*

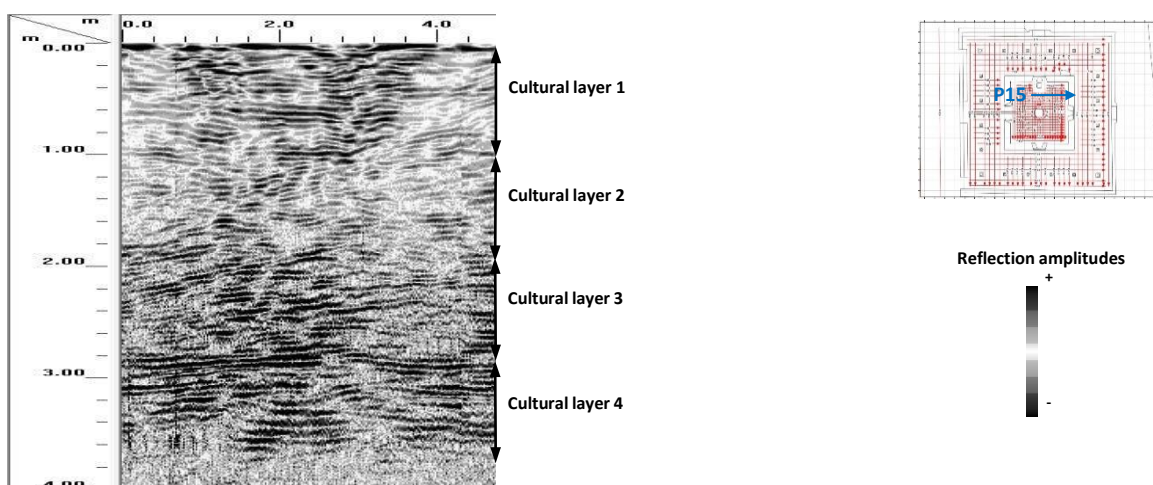


## 5.2 Levantamiento con GPR

Los perfiles de reflexión en 2D proporcionan una visión general del área estudiada del sitio arqueológico. Estos perfiles de radar ilustran las diferencias en el subsuelo. Además, los perfiles muestran principales anomalías a profundidades que van desde 0 hasta 1.10 m (capa cultural 1), desde 1.10 hasta 1.95 m (capa cultural 2), desde 1.95 hasta 2.80 m (capa cultural 3) y desde 2.80 hasta 3.70 m (capa cultural 4), como se muestra en la (Figura 8a). Sin embargo, determinar las características geométricas y dimensionales de las estructuras a partir de datos de GPR en 2D es un proceso que consume tiempo y requiere análisis individual de perfiles de radar. Las técnicas de visualización de GPR en 3D superan esta limitación al caracterizar los restos enterrados en todo el volumen del subsuelo estudiado (Figura 8b). Estas anomalías revelan la presencia de varias capas culturales, que pueden contener restos enterrados, sobre los cuales se construyó el Cenador de Carlos V.

Además, la técnica de renderizado de isosuperficie permitió la visualización de superficies de amplitud igual en el volumen estudiado. Esta visualización de datos de GPR en 3D reprodujo y resaltó especialmente las características geométricas de las reflexiones, derivadas de restos arqueológicos, con un fuerte contraste con el entorno circundante del volumen analizado.

Esta imagen de isosuperficie (Figura 7) se coloreó en gris-negro para mostrar estos valores de amplitud, mientras que otros se hicieron transparentes para representar solo los restos arqueológicos y simplificar su detección e interpretación de datos. La visualización transparente del conjunto de datos de GPR en 3D se realizó para revelar en 3D las principales anomalías (estructuras enterradas) en el volumen estudiado (Figura 8c). Estos resultados arrojan luz sobre la evolución histórica de la construcción del área donde se encuentra el Cenador.



a)

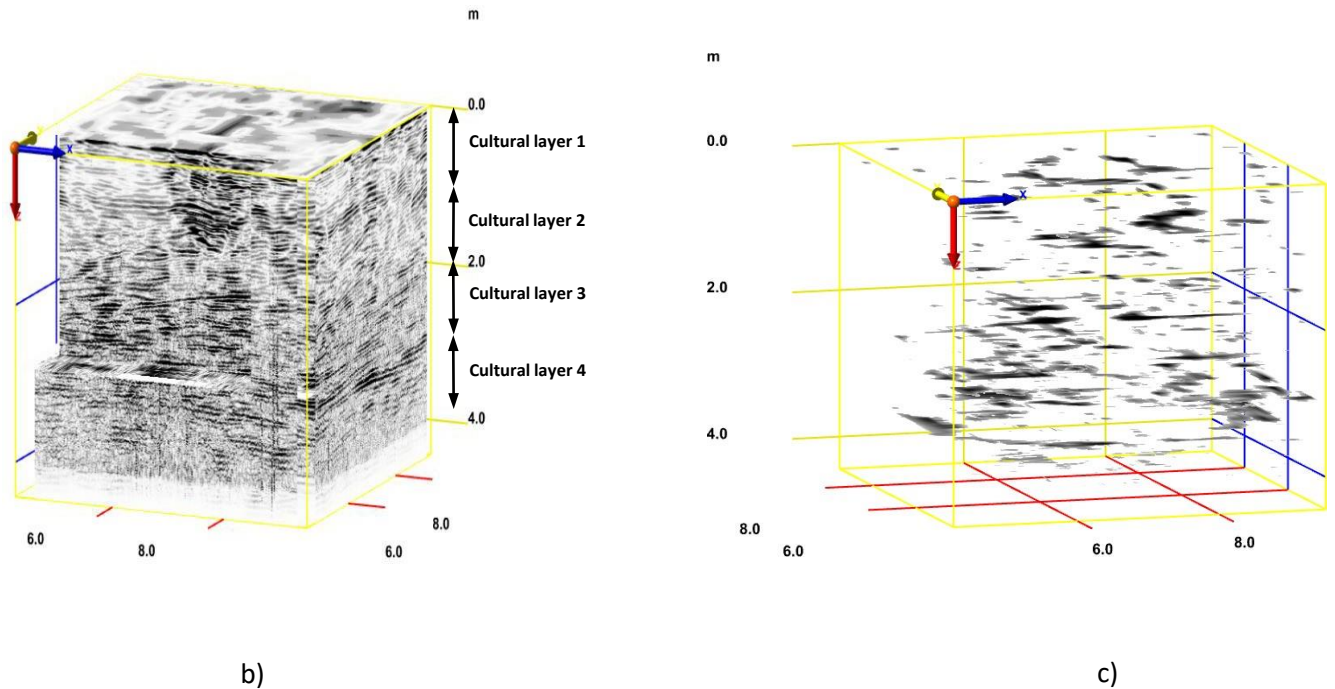


Figura 7. a) Perfil de reflexión P15 y b) Imágenes de sección radar en 3D después de procesar los datos crudos, mostrando evidencia subterránea de estructuras y capas culturales, cuyos espesores de capa están indicados por flechas negras; c) imagen de iso-superficie en el volumen estudiado, mostrando las principales anomalías (estructuras enterradas) detectadas y otros puntos de reflexión coloreados en gris-negro.

### 5.3 Integración de los Datos de 3DTLS y GPR:

La integración de los datos de 3DTLS y GPR permitió un análisis holístico de las características superficiales y del subsuelo del Cenador. El coregistro de los modelos 3D derivados de 3DTLS con los cortes de profundidad de GPR ayudó con la correlación de las características superficiales con las anomalías del subsuelo, mejorando nuestra comprensión del diseño arquitectónico del Cenador y las estructuras subterráneas.

A pesar de ser un ejemplo destacado de arquitectura española y un monumento histórico significativo, su relación con el subsuelo circundante ha sido poco estudiada. Este estudio aborda esta brecha de conocimiento aplicando técnicas avanzadas de adquisición y análisis de datos para comprender mejor la interacción entre la arquitectura del Cenador y las características geológicas y arqueológicas del subsuelo.

La metodología se dividió en dos fases principales:

**Adquisición de Datos:** Se realizó un escaneo láser terrestre detallado del Cenador para capturar su geometría con precisión centimétrica. Concurrentemente, se realizaron estudios con GPR en el área circundante para detectar posibles anomalías o estructuras del subsuelo.

**Análisis Integrado:** Los datos obtenidos se procesaron para permitir la integración. Se emplearon técnicas de visualización tridimensional y análisis espacial para explorar la relación entre las características superficiales y del subsuelo, identificar patrones y correlaciones significativas y generar hipótesis sobre la evolución del sitio.

