
Levantamiento con Escáner Láser y Creación de
un Modelo de Superficie con Blender de la Casa
de la Pólvara y el Castillo de San Juan Bautista

Escuela de Doctorado y Estudios de Posgrado

**Máster en Gestión e Innovación Tecnológica en la
Construcción**

Trabajo Fin de Máster

Autores: Enzo Giuliano Pérez Vielma

Tutor/a Norena Martín Dorta
Ana Pérez García

Co-tutor/a Gerardo Iván García Díaz

Julio de 2024

Dña. Norena Martín Dorta, profesor/a del área de Expresión Gráfica del Departamento de Técnicas y Proyectos en Ingeniería y Arquitectura de la Universidad de La Laguna.

HACE CONSTAR

Que la presente memoria titulada:

“Levantamiento con escáner Escáner Láser y Creación de un Modelo de Superficie con Blender de la Casa de la Pólvora y el Castillo de San Juan Bautista”

Ha sido realizada bajo su dirección por D; Enzo Giuliano Pérez Vielma con N.I.F; 70647941Z.

Y para que así conste, en cumplimiento de la legislación vigente y a los efectos oportunos firman la presente en La Laguna a 7 de Julio de 2024.

Agradecimientos

Agradezco a mi familia y a todos los que colaboraron en la realización de este logro.

Enzo Giuliano Pérez Vielma
Arquitecto Técnico

RESUMEN EJECUTIVO

Introducción/ Planteamiento del problema a resolver	El proyecto se centra en la documentación gráfica de dos importantes edificaciones patrimoniales mediante tecnologías avanzadas de escaneo láser y modelado. La Casa de la Pólvora y el Castillo de San Juan Bautista son estructuras con gran valor histórico y arquitectónico, y su conservación se ve potenciada por el uso de herramientas como el escáner Leica BLK 360 y el software Cyclone 3DR de Leica. Estos métodos permiten crear representaciones digitales precisas, que son fundamentales para la conservación, estudio y difusión del patrimonio cultural.
Objetivos	El principal objetivo del proyecto es generar modelos digitales precisos de ambas edificaciones para facilitar su conservación y estudio. Esto incluye no solo la creación de modelos detallados, sino también la integración de la información semántica y métrica que permita realizar análisis estructurales y conservaciones más informadas. Además, se busca promover el uso de estas tecnologías en la gestión y preservación del patrimonio cultural, demostrando su utilidad para enfrentar los desafíos específicos que presentan las estructuras históricas.
Metodología	El proceso metodológico incluye el escaneo inicial con el Leica BLK 360, seguido de la importación de la nube de puntos en Cyclone 3DR para generar una malla. Esta malla se exporta a Blender para el modelado final. Cada paso requiere ajustes y decisiones técnicas para asegurar la precisión y fidelidad del modelo. La metodología también contempla la investigación y análisis de los datos semánticos de la edificación y su forma de construcción para que la geometría se aproxime a la configuración estructural de sus elementos, invisible a simple vista.
Contribuciones	El proyecto aporta a la disciplina de la conservación del patrimonio mediante la aplicación de tecnologías de digitalización avanzadas, que permiten una documentación detallada y la creación de modelos paramétricos históricos; así como evaluar las ventajas del flujo de trabajo empleado. Igualmente aporte dos modelos de superficie que sirven para su conservación y restauración, investigación y educación, al proporcionar modelos que pueden ser utilizados en simulaciones virtuales y análisis estructurales.

Limitaciones	Las principales limitaciones encontradas fueron de carácter logístico como la incapacidad para capturar con el escáner láser todas las áreas de los edificios, como la cubierta de la Casa de la Pólvora. Las limitaciones de carácter técnico se limitaban a la capacidad de almacenamiento del equipo de escaneo que requería planificar la cantidad de capturas y su descarga para continuar, así como la capacidad de procesamiento de hardware de los ordenadores para visualizar la nube de puntos, generar la malla y utilizar el software de modelado; Además, las características únicas y heterogéneas de las construcciones antiguas representan un desafío para su digitalización y modelado.
Líneas de trabajo futuras	Futuros trabajos podrían explorar la mejora de las técnicas de captura y modelado para abordar las áreas inaccesibles de las edificaciones. También se podría investigar la integración de nuevas tecnologías de machine learning para mejorar la automatización del procesamiento de datos y la generación de modelos. Además, sería beneficioso desarrollar colaboraciones más estrechas con expertos en restauración para adaptar los modelos a necesidades específicas de conservación.

Palabras clave: Patrimonio cultural, Conservación arquitectónica, Escaneo 3D, Modelado digital, Tecnologías de digitalización, Leica BLK 360, Cyclone 3DR, Blender, Documentación gráfica, Análisis estructural, Simulaciones virtuales, Restauración histórica, Accesibilidad de datos, Nube de puntos.

Abstract

The preservation and documentation of cultural heritage are critical to maintaining the historical and architectural significance of ancient structures. This Master's thesis focuses on the digital documentation of two heritage buildings: La Casa de la Pólvara, built in 1756, and El Castillo de San Juan Bautista, dating back to 1641. The project utilizes advanced scanning and modeling technologies to create detailed digital representations, which are essential for the conservation, study, and dissemination of cultural heritage.

The methodology employed involves an initial scanning process using the Leica BLK 360 scanner, which captures dense point clouds of the structures. These point clouds are then imported into Leica's Cyclone 3DR software to generate mesh models, which are subsequently exported to Blender for final geometric modeling. This process ensures that the models represent the geometry of the buildings as accurately as possible, incorporating both semantic and metric information that is essential for structural analyses and informed conservation efforts.

However, the project encounters significant technical limitations, primarily the inability to capture the entirety of the buildings. Specific areas, such as the roof of La Casa de la Pólvara and the rear part of El Castillo de San Juan Bautista, could not be documented due to insufficient auxiliary means and access restrictions. These limitations highlight the challenges faced in the digital documentation of complex and inaccessible heritage structures.