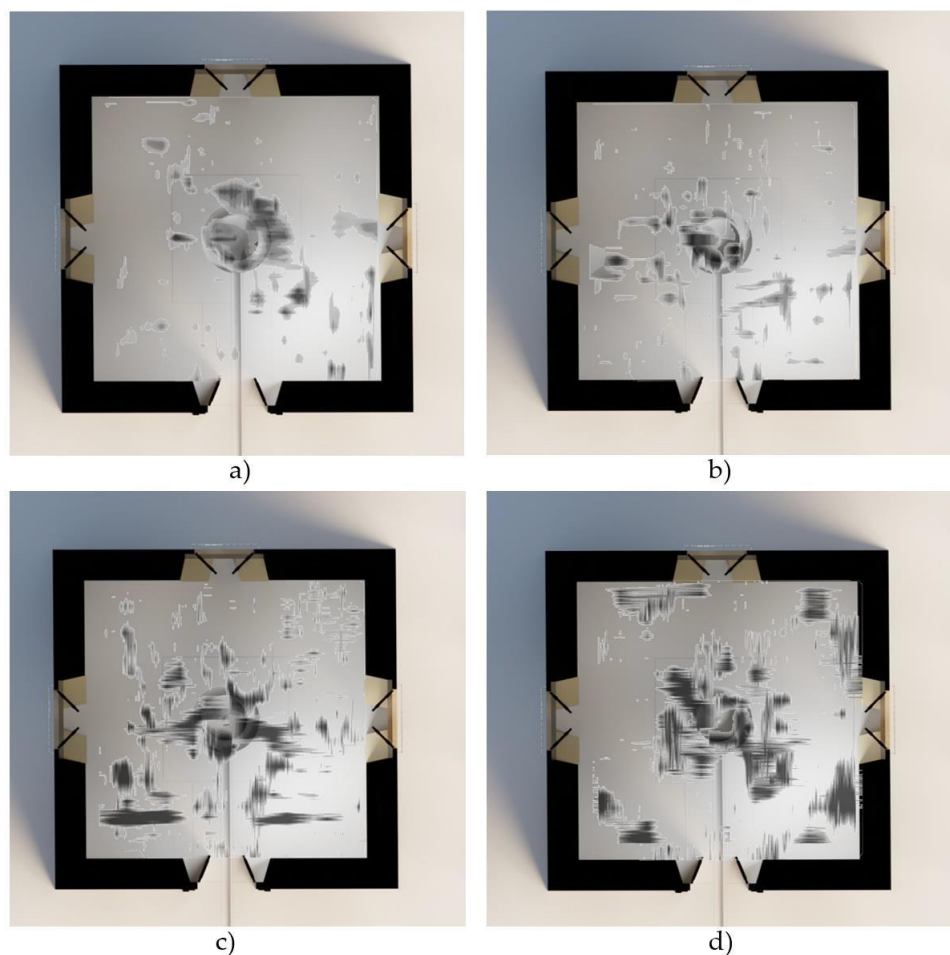
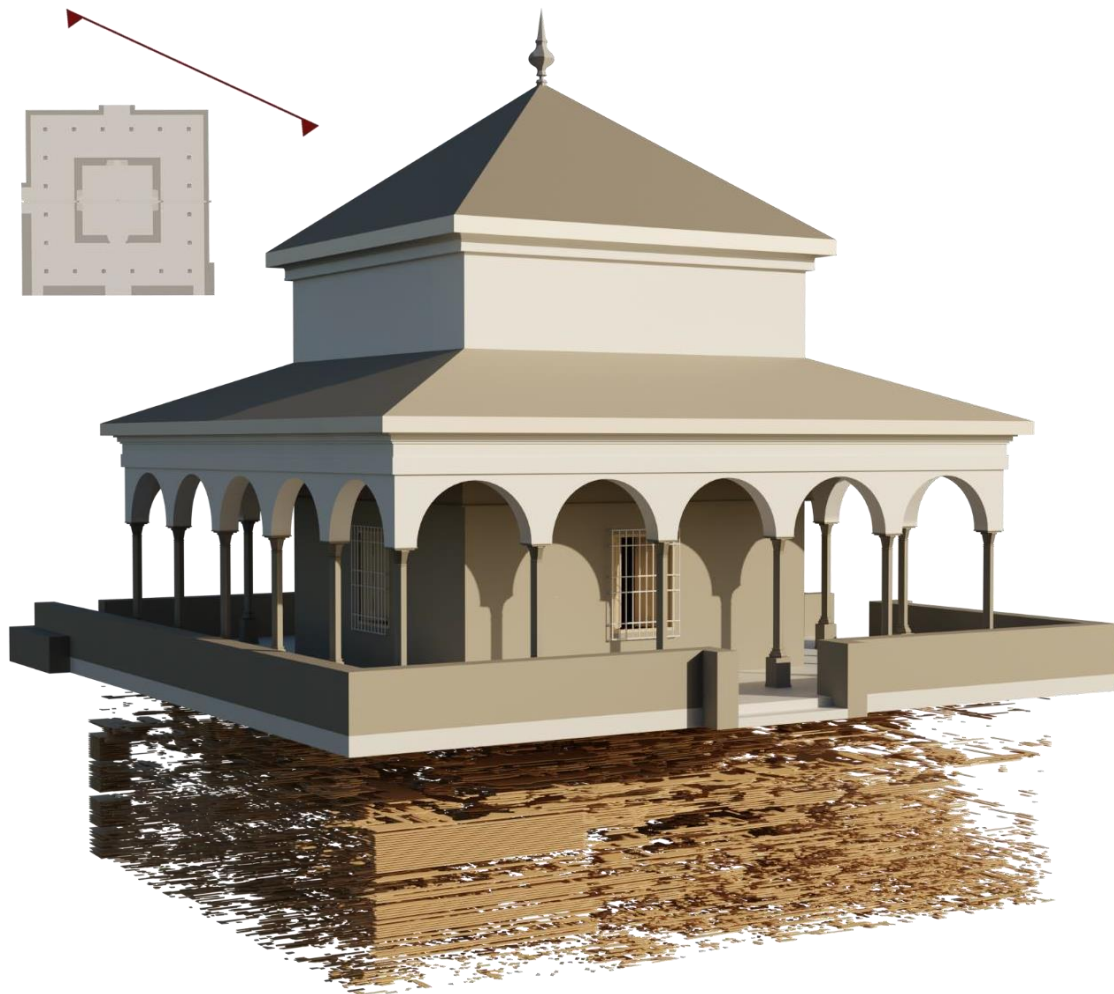


Figura 8. Ejemplos de anomalías raster superpuestas en el modelo 3D debido a las diferentes estructuras detectadas en cada capa cultural: a) 66 cm de profundidad en la capa cultural 1, b) 133 cm de profundidad en la capa cultural 2, c) 222 cm de profundidad en la capa cultural 3 y d) 311 cm de profundidad en la capa cultural 4.

Los datos de GPR pueden visualizarse en varios formatos para mejorar la interpretación. Una representación común es como una capa raster (*Figura 8*), donde cada píxel corresponde a una ubicación específica y tiene la amplitud de la señal de radar reflejada desde el subsuelo. Esta representación raster proporciona información detallada sobre la fuerza y distribución de las reflexiones del subsuelo.

También pueden mostrarse como una capa vectorial, donde se aplican umbrales para binarizar los datos (*Figura 10*). En este formato, se delinean las áreas que superan cierto umbral de intensidad de señal, lo que permite la identificación y el mapeo de anomalías del subsuelo con mayor claridad. La disponibilidad de representaciones tanto raster como vectoriales ofrece flexibilidad en el análisis de datos de GPR, atendiendo a diferentes objetivos de investigación y mejorando la comprensión general de las características del subsuelo debajo del Cenador de Carlos V y sus alrededores.



*Figura 9. Integración de los datos del GPR en el Modelo 3D*

#### 5.4 Análisis Cuantitativo y Visualización:

La integración de modelos de Revit con datos del subsuelo (*Figura 9*) permitió un análisis cuantitativo y visualización exhaustivos de los elementos arquitectónicos, anomalías del subsuelo y características arqueológicas dentro del área de estudio.

Aprovechando las capacidades de Revit, los elementos arquitectónicos se modelaron y midieron con precisión, proporcionando métricas precisas para evaluar sus dimensiones y distribución espacial. Simultáneamente, las anomalías del subsuelo detectadas mediante GPR se incorporaron al análisis, lo que permitió la caracterización de características subterráneas.



*Figura 10. Vista Combinada Interior de la Integración.*

Estructuralmente, podemos observar que el Cenador de Carlos V presenta varias características distintivas:

1. *Forma y diseño:* El cenador tiene una planta octogonal, lo que le confiere una estructura geométrica única. Cada uno de sus lados está adornado con arcos de medio punto, típicos del estilo renacentista español.

2. *Columnas y arquerías:* Se encuentra sostenido por una serie de columnas que se elevan desde una base baja. Estas columnas sostienen una serie de arquerías que rodean el perímetro del cenador, creando un espacio abierto y ventilado.

3. *Cubierta:* La cubierta del Cenador está formada por una serie de bóvedas de media naranja que se unen en el centro para formar una cúpula. Esta cúpula está coronada por una linterna que permite la entrada de luz natural al interior del cenador.

4. *Materiales de construcción:* El edificio está construido principalmente con piedra y ladrillo, materiales típicos de la arquitectura renacentista española. Estos materiales le confieren al cenador una apariencia sólida y duradera.

5. *Detalles ornamentales:* El cenador está decorado con una serie de detalles ornamentales, incluyendo molduras, frisos y elementos escultóricos que realzan su belleza arquitectónica y reflejan el estilo renacentista de la época.

El resultado principal del proceso de integración BIM son los modelos tridimensionales del proyecto. Además de los modelos tridimensionales, el proceso de integración BIM puede generar modelos 4D y 5D que incluyen información sobre la programación (4D) y el presupuesto (5D) del proyecto. Los modelos 4D agregan una dimensión temporal al proyecto, lo que permite visualizar y gestionar la secuencia de construcción y el cronograma de actividades. Los modelos 5D incorporan datos de presupuestos en el modelo, lo que facilita la estimación, seguimiento y control del proyecto.

El proceso de integración BIM también produce documentación detallada relacionada con el proyecto, como planos, secciones y anomalías. Esta documentación se deriva directamente del modelo BIM y se puede generar de manera automatizada y coherente, lo que garantiza la precisión y la consistencia en todos los documentos producidos.

## 6. Presupuesto

El cálculo del presupuesto de un proyecto de integración BIM se rige por la legislación vigente en materia de contratación pública, así como por las normativas específicas relacionadas con la aplicación de esta metodología en el sector de la construcción.

La contratación pública en España está regulada por la **Ley de Contratos del Sector Público (LCSP)**, que establece los principios y procedimientos que deben seguirse en la contratación de obras, servicios y suministros por parte de las administraciones públicas. El cálculo del presupuesto de un proyecto BIM debe cumplir con los requisitos establecidos en esta ley, incluyendo la obligación de establecer un presupuesto base de licitación y de calcular los precios unitarios de los diferentes elementos del proyecto de acuerdo con los criterios de valoración establecidos.

El **Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana** de España ha desarrollado directrices y documentos técnicos relacionados con la implementación de la metodología BIM en el sector de la construcción. Estos documentos proporcionan orientación sobre cómo integrar el enfoque BIM en los procesos de contratación pública, incluyendo la definición de los requerimientos BIM que deben cumplir los licitadores y contratistas, así como la forma de calcular los costos asociados con la implementación de BIM en el proyecto.

El presupuesto de un proyecto de integración BIM incluirá los costos asociados con la adopción y aplicación de la metodología BIM a lo largo del ciclo de vida del proyecto. Esto puede incluir costos relacionados con la creación y mantenimiento de modelos BIM, capacitación del personal, adquisición de software y hardware, interoperabilidad de sistemas, gestión de la información, entre otros aspectos.

En el contexto de BIM, la medición y presupuestación se pueden realizar de manera más precisa y detallada utilizando modelos BIM para calcular cantidades y generar presupuestos basados en la información contenida en los modelos. Esto requiere el desarrollo de protocolos y estándares para la medición y presupuestación BIM, así como el uso de software especializado que pueda extraer automáticamente información cuantitativa del modelo.

**Caracterización geométrica y prospección geofísica mediante la técnica del georradar del Cenador de Carlos V**

1 Elaboración del Marco Referencial mediante GNSS:	150,00 €
1 Caracterización mediante Láser Escaner 3D interior y exterior:	900,00 €
1 Preprocesado de la Información Capturada mediante LE3D:	600,00 €

*(Incluye las tareas de filtrado, registro y alineación de las nubes de puntos).*

1 Plano en Planta	100,00 €
1 Modelado BIM	800,00 €
1 Adquisición de Datos GPR:	900,00 €

*(Adquisición de los datos en forma de cuadrícula.  
Equipo: (GSSI modelo SIR4000 + antena de 300/800 MHz)*

1 Procesado de Datos GPR:	750,00 €
Integración de Datos GPR-BIM en entorno 3D y Visualización De Resultados (Infografías)	600,00€

**TOTAL 4.800 € + IVA (21%)**

*Tabla 1. Presupuesto del Proyecto.*

En resumen, el cálculo del presupuesto de un proyecto de integración BIM implica cumplir con la legislación de contratación pública, seguir las directrices BIM establecidas por las autoridades competentes y considerar los costos asociados con la adopción y aplicación de la metodología BIM a lo largo del ciclo de vida del proyecto.



## **7. Conclusiones**

La integración de datos geomáticos del Cenador de Carlos V, como el GNSS, el láser escáner 3D y el georradar, integrados en un sistema BIM permite una comprensión completa y detallada del bien y entorno patrimonial. El GNSS proporciona una ubicación precisa en el espacio, mientras que el láser escáner 3D captura con precisión la geometría y los detalles del bien cultural. Por otro lado, el georradar revela información crucial del subsuelo, como estructuras enterradas o cambios geológicos. Al integrar estos datos en un sistema BIM, se crea un entorno digital que no solo representa el Patrimonio en su contexto físico, sino que también permite almacenar información valiosa sobre su historia, condiciones estructurales y entorno circundante. Esto facilita la gestión integral del Patrimonio, desde la conservación y planificación hasta la toma de decisiones informada y la comunicación efectiva con todas las partes interesadas.

Los resultados del estudio integrado de imagen y prospección geofísica del Cenador de Carlos V proporcionan valiosas perspectivas sobre su importancia arquitectónica, arqueológica e histórica. A través de esta metodología interdisciplinar, hemos descubierto nuevos conocimientos sobre la compleja relación entre las estructuras superficiales y las características del subsuelo, enriqueciendo nuestra comprensión de los paisajes históricos y los contextos arqueológicos.

Simultáneamente, la incorporación de datos del subsuelo, adquiridos a través de estudios de GPR, proporcionó una comprensión más profunda de la geología y arqueología subyacentes del sitio. La interpretación involucró la identificación de patrones de reflexión, anomalías y discontinuidades que indican estructuras enterradas, restos arqueológicos o formaciones geológicas.

La identificación de anomalías del subsuelo, como cimientos o infraestructuras enterradas, ofreció pistas valiosas sobre el uso del suelo pasado y la actividad humana, contribuyendo a nuestro conocimiento de los patrones de desarrollo histórico.

Además, la integración de modelos de Revit y datos del subsuelo permite análisis cuantitativos y evaluaciones estadísticas, revelando patrones y correlaciones dentro del conjunto de datos. Estos hallazgos no solo mejoran nuestra comprensión de características arquitectónicas individuales, sino que también conforman interpretaciones más amplias de la evolución del sitio y su importancia cultural.

Con estas herramientas, es más sencillo superar las dificultades relacionadas con el modelado (incluso en presencia de fuertes irregularidades, ornamentos elaborados, sistemas constructivos en desuso) y nos permite aprovechar al máximo todas las ventajas del BIM.