Despite these challenges, the project contributes significantly to the field of heritage conservation. By applying advanced digitalization technologies, it provides detailed documentation and parametric historical models that are not only useful for conservation and restoration but also for research and educational purposes. The digital models enable virtual simulations and structural analysis, offering a new dimension to the study of historical buildings.

Looking forward, the thesis suggests several areas for future work to overcome the current limitations and enhance the digital documentation process. One area is the improvement of capture techniques and modeling processes to access and document currently inaccessible areas. Another potential area of development is the integration of artificial intelligence technologies to automate data processing and enhance model generation, which could significantly streamline the documentation process.

Furthermore, the project underscores the need for closer collaboration with restoration experts to tailor the digital models to specific conservation needs. By integrating expert insights directly

into the modeling process, the accuracy and utility of the digital documentation can be substantially improved, ensuring that the models serve not only as records but also as functional tools in the ongoing preservation efforts.

In conclusion, this Master's thesis demonstrates the invaluable role of advanced scanning and modeling technologies in the preservation of cultural heritage. By addressing both the achievements and the limitations encountered, it lays a foundation for future advancements in the field, promising more comprehensive and accessible digital documentation of heritage structures.

Keywords: HBIM, Heritage conservation, 3D laser scanning, Digital modeling.

Índice

1.	INTRODUCCIÓN	1
1.1.	Planteamiento del problema	2
1.2.	Objetivos	4
1.3.	Hipótesis	6
1.4.	Metodología de la Investigación	7
2.	LEVANTAMIENTO DEL PATRIMONIO CON ESCÁNER LÁSER.	14
	Revisión Bibliográfica de Trabajos sobre el Levantamiento de Edificaciones Históricas mediante Escáner Láser para la creación de modelos de superficie.	14
2.1.	La nube de puntos y el modelado	15
2.2.	Aplicaciones y Objetivos	17
2.3.	Metodología HBIM.	20
2.4.	Restricciones, Desafíos y Dificultades	26
2.5.	Conclusiones	28
3.	DOCUMENTACIÓN HISTÓRICA DEL CASTILLO DE SAN JUAN BAUTISTA Y LA CASA DE LA PÓLVORA.	29
3.1.	Contexto Histórico	29
3.2.	Castillo de San Juan Bautista	30
3.2.1.	Diseño y Construcción	31
3.2.2.	Función Defensiva	32
3.2.3.	Intervenciones bélicas de las defensas de Santa Cruz de Tenerife.	36
3.2.4.	Restauración y conservación	40
3.2.5.	Impacto cultural y turístico.	41
3.3.	La casa de la Pólvora.	41
3.4.	Conclusiones.	43
4.	TRABAJO EXPERIMENTAL	44
4.1.	Trabajo de Campo	45
4.2.	Proceso de Escaneado Láser	47
4.3.	Procesamiento de la Nube de Puntos en Cyclone 3DRR	51
4.4.	Modelado en Blender	54
4.5.	Asignación de texturas	66
4.6.	Edición de texturas en Photoshop.	72
4.7.	Importación de una malla de emplazamiento	76
4.8.	Flujo de Trabajo	77
5.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	83

6	CONCLUSIONES	86
7	LÍNEAS DE TRABAJO FUTURO	87
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	88
	ANEXOS	91
	ANEXO I: ARCHIVOS NATIVOS	92
	ANEXO II: FLUJO DE TRABAJO	93
	ANEXO III: PLANOS	98

1. INTRODUCCIÓN

El Levantamiento con escáner y la creación de Modelo de Superficie con Blender es una metodología innovadora que aborda la integración de métodos de digitalización de última tecnología, para la documentación y preservación de edificaciones patrimoniales.

La importancia de este trabajo radica en la necesidad de preservar, estudiar y difundir el patrimonio cultural utilizando métodos que minimicen las técnicas invasivas y el posible daño a estas estructuras históricas, al tiempo que proporcionan una base de datos detallada para futuras intervenciones y estudios.

Este estudio se apoya en una revisión bibliográfica que demuestra la relevancia y creciente aplicación de la tecnología de digitalización 3D en la conservación del patrimonio cultural. Trabajos anteriores han mostrado que estas tecnologías son viables y esenciales para la documentación detallada y no invasiva del patrimonio cultural.

Hasta la fecha, esta metodología aún presenta diversas dificultades de carácter técnico y logístico; la principal de ellas es garantizar que la etapa de creación del modelo de superficie tenga por resultado una representación lo más similar posible a la edificación original, conservando la singularidad geométrica que caracteriza a las edificaciones antiguas, así como el nivel de detalle.

Como objetivo general de éste trabajo se propone la creación de dos modelos de superficie que tengan un elevado grado de similitud con las edificaciones reales: además, se pretende detallar en este documento el proceso metodológico utilizado para la captura de datos tridimensionales mediante el escáner Leica BLK 360 y el tratamiento de estos datos a través de software especializado como Cyclone 3DR y posteriormente el uso de Blender para la creación de los modelos digitales. Este enfoque no solo aborda la preservación virtual, sino también la generación de una memoria digital accesible para futuras generaciones.

El aspecto innovador de este trabajo radica en el flujo de trabajo empleado, como demostración de la aplicación específica de estas tecnologías a las edificaciones seleccionadas y en la integración de técnicas avanzadas de modelado. Aunque el uso de escáneres 3D y modelado BIM es bien conocido, su aplicación en el contexto específico de La Casa de la Pólvora y El Castillo de San Juan Bautista aporta un valor agregado significativo, dada la singularidad arquitectónica y la importancia histórica de estas estructuras a nivel local.

El público objetivo de este trabajo incluye académicos y profesionales en los campos de la arquitectura, la ingeniería y la conservación del patrimonio, así como las entidades públicas o privadas encargadas e interesadas en la gestión del patrimonio cultural.

1.1. Planteamiento del problema

Sobre la documentación de Edificaciones Patrimoniales

La documentación y conservación del patrimonio histórico arquitectónico mediante tecnologías de escaneado láser y modelado 3D ha demostrado ser un campo de creciente importancia y aplicación. Sin embargo, un desafío constante en este ámbito es la capacidad de generar modelos digitales que representen con precisión las geometrías complejas y únicas de estructuras históricas. Las investigaciones existentes han utilizado diversas herramientas de modelado y escaneo 3D, pero a menudo se encuentran con limitaciones en cuanto a la fidelidad geométrica y la integridad de los datos capturados, especialmente en edificaciones con elementos arquitectónicos irregulares o en mal estado.