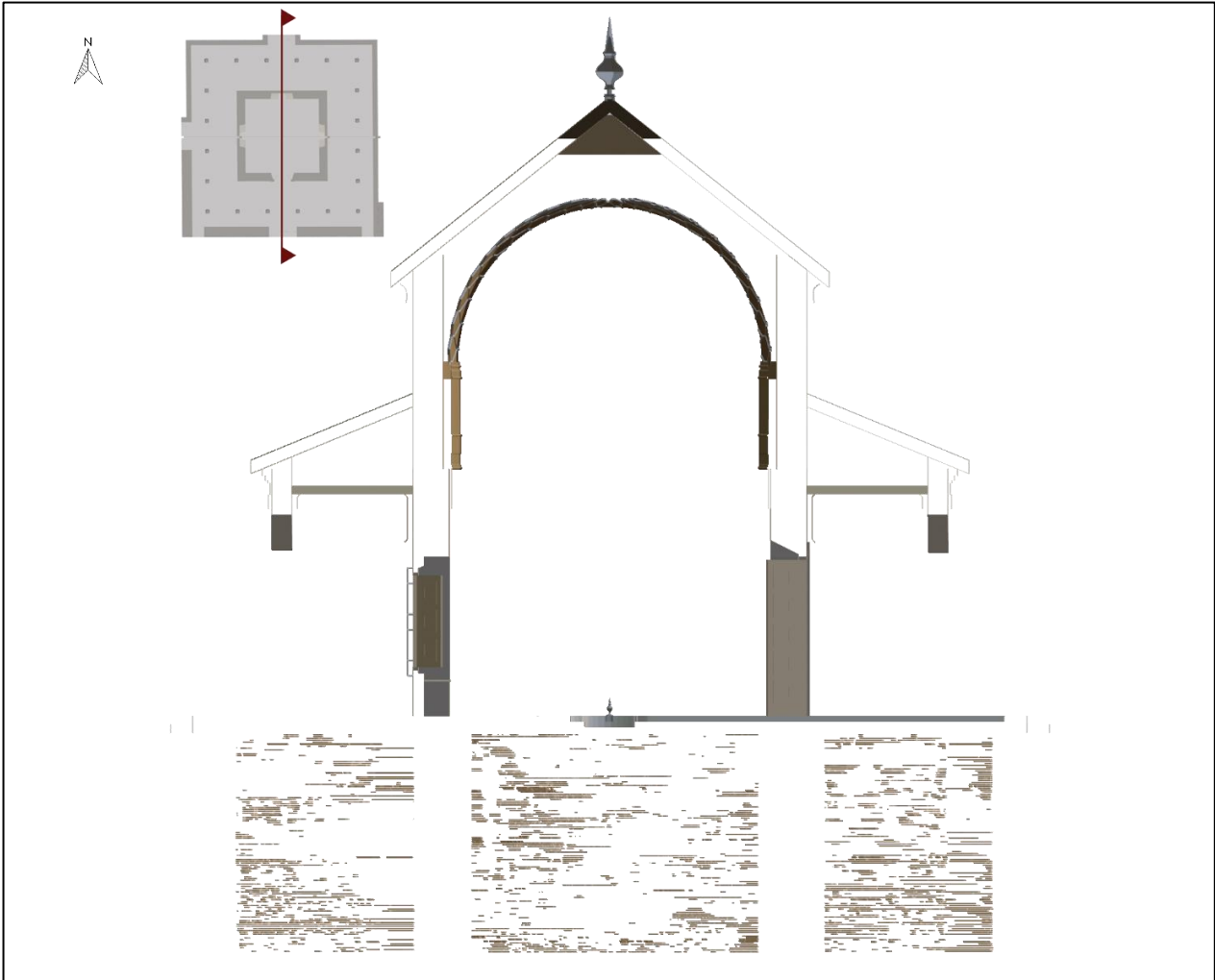
## 8. Bibliografía

1. Carriazo-Arroquía, J.M. *La boda de un emperador. Notas para una historia de amor en el Alcázar de Sevilla*; Archivo Hispalense, XXX, 1959; pp. 2-108.
2. Marín Fidalgo, A. *El Alcázar de Sevilla bajo los Austrias*; Guadalquivir, Seville, Spain, 1990; pp. 900.
3. Zhang, D.; Wu, Z.; Shi, D.; Li, J.; Lu, Y. Integration of Terrestrial Laser Scanner (TLS) and Ground Penetrating Radar (GPR) to Characterize the Three-Dimensional (3D) Geometry of the Maoyaba Segment of the Litang Fault, Southeastern Tibetan Plateau. *Remote Sens.* **2022**, *14*, 6394. <https://doi.org/10.3390/rs14246394>
4. Porcelli, F.; Sambuelli, L.; Comina, C.; Spanò, A.; Lingua, A.; Calantropio, A.; Catanzariti, G.; Chiabrando, F.; Fischanger, F.; Maschio, P.; et al. Integrated Geophysics and Geomatics Surveys in the Valley of the Kings. *Sensors* **2020**, *20*, 1552. <https://doi.org/10.3390/s20061552>
5. Caldeira, B.; Oliveira, R.J.; Teixidó, T.; Borges, J.F.; Henriques, R.; Carneiro, A.; Peña, J.A. Studying the Construction of Floor Mosaics in the Roman Villa of Pisões (Portugal) Using Noninvasive Methods: High-Resolution 3D GPR and Photogrammetry. *Remote Sens.* **2019**, *11*, 1882. <https://doi.org/10.3390/rs11161882>
6. Solla, M.; Gonçalves, L.M.S.; Gonçalves, G.; Francisco, C.; Puente, I.; Providência, P.; Gaspar, F.; Rodrigues, H. A Building Information Modeling Approach to Integrate Geomatic Data for the Documentation and Preservation of Cultural Heritage. *Remote Sens.* **2020**, *12*, 4028. <https://doi.org/10.3390/rs12244028>
7. Angelini, A.; Cozzolino, M.; Gabrielli, R.; Gentile, V.; Mauriello, P. Three-Dimensional Modeling and Non-Invasive Diagnosis of a Huge and Complex Heritage Building: The Patriarchal Basilica of Santa Maria Assunta in Aquileia (Udine, Italy). *Remote Sens.* **2023**, *15*, 2386. <https://doi.org/10.3390/rs15092386>
8. De Luca, L., 2023. A digital ecosystem for the multidisciplinary study of Notre Dame de Paris. *Journal of Cultural Heritage* S129620742300184X. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2023.09.011>
9. Néroulidis A, Pouyet T, Tournon S, Rousset M, Callieri M, Manuel A, De Luca L, et al. A digital platform for the centralization and long-term preservation of multidisciplinary scientific data belonging to the Notre Dame de Paris scientific action. *J Cult Herit.* **2023**. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2023.09.016>.
10. TOPCON. Topcon Hyper II GNSS Receiver Specifications. Available online: <https://topconcare.com/en/hardware/gnss-receivers/hiper-ii/specifications/> (accessed on 27 February 2024).
11. TOPCON. Topcon Tools 8. Technical Datasheet. Available online: <https://topconcare.com/en/software/office-applications/topcon-tools-8/> (accessed on 27 February 2024).
12. FARO. FARO Laser Scanner Focus 3D X 330 Technical Datasheet. Available online: <https://downloads.faro.com/index.php/s/z6nEwtBPDpGpMYW?dir=undefined&openfile=42057> (accessed on 8 April 2024).
13. Bayarri, V., Castillo, E., García-Moncó, J.M., Calonge Díez, J. Integration of metrological and termographic techniques for the monitoring tracking and measuring of the influence of the temperature in the movement of the canvas in the south transept of the Church of the Convent of San Luis in San Vicente de la Barquera (Cantabria). In REHABEN 2014. Congreso Latinoamericano sobre “patología de la construcción, tecnología de la rehabilitación y gestión del patrimonio”. Santander, Spain, 1-4 April 2014
14. Bayarri, V., Castillo, E., García-Moncó, J.M., Calonge Díez, J. LOS NUEVOS ALGORITMOS DE PROCESADO Y TENDENCIAS EN GEOMETRÍA COMPUTACIONAL PARA LA EXPLOTACIÓN Y VALORACIÓN DE DATOS 3D. In REHABEN 2014. Congreso Latinoamericano sobre “patología de la construcción, tecnología de la rehabilitación y gestión del patrimonio”. Santander, Spain, 1-4 April 2014
15. Bayarri, V.; Castillo, E.; Ripoll, S.; Sebastián, M.A. Control of Laser Scanner Trilateration Networks for Accurate Georeferencing of Caves: Application to El Castillo Cave (Spain). *Sustainability* **2021**, *13*, 13526. <https://doi.org/10.3390/su132413526>.
16. Thomas, A. M.; Rogers, C. D. F.; Chapman, D. N.; Metje, N.; Castle, J. Stakeholder needs for ground penetrating radar utility location. *Journal of Applied Geophysics*, **2009**, *67*, 345-351. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2008.07.006>
17. Conyers, L. B. Discovery, mapping and interpretation of buried cultural resources non-invasively with ground-penetrating radar. *Journal of Geophysics and Engineering* **2011**, *8*, S13-S22. <https://doi.org/10.1088/1742-2132/8/3/S02>
18. Barone, P.M.; Ruffell, A.; Tsokas, G.N.; Rizzo, E. Geophysical Surveys for Archaeology and Cultural Heritage Preservation. *Heritage* **2019**, *2*, 2814-2817. <https://doi.org/10.3390/heritage2040174>
19. Núñez-Nieto, X.; Solla, M.; Novo, A.; Lorenzo, H. Three-dimensional ground-penetrating radar methodologies for the characterization and volumetric reconstruction of underground tunneling. *Construction and Building materials* **2014**, *71*, 551-560. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.08.083>
20. Grasmueck, M.; Weger, R.; Horstmeyer, H. Full-resolution 3D GPR imaging. *Geophysics* **2005**, *70*, K12-K19. <https://doi.org/10.1190/1.1852780>
21. dos Reis Jr, J. A.; de Castro, D. L.; de Jesus, T. E. S.; Lima Filho, F. P. Characterization of collapsed paleocave systems using GPR attributes. *Journal of Applied Geophysics* **2014**, *103*, 43-56. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2014.01.007>
22. García-García, F.; Valls-Ayuso, A.; Benlloch-Marco, J.; Valcuende-Payá, M. An optimization of the work disruption by 3D cavity mapping using GPR: A new sewerage project in Torrente (Valencia, Spain). *Construction and Building Materials* **2017**, *154*, 1226-1233. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.06.116>