Los edificios patrimoniales en general y específicamente los dos edificios contemplados en este estudio son una expresión arquitectónica de la idiosincrasia de la sociedad durante su época de construcción; muchos aspectos de índole social, económica y tecnológica pueden inferirse en base a su estudio.

En la actualidad, ha resurgido el interés por estas edificaciones antiguas, bien sea desde un enfoque arqueológico, político o con fines de explotación económica; la percepción de la sociedad con respecto a estas edificaciones ha cambiado, atribuyendo un valor intrínseco a las mismas fundamentado en conceptos como la identidad cultural a través de celebraciones o recreaciones históricas, o incluso como sitios de interés que aumentan el atractivo turístico para posibles visitantes, esto supone también una fuente de ingresos a la economía local.

Sin embargo, el hecho de que un edificio cambie su uso, no implica que se ajuste a las demandas del mismo, las dimensiones y capacidad de aforo de un inmueble histórico pensado para actividades limitadas (de carácter militar o de almacén), difícilmente pueden adaptarse a un aforo turístico de grandes grupos de visitantes, lo que implica una inversión considerable en cuanto a rutas y medidas de seguridad, entre otros; con el agravante de ser edificaciones antiguas y más susceptibles al deterioro.

Esto también condiciona la forma de documentar estas edificaciones, es por ello que emplear tecnología láser es un método idóneo en éste aspecto, pues resulta efectivo, preciso y rápido, requiere la presencia de un equipo de individuos reducido, y que puede llevarse a cabo en un corto periodo de tiempo; frente a otras formas de documentar, como medidas in situ, toma de muestras, testigos, ensayos, fotografías, entre otros métodos que pueden llegar a ser invasivos o requerir largos periodos de tránsito de personas, materiales y equipamiento.

Una solución emergente

Como respuesta a esta situación que se repite en distintas localidades del mundo, este método representa una solución metodológica ampliamente usada dentro del campo de estudio de la documentación digital de este tipo de tipología arquitectónica. La investigación evoluciona a la par que surgen nuevas tecnologías para procesar datos e imágenes, así como abarca una gran cantidad de aplicaciones, desde la arqueología, la ingeniería civil y la arquitectura hasta la industria del entretenimiento y el análisis predictivo del comportamiento de estructuras.

El problema de la representación geométrica

Una revisión de la literatura revela que, aunque se han logrado avances significativos en la documentación digital del patrimonio, las tecnologías empleadas frecuentemente no logran capturar detalles finos o mantener la fidelidad en áreas complicadas debido a restricciones técnicas y operativas. Por ejemplo, el uso de software como Revit y otros sistemas BIM ha sido extensivo, pero estos a menudo requieren simplificaciones o adaptaciones a librerías preexistentes que pueden no representar adecuadamente las características auténticas de los objetos históricos. Las herramientas como Blender ofrecen potencial en este sentido, especialmente con el uso de complementos como BlenderBIM que permiten una mejor manipulación y representación de entidades complejas en formatos interoperables como IFC.

El presente estudio se propone abordar estas necesidades y deficiencias previamente observadas en trabajos similares, utilizando Blender como herramienta principal de modelado 3D, aprovechando sus capacidades avanzadas para modelar geometrías que otros programas no pueden manejar eficazmente. Este enfoque no solo espera mejorar la precisión geométrica de los modelos 3D generados, sino también integrar datos semánticos y métricos de forma que se faciliten análisis estructurales y conservaciones más informadas.

El conocimiento acumulado hasta la fecha sugiere que mientras la tecnología continúa evolucionando, también lo hacen las metodologías y enfoques relacionados con la documentación del patrimonio cultural. Sin embargo, las brechas en la capacidad de representar fielmente las geometrías complejas y la falta de una integración eficaz de datos detallados son problemas que este trabajo busca resolver, contribuyendo así a la literatura y práctica en este campo especializado.

1.2. Objetivos

El objetivo general del presente Trabajo Fin de Máster es obtener un modelo de superficie detallado que tenga un grado de similitud elevado a la edificación objeto de estudio, así como documentar el flujo de trabajo mediante el cual ha sido posible conseguirlo. Las edificaciones objeto de estudio son La Casa de la Pólvora y El Castillo de San Juan Bautista ubicados en la zona de cabo llano de Santa Cruz de Tenerife, en la Isla de Tenerife, España.

Para alcanzar este propósito, se empleará un enfoque metodológico que combina tecnologías avanzadas de escaneo láser y modelado 3D. La implementación de estas herramientas no solo permitirá una representación precisa y fiel de las edificaciones, sino que también facilitará la captura de datos detallados que son esenciales para la conservación y el análisis patrimonial. Este enfoque metodológico se alinea con las prácticas contemporáneas de documentación tridimensional de patrimonio cultural, destacando la importancia de la precisión geométrica y la utilidad práctica de los modelos generados.

Se busca aportar a la reciente tendencia de documentación tridimensional de edificaciones patrimoniales con precisión y fidelidad geométrica a la realidad, mediante el uso de tecnologías avanzadas de modelado 3D, específicamente a través de la herramienta Blender.

La elección de Blender se debe a su capacidad para manejar geometrías complejas y su flexibilidad para adaptarse a las necesidades específicas del modelado patrimonial. Además, la integración de datos semánticos y métricos dentro de los modelos 3D permitirá realizar análisis estructurales detallados y proporcionar información determinante para futuras intervenciones de conservación y restauración. Este proceso no solo mejora la técnica de digitalización, sino que también expande la aplicabilidad de los modelos digitales en diversas áreas, incluyendo la educación y la gestión del patrimonio cultural.

Este objetivo se desglosa en cinco (5) objetivos específicos que buscan no solo avanzar en la técnica de digitalización, sino también en la utilidad y aplicación de los modelos generados.