23. Grasmueck, M.; Quintà, M.C.; Pomar, K.; Eberli, G.P. Diffraction imaging of subvertical fractures and karst with full-resolution 3D Ground-Penetrating Radar. *Geophys. Prospect.* **2013**, *61*, 907–918. <https://doi.org/10.1111/1365-2478.12004>.
24. Conyers, L.B. *Ground-Penetrating Radar for Archaeology*, 3rd ed.; Rowman and Littlefield Publishers: Lanham, MD, USA; Alta Mira Press: Lanham, MD, USA, 2013; p. 241.
25. Daniels, D.J. *Ground Penetrating Radar*, 2nd ed.; IEE Radar, Sonar and Navigation Series 15 ed.; The Institution of Electrical Engineers: London, UK, 2004; p. 752. <https://doi.org/10.1049/pbra015e>.
26. Jol, H.M. *Ground Penetrating Radar Theory and Applications*, 1st ed.; Elsevier Science: Amsterdam, The Netherlands, 2009; pp. 544.
27. Jol, H.M. Ground penetrating radar antennae frequencies and transmitter powers compared for penetration depth, resolution and reflection continuity. *Geophys. Prospect.* **1995**, *43*, 693–709. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2478.1995.tb00275.x>.
28. Bayarri, V.; Prada, A.; García, F.; Díaz-González, L.M.; De Las Heras, C.; Castillo, E.; Fatás, P. Integration of Remote-Sensing Techniques for the Preventive Conservation of Paleolithic Cave Art in the Karst of the Altamira Cave. *Remote Sens.* **2023**, *15*, 1087. <https://doi.org/10.3390/rs15041087>.
29. Bayarri, V.; Prada, A.; García, F. A Multimodal Research Approach to Assessing the Karst Structural Conditions of the Ceiling of a Cave with Palaeolithic Cave Art Paintings: Polychrome Hall at Altamira Cave (Spain). *Sensors* **2023**, *23*, 9153. <https://doi.org/10.3390/s23229153>.
30. Bayarri, V.; Prada, A.; García, F.; De Las Heras, C.; Fatás, P. A Multisensory Analysis of the Moisture Course of the Cave of Altamira (Spain): Implications for Its Conservation. *Remote Sens.* **2024**, *16*, 197. <https://doi.org/10.3390/rs16010197>.
31. Fischler, M.A.; Bolles, R.C. Random sample consensus—A paradigm for model-fitting with applications to image-analysis and automated cartography. *Commun. ACM* **1981**, *24*, 381–395.
32. Sampath, A.; Shan, J. Segmentation and reconstruction of polyhedral building roofs from aerial Lidar point clouds. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* **2010**, *48*, 1554–1567.
33. Schnabel, R.; Wahl, R.; Klein, R. Efficient RANSAC for point-cloud shape detection. *Comput. Graph. Forum* **2007**, *26*, 214–226.
34. Autodesk ReCap Pro. Available online: <https://www.autodesk.it/products/recap/overview?term=1-YEAR&tab=subscription> (accessed on 21 February 2022).
35. Autodesk Revit Software. Available online: <https://www.autodesk.com/products/revit/architecture> (accessed on 15 April 2024).
36. Gutierrez, I.; Weibull, W.; Watson, L.; Olsen, T.M.; Escalona, A. Holistic 3D Model of an Urban Area in Norway: An Integration of Geophysical, Geotechnical, Remote Sensing, and Geological Methods. *Remote Sens.* **2023**, *15*, 2872. <https://doi.org/10.3390/rs15112872>.
37. Rolim, R.; López-González, C.; Viñals, M.J. Analysis of the Current Status of Sensors and HBIM Integration: A Review Based on Bibliometric Analysis. *Heritage* **2024**, *7*, 2071–2087. <https://doi.org/10.3390/heritage7040098>.
38. Jacoby, M.; Usländer, T. Digital Twin and Internet of Things—Current Standards Landscape. *Appl. Sci.* **2020**, *10*, 6519. <https://doi.org/10.3390/app10186519>.
39. Raimundo, J.; Medina, S.L.-C.; Mata, J.A.d.; Herrero-Tejedor, T.R.; Priego-de-los-Santos, F. Deep Learning Enhanced Multisensor Data Fusion for Building Assessment Using Multispectral Voxels and Self-Organizing Maps. *Heritage* **2024**, *7*, 1043–1073. <https://doi.org/10.3390/heritage7020051>.
40. Rodrigues, F.; Cotella, V.; Rodrigues, H.; Rocha, E.; Freitas, F.; Matos, R. Application of Deep Learning Approach for the Classification of Buildings' Degradation State in a BIM Methodology. *Appl. Sci.* **2022**, *12*, 7403. <https://doi.org/10.3390/app12157403>.
41. "Excavación arqueológica buscará tumbas de reyes islámicos en el Cenador de Carlos V en el Alcázar". El Español, 8 de mayo de 2024, [https://www.elespanol.com/sevilla/20240508/excavacion-arqueologica-buscara-tumbas-reyes-islamicos-cenador-carlos-alcazar/853665007\\_0.html](https://www.elespanol.com/sevilla/20240508/excavacion-arqueologica-buscara-tumbas-reyes-islamicos-cenador-carlos-alcazar/853665007_0.html)
42. <https://www.geophysical.com/products/utilityscan-df>

## 9. Cartografía





ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR  
DE INGENIERÍA GEODÉSICA  
CARTOGRÁFICA Y TOPOGRÁFICA

TRABAJO FINAL DE GRADO EN INGENIERÍA  
GEOMÁTICA Y TOPOGRAFÍA

María Zaragoza Pareja  
Autor Proyecto

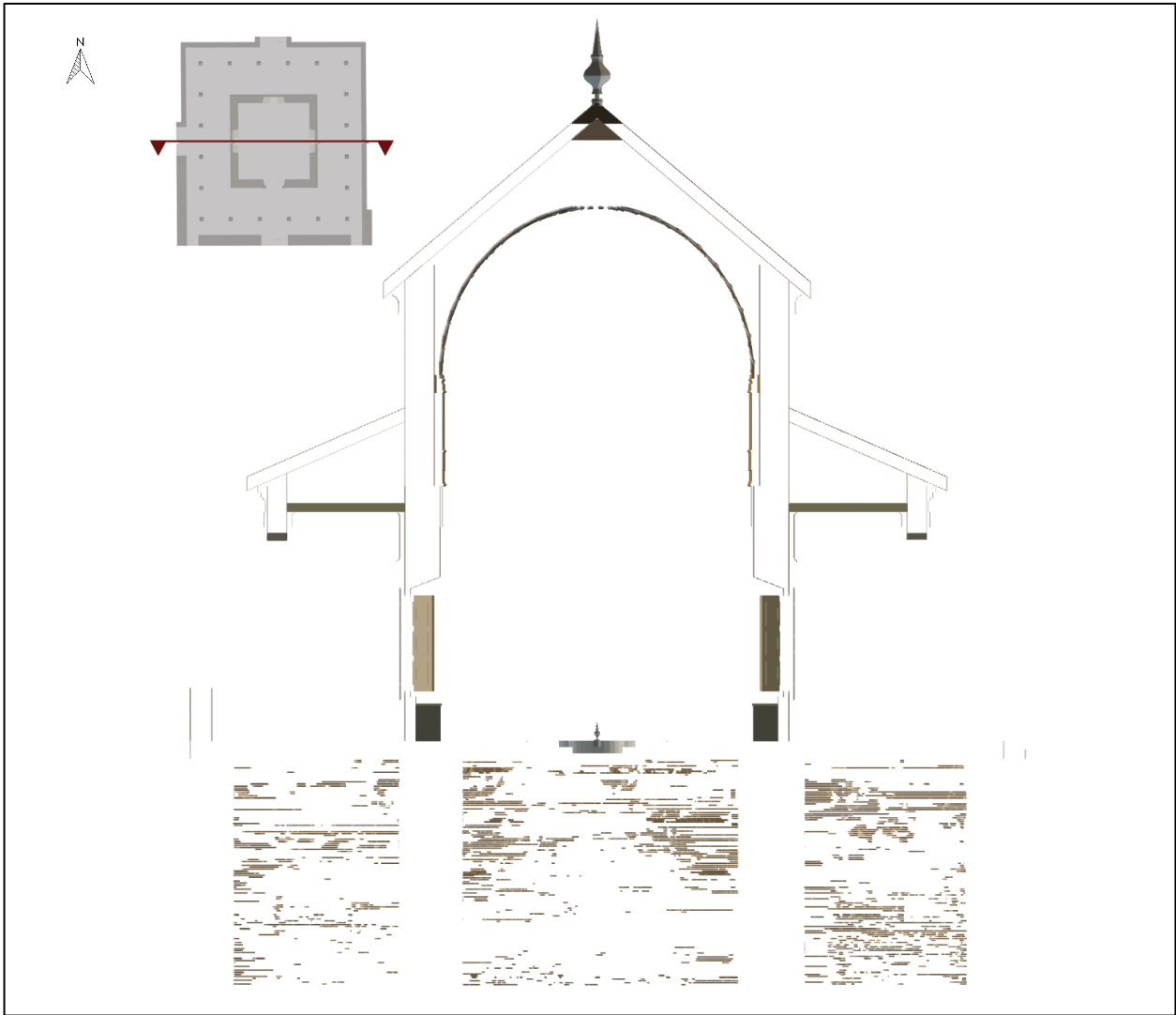
Proyecto:  
INTEGRACIÓN DE TÉCNICAS GEOMÁTICAS Y GEOFÍSICAS  
PARA LA MODELIZACIÓN DEL CENADOR DE CARLOS V EN  
SEVILLA

Escala:  
MODELO BIM

Plano:  
INFOGRAFÍA SECCIÓN NORTE DEL CENADOR  
Y ANOMALÍAS SUBSUELO

Fecha:  
Mayo 2024

Nº Plano:  
2



ESCUOLA TÉCNICA SUPERIOR  
DE INGENIERÍA GEODÉSICA  
CARTOGRÁFICA Y TOPOGRÁFICA

TRABAJO FINAL DE GRADO EN INGENIERÍA  
GEOMÁTICA Y TOPOGRAFÍA

María Zaragoza Pareja  
Autor Proyecto

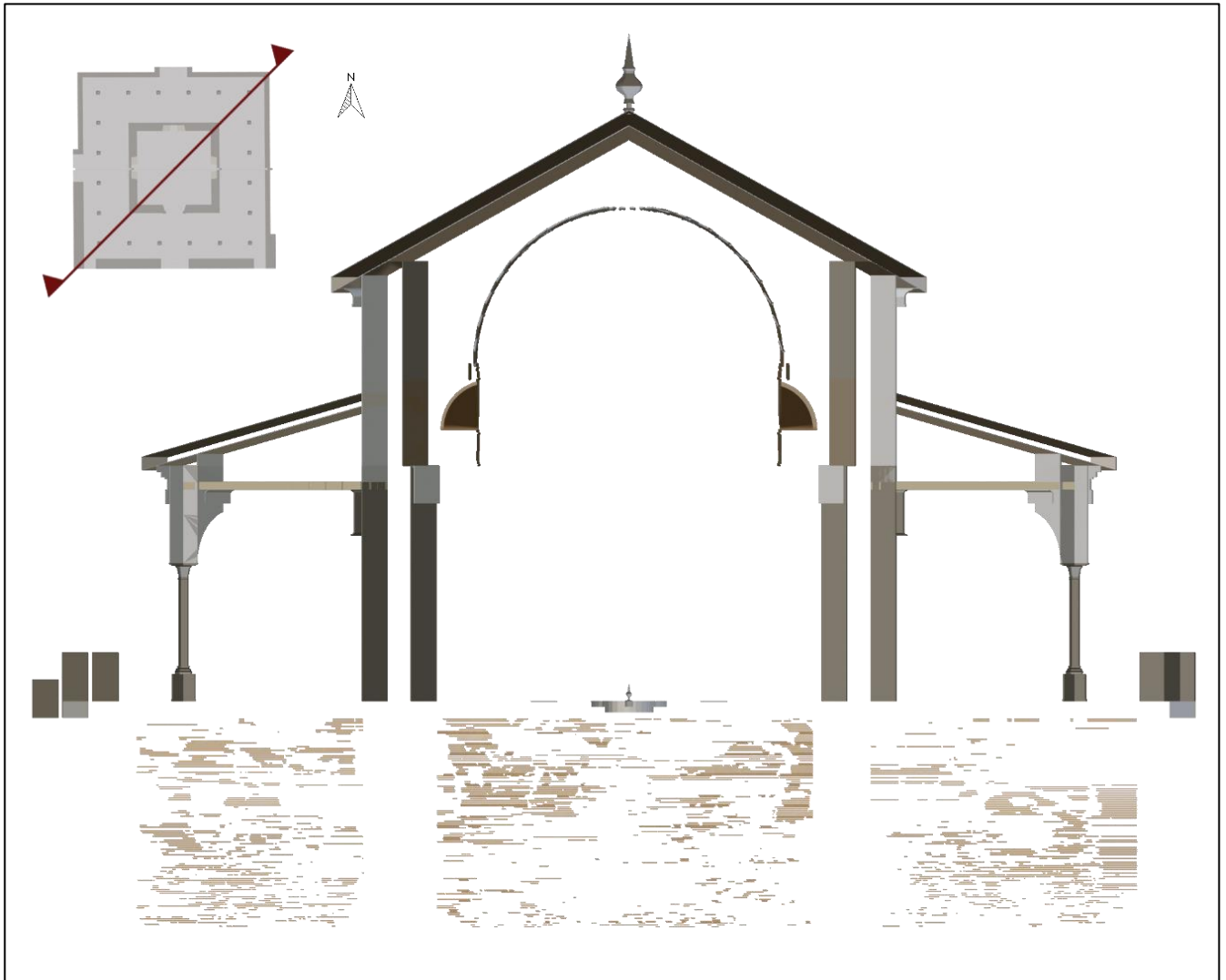
Proyecto:  
INTEGRACIÓN DE TÉCNICAS GEOMÁTICAS Y GEOFÍSICAS  
PARA LA MODELIZACIÓN DEL CENADOR DE CARLOS V EN  
SEVILLA

Escala:  
MODELO BIM

Plano:  
INFOGRAFÍA SECCIÓN SUR DEL CENADOR  
Y ANOMALÍAS SUBSUELO

Fecha:  
Mayo 2024

Nº Plano:  
3



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA GEODÉSICA CARTOGRÁFICA Y TOPOGRÁFICA

TRABAJO FINAL DE GRADO EN INGENIERÍA GEOMÁTICA Y TOPOGRAFÍA

María Zaragoza Pareja  
Autor Proyecto

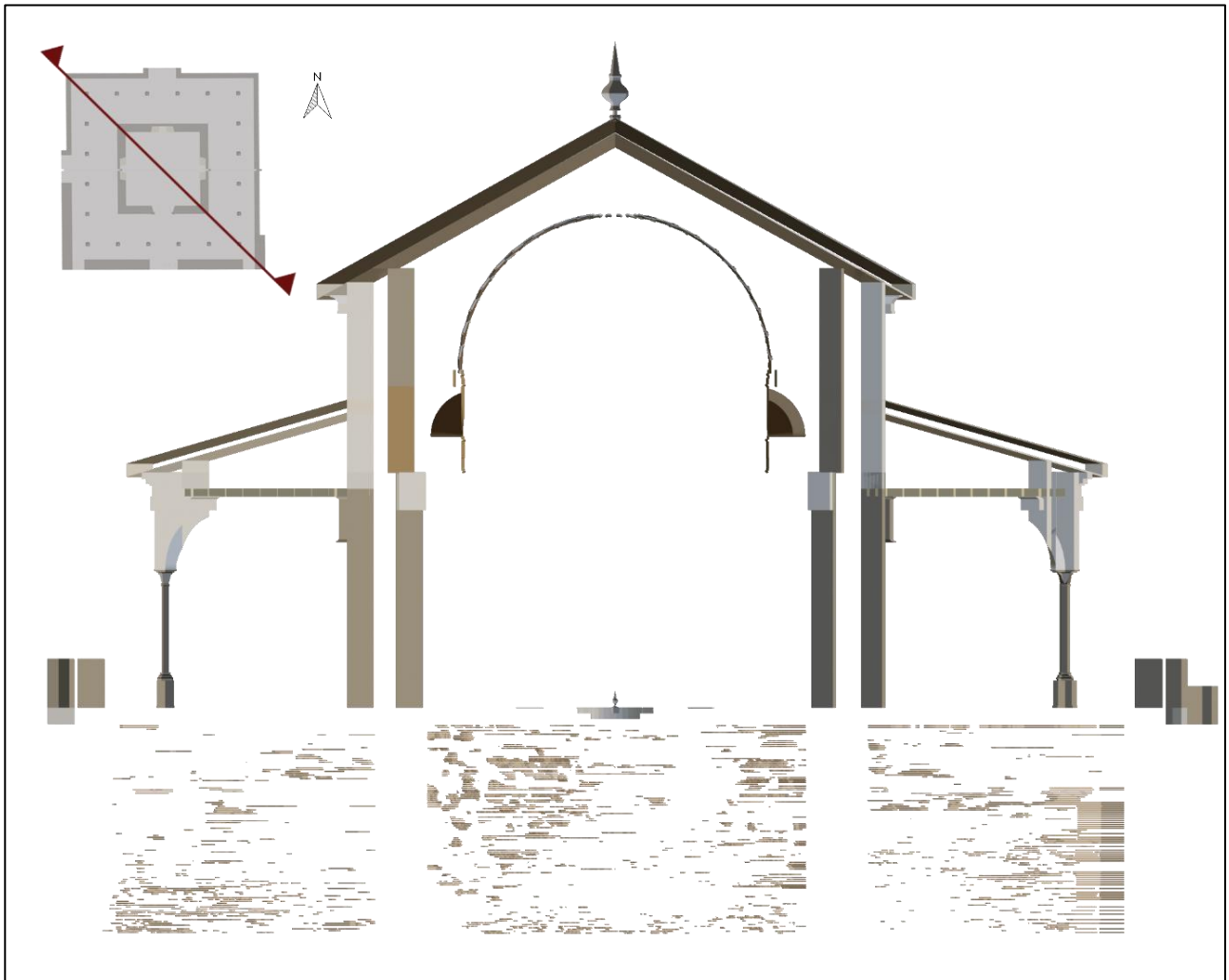
Proyecto:  
INTEGRACIÓN DE TÉCNICAS GEOMÁTICAS Y GEOFÍSICAS PARA LA MODELIZACIÓN DEL CENADOR DE CARLOS V EN SEVILLA

Escala:  
MODELO BIM

Fecha:  
Mayo 2024

Plano:  
INFOGRAFÍA SECCIÓN NOROESTE DEL CENADOR Y ANOMALÍAS SUBSUELO

№ Plano:  
4



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR  
DE INGENIERÍA GEODÉSICA  
CARTOGRÁFICA Y TOPOGRÁFICA

TRABAJO FINAL DE GRADO EN INGENIERÍA  
GEOMÁTICA Y TOPOGRAFÍA

María Zaragoza Pareja  
Autor Proyecto

Proyecto:  
INTEGRACIÓN DE TÉCNICAS GEOMÁTICAS Y GEOFÍSICAS  
PARA LA MODELIZACIÓN DEL CENADOR DE CARLOS V EN  
SEVILLA

Escala:  
MODELO BIM

Plano:  
INFOGRAFÍA SECCIÓN NORESTE DEL CENADOR  
Y ANOMALÍAS SUBSUELO

Fecha:  
Mayo 2024

Nº Plano:  
5



## 10. Anexos

### **Anexo I. Relación del Trabajo con los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la Agenda 2030.**

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) son un conjunto de 17 objetivos interconectados establecidos por las Naciones Unidas en 2015 como parte de la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible. Estos objetivos abordan los desafíos globales más urgentes que enfrenta nuestro mundo, desde la erradicación de la pobreza hasta la protección del medio ambiente y el fomento de la paz y la justicia. Aquí hay una descripción de los ODS y por qué son importantes:

**1. Fin de la pobreza (ODS 1):** El objetivo es erradicar la pobreza en todas sus formas y dimensiones, incluida la pobreza extrema, garantizando el acceso a recursos básicos como la educación, la salud, el agua potable y la alimentación.