Objetivos Específicos:

- Emplear un flujo de trabajo optimizado: para la digitalización 3D que integre el escaneo láser mediante el uso del escáner Leica BLK 360, el procesamiento de la nube de puntos en el software Cyclone 3DRR, y la generación final de modelos en Blender. Este flujo de trabajo deberá garantizar la captura y

modelado eficaz de las características arquitectónicas complejas de las estructuras patrimoniales.

La precisión de los datos capturados y procesados permitirá que el modelado en Blender refleje fielmente las complejidades de las edificaciones, abordando las limitaciones de otros programas que tienden a simplificar detalles críticos. Así, se crea una sinergia entre el hardware y el software utilizado, garantizando resultados superiores en la representación digital del patrimonio arquitectónico.

– **Implementar técnicas avanzadas en Blender para modelar con alta precisión** las geometrías de La Casa de la Pólvara y El Castillo de San Juan Bautista, superando las limitaciones encontradas en otros programas de modelado 3D que frecuentemente simplifican detalles críticos para la conservación arquitectónica.

Al desarrollar modelos detallados en Blender, se crea una base sólida para validar la fidelidad geométrica del modelo 3D. La precisión alcanzada en esta etapa determina en gran medida la calidad de los datos disponibles posteriormente para realizar las comparaciones a continuación, evaluando la representación de elementos específicos y la integridad general del modelo. Esto asegura que cualquier intervención de conservación o restauración que se base en estos modelos tendrá una referencia confiable y precisa.

– **Validar la fidelidad geométrica del modelo 3D** mediante comparaciones detalladas entre los modelos digitales y las características digitales y físicas reales de las edificaciones, evaluando la precisión en la representación de elementos particulares y la integridad general del modelo.

– Facilitar la integración de datos semánticos y métricos dentro de los modelos 3D para permitir análisis estructurales detallados y proporcionar información adecuada para futuras intervenciones de conservación y restauración.

Con la integración de datos semánticos y métricos completada, se abre la oportunidad de explorar la viabilidad de publicar y compartir estos modelos con la comunidad académica y entidades colaboradoras. Esto no solo promoverá la preservación y el estudio del patrimonio cultural a un nivel más amplio, sino que también facilitará la colaboración entre diversas disciplinas, aumentando el impacto y la utilidad de los modelos generados.

– **Explorar la viabilidad de publicar y compartir los modelos generados** con la entidad colaboradora, el Ayuntamiento de Santa Cruz de Tenerife, así como la comunidad académica a través de plataformas digitales que soporten formatos interoperables de objetos tridimensionales, para promover la preservación y estudio del patrimonio cultural a un nivel más amplio.

Al establecer una estrategia de publicación y compartir los modelos, se asegura que los beneficios del trabajo realizado se extiendan más allá del ámbito académico y profesional, llegando también a la comunidad y las futuras generaciones. Esta accesibilidad y difusión amplían el alcance del proyecto, cerrando el ciclo de trabajo con un impacto significativo en la conservación y apreciación del patrimonio cultural.

Estos objetivos específicos están diseñados para abordar las brechas en la documentación digital de patrimonio cultural identificadas en la literatura existente, proporcionando una solución integral que mejore tanto la técnica como la aplicación práctica de los modelos digitales en la conservación del patrimonio.

1.3. Hipótesis

Dado el enfoque y los objetivos de este trabajo, se plantean las siguientes hipótesis iniciales que guiarán la investigación y la evaluación de los resultados obtenidos a través del proyecto:

H1: Es posible crear un modelo de superficie a partir del conjunto de nubes de puntos obtenidas de un escaneo láser para generar una malla y un modelo de superficie empleando el software Blender.

Igualmente se valorará si la implementación de técnicas de modelado con Blender mejorará significativamente la precisión y fidelidad geométrica de los modelos 3D de edificaciones patrimoniales, en comparación con los modelos generados por otros softwares.

Esta consideración se basa en la capacidad de Blender para manejar geometrías complejas y su flexibilidad para adaptarse a las necesidades específicas del modelado patrimonial.

Adicional a esto se propone la comparación con un modelo de las mismas edificaciones realizado en Revit y que estará contemplado como parte del trabajo colaborativo de este trabajo.

Con respecto al flujo de trabajo integrado que combine escaneo láser, procesamiento avanzado de nubes de puntos y modelado en Blender se considerarán factores adicionales como el nivel de conocimientos requeridos para cada una de las fases y el tiempo que demandó, con el fin de valorar la efectividad del mismo.

Esto debería traducirse en un incremento en la calidad y utilidad de los datos para fines de conservación y restauración.

De igual forma, la inclusión de datos semánticos y métricos en los modelos 3D permitirá realizar un análisis de conservación más precisos y detallados, contribuyendo

efectivamente a la planificación de intervenciones y a la toma de decisiones basada en datos concretos y fiables sobre el estado de conservación de las estructuras.

1.4. Metodología de la Investigación

La metodología empleada para el desarrollo de este Trabajo Fin de Máster se diseñó con el objetivo de garantizar una documentación física detallada y precisa de La Casa de la Pólvora y El Castillo de San Juan Bautista, que represente tanto su valor histórico como la singularidad de su geometría mediante tecnologías de escaneo y modelado 3D.

Para lograr este objetivo, se combinaron enfoques cualitativos y cuantitativos que permitieran una comprensión integral de las edificaciones. Se realizaron análisis históricos y arquitectónicos preliminares que facilitaron la identificación de los elementos más significativos a documentar. Esta combinación de enfoques aseguró una contextualización adecuada del trabajo, enriqueciendo la precisión técnica con un entendimiento profundo del valor patrimonial de los edificios.

La investigación se llevó a cabo siguiendo una secuencia cronológica y sistemática de etapas, cada una contribuyendo de manera fundamental al logro de los objetivos planteados. Como se observa en la figura 1.