**2. Hambre cero (ODS 2):** Busca poner fin al hambre, lograr la seguridad alimentaria y mejorar la nutrición, promoviendo la agricultura sostenible y el acceso equitativo a alimentos nutritivos para todos.

**3. Salud y bienestar (ODS 3):** Se centra en garantizar una vida saludable y promover el bienestar para todas las edades, abordando enfermedades, mejorando la salud materna e infantil, y fortaleciendo los sistemas de salud.

**4. Educación de calidad (ODS 4):** Busca garantizar una educación inclusiva, equitativa y de calidad para todos, promoviendo oportunidades de aprendizaje a lo largo de la vida y fomentando la igualdad de género en la educación.

**5. Igualdad de género (ODS 5):** Se centra en alcanzar la igualdad de género y empoderar a todas las mujeres y niñas, eliminando la discriminación y la violencia de género, y garantizando la participación igualitaria en todos los ámbitos de la sociedad.

**6. Agua limpia y saneamiento (ODS 6):** Busca garantizar la disponibilidad y gestión sostenible del agua y el saneamiento para todos, protegiendo los recursos hídricos y mejorando el acceso a servicios básicos.

**7. Energía asequible y no contaminante (ODS 7):** Se centra en garantizar el acceso a una energía asequible, segura, sostenible y moderna para todos, promoviendo la eficiencia energética y el uso de fuentes de energía renovable.

**8. Trabajo decente y crecimiento económico (ODS 8):** Busca promover un crecimiento económico sostenido, inclusivo y sostenible, fomentando el empleo pleno y productivo y el trabajo decente para todos.

**9. Industria, innovación e infraestructura (ODS 9):** Se centra en construir infraestructuras resilientes, promover la industrialización sostenible y fomentar la innovación y la tecnología para el desarrollo sostenible.

**10. Reducción de las desigualdades (ODS 10):** Busca reducir la desigualdad dentro y entre países, promoviendo políticas que empoderen a los grupos marginados y vulnerables y garanticen igualdad de oportunidades para todos.

**11. Ciudades y comunidades sostenibles (ODS 11):** Se centra en hacer que las ciudades y los asentamientos humanos sean inclusivos, seguros, resilientes y sostenibles, promoviendo la planificación urbana adecuada y el acceso a viviendas adecuadas.

**12. Producción y consumo responsables (ODS 12):** Busca promover patrones de producción y consumo sostenibles, reduciendo el desperdicio de recursos y minimizando el impacto ambiental de las actividades humanas.

**13. Acción por el clima (ODS 13):** Se centra en tomar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus impactos, mediante la mitigación de emisiones de gases de efecto invernadero y la adaptación a los efectos del cambio climático.

**14. Vida submarina (ODS 14):** Busca conservar y utilizar de manera sostenible los océanos, mares y recursos marinos, protegiendo la biodiversidad marina y promoviendo la pesca sostenible.

**15. Vida de ecosistemas terrestres (ODS 15):** Se centra en proteger, restaurar y promover el uso sostenible de los ecosistemas terrestres, gestionando de manera sostenible los bosques, luchando contra la desertificación y deteniendo la pérdida de biodiversidad.

**16. Paz, justicia e instituciones sólidas (ODS 16):** Busca promover sociedades pacíficas, justas e inclusivas, fortaleciendo las instituciones y garantizando el acceso a la justicia para todos.

**17. Alianzas para lograr los objetivos (ODS 17):** Se centra en fortalecer las alianzas globales para el desarrollo sostenible, promoviendo la colaboración entre gobiernos, sector privado, sociedad civil y otros actores para alcanzar los objetivos de manera más efectiva.

Los ODS proporcionan un marco integral y universalmente aplicable para abordar los desafíos más apremiantes que enfrenta nuestro mundo en términos de desarrollo económico, social y ambiental. Al adoptar un enfoque integrado y colaborativo, los ODS ofrecen una oportunidad para promover un desarrollo más equitativo, sostenible y resiliente que beneficie a las personas, al planeta y a las generaciones futuras. Además, los ODS son una guía para la acción a nivel mundial, nacional y local, ayudando a orientar políticas, inversiones y acciones concretas hacia un futuro más sostenible y justo para todos.

Objetivos de Desarrollo Sostenibles	Alto	Medio	Bajo	No procede
ODS 1. Fin de la pobreza.				X
ODS 2. Hambre cero.				X
ODS 3. Salud y bienestar.				X
ODS 4. Educación de calidad.				X
ODS 5. Igualdad de género.				X
ODS 6. Agua limpia y saneamiento.				X
ODS 7. Energía asequible y no contaminante.				X
ODS 8. Trabajo decente y crecimiento económico.				X
ODS 9. Industria, innovación e infraestructuras.	X			
ODS 10. Reducción de las desigualdades.				X
ODS 11. Ciudades y comunidades sostenibles.	X			
ODS 12. Producción y consumo responsables.	X			
ODS 13. Acción por el clima.	X			
ODS 14. Vida submarina.				X
ODS 15. Vida de ecosistemas terrestres.				X
ODS 16. Paz, justicia e instituciones sólidas.				X
ODS 17. Alianzas para lograr objetivos.	X			

Vamos a analizar cómo este proyecto de integración de un edificio histórico, como el Cenador de Carlos V en Sevilla, y su subsuelo, puede contribuir al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) en términos de alto, medio, bajo y no procede:

**ODS 9. Industria, innovación e infraestructura:**

Alto: La integración de tecnologías como el láser escáner y el georradar representa una innovación en la documentación y conservación del patrimonio histórico. El proyecto puede contribuir a mejorar la infraestructura de datos geoespaciales y a promover prácticas más eficientes en la gestión del patrimonio cultural.

**ODS 11. Ciudades y comunidades sostenibles:**

Alto: El proyecto puede contribuir significativamente al ODS 11 al proporcionar datos detallados sobre la estructura del Cenador de Carlos V y su entorno, lo que puede ayudar en la planificación urbana adecuada y la conservación del patrimonio histórico. La información obtenida puede ser utilizada para mejorar la gestión y conservación del edificio, así como para planificar intervenciones que mejoren su accesibilidad y seguridad.

**ODS 12. Producción y consumo responsables:**

Alto: La aplicación de tecnologías de escaneo y detección sin contacto reduce la necesidad de consumir recursos materiales y energéticos en comparación con métodos tradicionales de inspección y conservación. La generación de grandes cantidades de datos durante el escaneo y la necesidad de almacenamiento y procesamiento de estos datos pueden generar impactos ambientales relacionados con el consumo de energía y recursos informáticos.

**ODS 13. Acción por el clima:**

Alto: El proyecto puede contribuir significativamente al ODS 13 al proporcionar datos detallados sobre el estado del edificio histórico y su entorno subterráneo. Esto puede ayudar en la identificación de posibles riesgos ambientales, como la presencia de contaminantes o la inestabilidad del suelo, que podrían ser exacerbados por el cambio climático. Al conocer la estructura y composición del suelo subterráneo, el proyecto puede ayudar a planificar medidas de adaptación al cambio climático, como la gestión de inundaciones, la conservación del agua y la planificación de la infraestructura resistente al clima.

**ODS 15. Vida de ecosistemas terrestres:**

Alto: El uso de georradar puede ayudar a evaluar el impacto de las actividades humanas en el subsuelo cercano al Cenador de Carlos V, lo que contribuye a la conservación de los ecosistemas terrestres. Si se identifican áreas de riesgo para los ecosistemas terrestres durante el escaneo del subsuelo, se pueden tomar medidas para minimizar el impacto durante la ejecución de futuros proyectos.

Un proyecto de integración con láser escáner y georradar de un edificio histórico como el Cenador de Carlos V en Sevilla y su subsuelo puede contribuir de manera significativa al cumplimiento de varios ODS, especialmente aquellos relacionados con ciudades sostenibles, innovación tecnológica, producción responsable y conservación de ecosistemas terrestres. Sin embargo, el grado de impacto puede variar dependiendo de cómo se planifique, implemente y monitoree el proyecto en términos de prácticas sostenibles y consideraciones ambientales.

**Anexo II. Fichas técnicas de FARO® Laser Scanner Focus<sup>3D</sup> X 330 HDR y de GSSI modelo SIR4000 +antena de 300/800 MHz.**

Para la captura de la información, se ha utilizado el Láser escáner 3D FARO X-330 que se caracteriza por ser el más rápido (hasta 976.000 medidas por segundo) y preciso (fiabilidad de 2 mm a 25 m con una reflectancia de 85%) de los sistemas de medición de tiempo de vuelo y desfase del mercado. Esto lo convierte en el ideal en el ámbito de la ingeniería civil, arquitectura y arqueología tal y como se puede observar en sus especificaciones técnicas.

# FARO Focus<sup>3D</sup> X 330

[www.faro.com/focus](http://www.faro.com/focus)

**FARO**

## Especificaciones de rendimiento



**GSA** Contract Holder

### Unidad de rango

**Intervalo de precisión:** De 122 hasta 488 Kpts/seg. a 614 m; de 976 Kpts/seg. a 307 m

**Rango del Focus3D X 330:** 0,6 m - 330 m interior o exterior con incidencia vertical hasta un 90% de superficie reflectiva

**Velocidad de medición (puntos/seg.):** 122.000 / 244.000 / 488.000 / 976.000

**Error de intervalo<sup>1</sup>:** ±2 mm

Rango de ruido <sup>2</sup>	en 10 m	en 10 m - ruido comprimido <sup>3</sup>	en 25 m	en 25 m - ruido comprimido <sup>3</sup>
en 90% refl.	0,3 mm	0,15 mm	0,3 mm	0,15 mm
en 10% refl.	0,4 mm	0,20 mm	0,5 mm	0,25 mm

### Unidad de color

**Resolución:** Hasta 70 megapíxeles de color

**Característica de color dinámico:** Adaptación automática de brillo

**Paralaje:** Diseño coaxial

### Unidad de desviación

**Campo de visión vertical (vertical/horizontal):** 300° / 360°

**Valor de incremento (vertical/horizontal):** 0,009° (40,960 píxeles 3D a 360°) / 0,009° (40,960 píxeles 3D a 360°)

**Velocidad máxima de escaneo vertical:** 5.820 rpm o 97 Hz

### Láser (transmisor óptico)

**Clase de láser:** Clase 1 de láser

**Longitud de onda:** 1550 nm

**Divergencia de haz de luz:** Típica 0,19 mrad (0,011°) (1/e, medio ángulo)

**Diámetro de haz de luz a la salida:** Típico 2,25 mm (1/e)

### Manejo y control de datos

**Almacenamiento de datos:** Tarjeta SD, SDHC™, SDXC™; 32GB incluida

**Control de escáner:** A través de pantalla táctil y WLAN

**Nuevo acceso de WLAN:** Control remoto, visualización de escaneo posible en dispositivos móviles con Flash®

### Sensores múltiples

**Compensador de eje doble** Nivelada cada escaneo con una precisión de 0,015° y un rango de ±5°

**Sensor de altura:** A través de un barómetro electrónico se puede detectar la altura relativa a un punto fijo y agregar a un escaneo

**Brújula:** La brújula electrónica proporciona orientación al escaneo. Se incluye una característica de calibración

**GPS:** Receptor de GPS integrado



**CLASS 1  
LASER PRODUCT**

<sup>1</sup> El error de intervalo se define como un error de medición sistemática a alrededor de 10 m y 25 m, un sigma. <sup>2</sup> El ruido de intervalo se define como una desviación estándar de valores sobre el plano de mejor ajuste para la velocidad de medición de 122.000 puntos/seg. <sup>3</sup> Un algoritmo de compresión de ruido puede activarse comprimiendo de esa manera el ruido de datos sin procesar en un factor de 2 o 4. Sujeto a cambio sin previo aviso. <sup>4</sup> Los objetos ferromagnéticos puede alterar el campo magnético de la tierra y llevar a mediciones imprecisas.

## Especificaciones de hardware

**Tensión de energía eléctrica:** 19 V (suministro externo),  
14,4 V (batería interna)

**Peso:** 5,2 kg

**Tamaño:** 240 x 200 x 100 mm

**Calibración de mantenimiento:** anual

**Conector de cable:** ubicado en el montaje del escáner

**Consumo eléctrico:** 40 W y 80 W (mientras se carga la batería)

**Vida útil de la batería:** 4,5 horas

**Temperatura ambiente:** 5° - 40°C

**Humedad:** sin condensación

<b>SISTEMA</b>	
ANTENAS	Compatible con todas las antenas GSSI
NÚMERO DE CANALES	Registra datos de 1 antena de frecuencia única o 1 antena de frecuencia dual
ALMACENAMIENTO DE DATOS	Memoria flash de 32 GB, 1 GB de RAM
MOSTRAR	Pantalla LEO mejorada de 10,4" con alto brillo interno, resolución de matriz activa de 1024 x 768 y color de 32 bits
GPS	Datos registrados internamente
MODOS DE VISUALIZACIÓN	Linescan, Linescan plus 0-scope, Wiggle trace Full 3D. se utilizan 256 contenedores de colores para representar la amplitud y polaridad de la señal.
CALIFICACIÓN AMBIENTAL	IP65
<b>ADQUISICIÓN DE DATOS</b>	
FORMATO DE DATOS	RADAN (dzt)
FORMATO DE DATOS DE SALIDA	32bits
INTERVALO DE ESCANEEO	Seleccionable por el usuario, hasta 400 escaneos/seg.
NÚMERO DE MUESTRAS POR ESCANEEO	256, 512, 1024, 2048, 4096, 8192, 16384
MODOS DE FUNCIONAMIENTO	Continuo (tiempo) o rueda topográfica (activada por distancia) o modo puntual
INTERVALO DE TIEMPO	0-20.000 nanosegundos de escala completa, seleccionable por el usuario Ganancia: ajuste manual de -42 a +126 de El número de segmentos en la curva de ganancia es seleccionable por el usuario de 1 a 8
FILTROS ESTÁNDAR EN TIEMPO REAL	Respuesta de impulso infinito (IIR) - Paso bajo y alto, vertical y horizontal • Respuesta de impulso finito (FIR) - Paso bajo y alto, vertical y horizontal
FILTROS AVANZADOS EN TIEMPO REAL	Migración, seguimiento de la posición de la superficie, seguimiento del suelo del ruido de la señal, eliminación adaptable del fondo
CONFIGURACIONES AUTOMÁTICAS DEL SISTEMA	Almacenamiento de una cantidad ilimitada de archivos de configuración del sistema para diferentes condiciones de estudio y/o configuraciones de implementación de antena
RECONOCIMIENTO AUTOMÁTICO DE ANTENA	Reconocimiento automático de antenas inteligentes para permitir una velocidad de transmisión máxima compatible
<b>IDIOMAS</b>	
	Inglés, chino, japonés, francés, español, portugués, holandés
<b>OPERANDO</b>	
TEMPERATURA DE FUNCIONAMIENTO	-20°C a 40°C externo C-4°F a 104°F)
BATERÍA	Inspired Energy NI2040ED, 3 horas de funcionamiento (la duración de la batería depende del nivel de brillo de la pantalla)
VELOCIDAD DE TRANSMISIÓN	Hasta 800 KHz (internacional) Lastarifas de EE.UU./Canad y CE dependen del modelo de antena
<b>DE ENTRADA Y SALIDA</b>	
PUERTOS DISPONIBLES	Entradas de antena analógica y digital (una a la vez), entrada de alimentación CC, Serial A:S232 (puerto GPS), Conector de accesorios, Salida de vídeo HDMI, Ethernet a PC, Puerto use 2.0, mini USB
ETHERNET	Ethernet AJ45 IOOBT
PUERTO USB	Host use con soporte para teclado externo, soporte para unidad flash use y soporte para HUB USB
<b>MECÁNICO</b>	
DIMENSIONES	36x25x7 cm (14x10x2,75 pulgadas)
PESO	10 libras (4,53 kg) incluida la batería
HUMEDAD RELATIVA	<95% sin condensación
TEMPERATURA DE ALMACENAMIENTO	-40°C a 60°C (-40°F a 140°F)

## 300/800 Dual Frequency Antenna (Model 50300/800)

300 MHz / 800 MHz Dual Frequency ground coupled digital antenna. Depth of viewing window approximately 7m (21ft) with 300 MHz frequency assuming a dielectric constant of 5.

Range: 18 ns  
Samples per Scan: 512  
Resolution: 32 Bits  
Number of Gain Points: 4  
IIR Low Pass: 2000 MHz  
IIR High Pass: 500 MHz  
FIR Low Pass Filter: 0  
Scan Rate: 100  
Transmit Rate: 200 KHz

Cuando se trabaja con una combinación de tecnologías como el georradar y el láser escáner, entender las especificaciones técnicas de cada una es aún más importante debido a la complejidad y la integración de datos que implica. En este anexo presento las razones por las que es vital tener en cuenta las especificaciones técnicas de estas tecnologías cuando se utilizan en conjunto:

**Selección coordinada del equipo:** Es necesario seleccionar un conjunto de equipos que se complementen entre sí para proporcionar la mejor cobertura y precisión posible en la recolección de datos. Esto implica considerar cómo las especificaciones técnicas de cada tecnología se combinan para lograr los objetivos del proyecto.

**Optimización del rendimiento conjunto:** Conocer las especificaciones técnicas de cada tecnología ayuda a optimizar su rendimiento conjunto. Esto implica ajustar parámetros como la frecuencia de operación del georradar y la resolución espacial del láser escáner para garantizar una cobertura completa y precisa del área de interés.

**Interpretación integrada de los datos:** Al integrar datos de múltiples tecnologías, es crucial comprender cómo las especificaciones técnicas afectan la interpretación de los datos combinados. Por ejemplo, los datos del georradar pueden complementar los datos del láser escáner al proporcionar información sobre características subterráneas que no son visibles en la superficie.

**Calibración y ajuste conjunto del equipo:** La calibración y el ajuste del equipo deben realizarse de manera coordinada para garantizar la coherencia y la precisión de los datos combinados. Esto implica asegurarse de que los sistemas estén sincronizados correctamente y de que los datos recopilados sean compatibles entre sí.

En resumen, entender las especificaciones técnicas de cada tecnología y cómo se integran entre sí es fundamental para garantizar el éxito de proyectos que utilizan una combinación de técnicas geomáticas y geofísicas. Esto implica una cuidadosa planificación, coordinación y ejecución para obtener resultados precisos y completos que cumplan con los objetivos del proyecto.