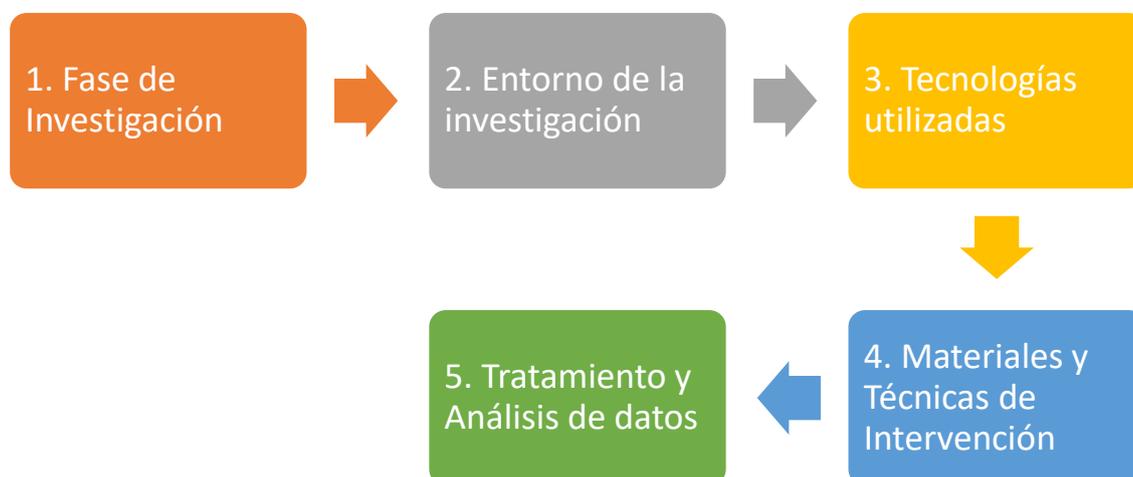


Figura 1: Cuadro resumido de la metodología

1) Fase de Investigación:

La fase de investigación comprendió la recopilación de información sobre los temas que comprende el trabajo, tanto a nivel histórico y cultural, relacionado con la información semántica de las edificaciones, como a nivel metodológico, con referencias de trabajos similares y recientes sobre la documentación de edificaciones históricas, así

como también de la herramientas informáticas a emplear para el procesamiento de datos, incluyendo aquellas que permitiera un flujo de trabajo eficaz con la menor pérdida de información posible.

Esta etapa inicial se definió un marco teórico robusto y fundamentado, que guiara las decisiones posteriores en el proceso de digitalización y modelado. Se realizó una revisión exhaustiva de la literatura existente sobre técnicas de escaneo 3D, análisis de datos geoespaciales y métodos avanzados de modelado, lo que permitió identificar las mejores prácticas y adaptar las metodologías más adecuadas a las particularidades de La Casa de la Pólvora y El Castillo de San Juan Bautista. Además, se estudiaron casos de éxito en la conservación digital de otros sitios patrimoniales para obtener datos interesantes y aplicarlos en el presente proyecto.

El estudio adoptó un diseño descriptivo y aplicado, centrado en la integración de tecnologías de digitalización y modelado 3D para la conservación del patrimonio arquitectónico.

Este diseño metodológico permitió no solo documentar detalladamente las estructuras, sino también generar modelos digitales que sirvan como herramienta para futuras intervenciones de conservación y restauración. La combinación de un enfoque descriptivo con la aplicación práctica de tecnologías avanzadas aseguró que los resultados fueran tanto precisos como útiles para los objetivos de conservación a largo plazo.

2) Entorno de la investigación:

El trabajo de campo se realizó directamente en el término municipal de Santa Cruz de Tenerife en la zona Cabo de los Llanos, donde se encuentran localizados los inmuebles objeto de estudio: La Casa de la Pólvora y El Castillo de San Juan Bautista. Estas edificaciones presentan una complejidad arquitectónica considerable, lo cual se traduce en desafíos logísticos durante la etapa de escaneado, principalmente en términos de accesibilidad y la dificultad que supone realizar tareas como la estabilización del equipo de escaneo, el número de escaneos, las condiciones climatológicas que podrían condicionar la facilidad y calidad de la información obtenida.

La accesibilidad a todas las áreas de las edificaciones fue uno de los principales retos, ya que algunas secciones eran difíciles de alcanzar debido a su antigüedad y al desgaste estructural. Se implementaron técnicas específicas para estabilizar el equipo de escaneo en terrenos irregulares y en espacios reducidos, utilizando trípodes ajustables y plataformas temporales. Además, se realizó una planificación minuciosa para determinar los puntos estratégicos de escaneo, optimizando el número de escaneos necesarios para cubrir toda la superficie sin perder detalles importantes. Esta

planificación incluyó la consideración de factores ambientales como la luz natural y la humedad, que podrían afectar la precisión de los datos obtenidos.

Las condiciones climatológicas fueron un factor condicionante en el proceso de escaneo. Se eligieron días con condiciones meteorológicas favorables para minimizar los riesgos de errores en la captura de datos debido a factores como la lluvia o el viento. Además, se realizaron pruebas preliminares para ajustar los parámetros del escáner en función de la iluminación disponible y las características específicas del entorno. La implementación de estas medidas no solo mejoró la calidad de la información obtenida, sino que también garantizó la seguridad del equipo y del personal durante el trabajo de campo.

La experiencia adquirida durante este proceso también destacó la importancia de la flexibilidad y la adaptabilidad en el uso de tecnologías de escaneo en campo, subrayando la necesidad de personal capacitado y equipos adecuados para superar los desafíos logísticos y ambientales inherentes a estos proyectos.

3) **Tecnologías utilizadas:**

- **Escaneo 3D:** Utilizamos el escáner Leica BLK 360, un dispositivo avanzado capaz de capturar datos de alta precisión. Este escáner es especialmente útil en entornos patrimoniales debido a su capacidad para documentar rápidamente grandes volúmenes de espacio con un alto nivel de detalle y precisión.

El Leica BLK 360 es conocido por su facilidad de uso y portabilidad, lo que lo convierte en una herramienta ideal para trabajar en sitios históricos y de difícil acceso. Su capacidad para capturar 360.000 puntos por segundo y generar imágenes panorámicas de alta resolución permite una documentación exhaustiva en un tiempo relativamente corto. Sin embargo, su uso también implica desafíos como la necesidad de estabilización en terrenos irregulares y la gestión de grandes volúmenes de datos, que requieren una planificación y organización que permitiera asegurar la precisión y la integridad de la información capturada.

Además, la tecnología láser del Leica BLK 360 permite la captura de detalles finos y texturas superficiales, lo que es esencial para la conservación patrimonial. La precisión del dispositivo, con un margen de error de solo unos pocos milímetros, asegura que cada detalle arquitectónico sea registrado con exactitud para crear modelos 3D que puedan ser utilizados para análisis espacial, planificación de restauraciones y estudios históricos. Sin embargo, el costo del equipo y la necesidad de capacitación especializada para su operación son factores a considerar en la implementación de esta tecnología.

- **Procesamiento de datos:** La nube de puntos obtenida del escáner fue procesada usando el software Cyclone 3DRR de Leica. Este paso permite transformar los datos iniciales en mallas 3D que pueden ser manipuladas y analizadas.

Cyclone 3DRR es una herramienta poderosa que permite la visualización, edición y limpieza de nubes de puntos. Su capacidad para manejar grandes volúmenes de datos y convertirlos en mallas 3D detalladas facilita el proceso de documentación y modelado. El software ofrece diversas funciones para ajustar y optimizar los datos escaneados, como la eliminación de ruido y la corrección de errores, lo que asegura que los modelos resultantes sean precisos y de alta calidad. La interoperabilidad de Cyclone 3DRR con otros programas de modelado y análisis también es una ventaja significativa, permitiendo una integración fluida en el flujo de trabajo.

Sin embargo, el procesamiento de grandes nubes de puntos puede ser intensivo en recursos y tiempo, lo que requiere hardware robusto y conocimientos técnicos avanzados. La capacidad de Cyclone 3DRR para generar modelos precisos depende de la calidad de los datos capturados y del procesamiento adecuado. Además, aunque el software es altamente eficiente, su costo y la curva de aprendizaje asociada pueden ser una barrera para algunas instituciones. La correcta implementación y uso de Cyclone 3DRR son fundamentales para maximizar sus beneficios en la documentación patrimonial.

- **Modelado 3D:** Finalmente, las mallas se exportaron a Blender. Blender fue seleccionado por su capacidad superior para realizar ajustes detallados y su compatibilidad con diversos complementos que facilitan la modelación precisa de formas complejas y la incorporación de datos semánticos.

Blender es una herramienta de modelado 3D de código abierto que ofrece una amplia gama de funciones para la creación y edición de modelos tridimensionales. Su flexibilidad y extensibilidad lo convierten en una opción ideal para proyectos de documentación patrimonial. La capacidad de Blender para manejar grandes mallas y su compatibilidad con diversos formatos de archivo permiten una integración eficiente con otros programas de procesamiento de datos. Además, su comunidad activa de usuarios y desarrolladores proporciona soporte continuo y actualizaciones, lo que facilita la adopción de nuevas técnicas y herramientas.

A pesar de sus numerosas ventajas, Blender también presenta desafíos, especialmente para los usuarios que no están familiarizados con su interfaz y funcionalidades avanzadas. La curva de aprendizaje puede ser empinada, y se

requiere tiempo y práctica para dominar todas sus capacidades. Sin embargo, una vez adquirida la competencia, Blender ofrece un poder y una flexibilidad excepcionales para el modelado detallado y la incorporación de datos semánticos. La elección de Blender en este proyecto subraya la importancia de utilizar herramientas avanzadas y adaptables para lograr una documentación patrimonial precisa y detallada.

4) **Materiales y técnicas de intervención:**

- Durante las sesiones de escaneo, se tomaron múltiples pasadas desde diferentes ángulos para asegurar una cobertura completa y evitar áreas sombreadas en los datos finales.

Al realizar varias pasadas desde diferentes ángulos, se puede minimizar el efecto de las sombras y las obstrucciones temporales, como vegetación o elementos móviles, que pueden interferir con la captura de datos. Esta metodología también ayuda a capturar detalles finos y texturas superficiales que podrían perderse con un escaneo unidireccional. Sin embargo, este enfoque incrementa el volumen de datos a procesar y requiere una planificación que permitía optimizar el tiempo y los recursos disponibles.

El uso de múltiples ángulos de escaneo permite una mayor redundancia en los datos, lo que facilita la identificación y corrección de errores durante el procesamiento. Esta redundancia es particularmente útil en la generación de modelos 3D de alta fidelidad, ya que permite una validación cruzada de la información capturada. Sin embargo, el aumento en el número de escaneos también implica una mayor demanda de almacenamiento y procesamiento de datos, lo que puede ser un desafío logístico y técnico que debe gestionarse adecuadamente.

- En Cyclone 3DRR, se procesaron las nubes de puntos obtenidas del escáner, transformando los datos brutos en mallas 3D manipulables y analizadas.

Cyclone 3DRR es una herramienta esencial para el procesamiento de datos de escaneo, ya que permite la visualización, edición y limpieza de nubes de puntos. Su capacidad para manejar grandes volúmenes de datos y convertirlos en mallas se asocia a una mayor precisión del modelado 3D; durante esta etapa, se realizaron ajustes y optimizaciones para eliminar ruido y corregir errores en los datos escaneados, asegurando que las mallas finales fueran de alta calidad. El software también permite la interoperabilidad con otros programas, facilitando la exportación de las mallas para su uso posterior en Blender y otros entornos de modelado.

La utilización de Cyclone 3DRR no solo mejora la calidad de los datos procesados, sino que también simplifica el flujo de trabajo al integrar diversas fases del proyecto de digitalización. Este software ofrece herramientas avanzadas para alinear y fusionar múltiples nubes de puntos, lo que es fundamental para obtener un modelo coherente y preciso de las edificaciones. Sin embargo, el procesamiento intensivo de datos puede requerir hardware potente y experiencia técnica para maximizar su eficiencia y precisión.

- En Photoshop, se editaron las texturas obtenidas de las fotografías y del escáner para asegurar su precisión y calidad visual antes de aplicarlas a las mallas 3D. Photoshop se utilizó para realizar ajustes detallados en las texturas, corrigiendo colores, eliminando distorsiones y preparando las imágenes para su aplicación en los modelos 3D; Garantizando que las texturas se alineen correctamente con las mallas y reflejen fielmente las características visuales de las superficies reales. Herramientas avanzadas de Photoshop permitieron mejorar la calidad de las imágenes, asegurando que las texturas aplicadas sean precisas y de alta calidad

La capacidad de trabajar con capas y aplicar correcciones finas en Photoshop facilita la preparación de texturas realistas y detalladas. Este software también permite la integración de diversas fuentes de imagen, combinando fotografías de alta resolución y capturas de escáner para crear texturas completas y coherentes. Sin embargo, el proceso de edición de texturas puede ser laborioso y requiere habilidades avanzadas en edición de imágenes, lo que puede representar un desafío para algunos usuarios.

- En Blender, se emplearon técnicas avanzadas para refinar la representación de las mallas, ajustando manualmente las desviaciones y asegurando que las texturas y los contornos de las estructuras se alinearan precisamente con las condiciones reales observadas en el terreno.

La utilización de Blender para ajustar y refinar las mallas 3D es esencial para asegurar que los modelos digitales sean una representación fiel de las estructuras originales. Estas técnicas avanzadas incluyen la corrección manual de desviaciones y la aplicación precisa de texturas, lo que garantiza que cada detalle del modelo refleje con exactitud las características del objeto real.

El ajuste manual en Blender permite la corrección de errores que pueden haber surgido durante el escaneo y el procesamiento inicial de los datos. Esto incluye la eliminación de artefactos y ruidos no deseados, así como la alineación precisa de las texturas con los contornos estructurales. Aunque este proceso puede ser intensivo en tiempo y requiere habilidades técnicas avanzadas, es fundamental

para producir modelos de alta calidad que puedan ser utilizados en estudios detallados y planificaciones de restauración. La capacidad de Blender para manejar grandes mallas y aplicar correcciones detalladas lo convierte en una herramienta invaluable en este contexto.

5) Tratamiento y Análisis de datos:

- Los modelos 3D resultantes fueron sometidos a un riguroso proceso de validación, comparando las dimensiones y formas del modelo con las medidas arquitectónicas documentadas históricamente y observaciones in situ y la superposición de malla generada a partir de la nube de puntos, con un nivel de precisión elevado, observando la tangencia entre el modelo de superficie y la malla, corrigiendo en el modelo cualquier desviación geométrica que no representara fielmente el edificio.

Este tipo de análisis presenta varias ventajas y desventajas. Una de las principales ventajas es la capacidad de realizar ajustes precisos y detallados, asegurando que el modelo 3D se alinee estrechamente con las mediciones reales. La superposición de la malla sobre los sólidos tridimensionales en Blender permite identificar y corregir desviaciones geométricas de manera visual; Sin embargo, este método también tiene sus limitaciones. La malla generada a partir de la nube de puntos tiene un margen de error inherente que depende de la precisión del escáner láser y la densidad de la nube de puntos. Además, ajustar los sólidos para que sean tangentes a la malla es un proceso visual, lo que significa que siempre existirá un margen de error debido a la interpretación y habilidades del operador.

La metodología empleada en este Trabajo Fin de Máster ha demostrado ser eficaz para lograr una documentación detallada y precisa de La Casa de la Pólvora y El Castillo de San Juan Bautista. Al adoptar un enfoque cronológico y sistemático, cada etapa del proceso metodológico contribuyó de manera significativa al cumplimiento de los objetivos planteados. Desde la fase de investigación hasta el análisis de datos, se ha garantizado la integración y aplicación de tecnologías avanzadas de escaneo y modelado 3D, proporcionando una base sólida para la conservación y el estudio del patrimonio arquitectónico.

Durante la fase de investigación, se recopiló información histórica, cultural y metodológica relevante, lo que permitió un entendimiento profundo de las edificaciones y sus características únicas. Este conocimiento previo fue fundamental para diseñar un flujo de trabajo que minimizara la pérdida de información y optimizara el uso de herramientas informáticas. La selección del escáner Leica BLK 360 y del software

Cyclone 3DRR de Leica representó una ventaja a nivel técnico y sobre la calidad de los datos obtenidos, frente a otros métodos posibles como la fotogrametría.

La implementación de técnicas avanzadas en Blender permitió la creación de modelos 3D que reflejan fielmente las geometrías complejas de las estructuras patrimoniales. El proceso de escaneo 3D, combinado con el procesamiento de datos y la generación de mallas, resultó en representaciones digitales de alta precisión. Este enfoque no solo facilitó la documentación detallada de las edificaciones, sino que también permitió la integración de datos semánticos y métricos, enriqueciendo los modelos con información de interés para futuras intervenciones de conservación y restauración.

2. LEVANTAMIENTO DEL PATRIMONIO CON ESCÁNER LÁSER.

Revisión Bibliográfica de Trabajos sobre el Levantamiento de Edificaciones Históricas mediante Escáner Láser para la creación de modelos de superficie.

Este capítulo presenta una revisión bibliográfica exhaustiva sobre la documentación de bienes patrimoniales mediante el escaneo láser de imágenes y la posterior creación de modelos tridimensionales a partir de la nube de puntos resultante. Se abordan las motivaciones, objetivos y metodologías comunes en varios casos de estudio, destacando la importancia de la tecnología 3D en la conservación y gestión del patrimonio cultural. Se analizan distintas tecnologías de digitalización 3D, como la proyección de patrones y láser, junto con la generación de nubes de puntos y modelado paramétrico. Además, se exploran diversas aplicaciones prácticas, como la conservación, restauración, difusión y análisis estructural, así como la integración de datos semánticos y métricos para tareas avanzadas. Se discuten también los desafíos y las soluciones propuestas, incluyendo la creación de modelos paramétricos históricos y la integración de la metodología *BIM* en la gestión del patrimonio. Finalmente, se destacan casos de estudio específicos que ilustran la aplicación práctica de estas técnicas en la preservación de edificaciones históricas.

Los recientes avances tecnológicos han permitido implementar métodos innovadores para documentar gráficamente bienes materiales de interés histórico y cultural, como edificaciones o componentes de éstas. Entre estos avances se encuentra la modelización tridimensional de espacios a partir de imágenes e información espacial,

conocido como “nube de puntos”. véase, por ejemplo, José L. Caro de 2012; Serrano, Saumell y Berenguer, 2014, entre otros.

La integración de ésta documentación gráfica junto con otras fuentes de información numérica y semántica a través de herramientas digitales para generar un modelo paramétrico de información, resulta ser una metodología eficiente para abordar distintas áreas de interés en éstas estructuras, como son la conservación, mantenimiento y restauración, así como otras aplicaciones innovadoras como la degradación predictiva, detectando anomalías y realizando simulaciones a partir de la información de sus materiales, estimación de cargas, entre otros datos, que optimizan considerablemente el mantenimiento preventivo.

2.1. La nube de puntos y el modelado

Con respecto a las tecnologías de digitalización 3D utilizadas en el campo del patrimonio cultural, se aborda por Díaz Gómez et al., (2015) las distintas herramientas y métodos a considerar, recordando que deben adaptarse a la naturaleza especial de los bienes a documentar (al ser frágiles, tener una sensibilidad mayor al deterioro, entre otras características); siendo necesario recurrir a técnicas no destructivas o invasivas que aseguren su integridad e inalterabilidad.

Se cita a continuación un extracto de los dos principales tipos de tecnologías de digitalización 3D según lo expone Díaz Gómez et al. (2015):

1.1 Medición 3D por proyección de patrones

Los sistemas de digitalización por proyección de franjas disponen de dos componentes básicos, un proyector y una cámara. (...) Mediante algoritmos de análisis y reconstrucción de imagen, se transforman las imágenes capturadas en nubes de puntos con la información geométrica superficial del objeto a digitalizar. Además, estos sistemas permiten capturar la información de color del objeto a digitalizar, mediante la proyección de patrones RGB(...).

2.1 Medición 3D por proyección láser

Los sistemas de digitalización 3D por proyección de luz láser se dividen en dos grupos fundamentales (...) los sistemas de proyección de línea láser, (...) y los sistemas de proyección de punto (...) Los sistemas del primer grupo, basados en la proyección de una línea de luz láser (...) proyecta una línea sobre el objeto a medir que, mediante elementos mecánicos, barre el objeto a medir, y una

cámara que recoge la deformación de dicha línea al proyectarse sobre el objeto a medir. (...) Los sistemas del segundo grupo, basados en proyección de punto (...) la medición se realiza proyectando un haz de luz láser puntual sobre la superficie del objeto a medir, obteniendo la distancia desde el sistema hasta dicho punto de proyección. (...)

El concepto de nube de puntos se define brevemente en el trabajo realizado por Cruz-Ramírez et al (2023), que cita a su vez a M. et al., (2006) y Edl et al., (2018):

(...) las nubes de puntos son modelos matemáticos que contienen variables en las que se almacenan datos relacionados con las coordenadas espaciales (XYZ) (Barber, 2006, p. 36) y colores RGB de las superficies que captura el instrumento (Edl et al., 2018), las cuales sirven para representar de manera gráfica la forma y la apariencia de las superficies físicas –sean elementos divisorios, cubiertas, mobiliario o vegetación.

La forma de generar estas nubes de puntos puede variar, dependiendo de factores económicos, técnicos, así como los objetivos y alcance del trabajo a realizar; a propósito, se cita un segundo extracto del trabajo realizado por Cruz-Ramírez et al (2023), que cita a su vez a Lercari, (2016) y Xu & Stilla, (2021).

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

Según Lercari (2016) este tipo de métodos de escaneo abre nuevos horizontes para la conservación y documentación de estas estructuras, sobretodo en la actualidad cuando los fondos destinados a este tipo de actividades son limitados, previendo que la detección y el tratamiento de patologías presentes podrá ser abordado de manera oportuna, con el consecuente ahorro económico que implica.

2.2. Aplicaciones y Objetivos

En el ámbito de la edificación, la introducción de las nubes de puntos obtenidas a través del escaneo láser supone una innovación incremental con respecto a las anteriores labores de documentación y es considerado por Xu & Stilla, (2021) como “*una de las mejores*” fuentes de información de mapeo de entornos.

Sus aplicaciones han sido exploradas en actividades como la reconstrucción de edificios, inspección en campo y el seguimiento del progreso en las obras; sin embargo, su utilidad puede verse condicionada por la forma en que se gestione y complementa la información obtenida, ya que si bien cada punto registrado de un objeto dentro de una nube de puntos contiene coordenadas tridimensionales de alta precisión, lo cual es un avance con respecto a métodos tradicionales de proyección de imágenes 2D y medición de distancias *1D*, estas coordenadas no contienen información tipológica y semántica, por lo que es necesario complementar este método de documentación geométrica tridimensional con la obtención de datos contextuales y en el mejor de los casos, generar superficies o representaciones volumétricas a partir de ella, que representen fielmente el objeto o la escena que se desea capturar. (Xu & Stilla, 2021).

Por tanto, se diferencian dos fases concretas, la de adquisición de la información, y la fase de procesamiento de esa información; a su vez estableciendo dos preguntas fundamentales a responder antes de iniciar cualquier proceso de trabajo que tenga por objetivo de crear modelos digitales de alto detalle y con riqueza semántica Xu & Stilla, (2021), las preguntas son citadas a continuación:

- *¿Cuál es el mejor método para adquirir nubes de puntos 3D (...)?*
- *¿Cuál será el flujo de trabajo para reconstruir los objetos registrados (...)?*

Como parte de la metodología de investigación planteada por Xu & Stilla, (2021), para la revisión bibliográfica se establecieron cuatro preguntas a realizar durante la lectura de cualquier trabajo relacionado a la adquisición de datos y técnicas de procesamiento, que permitan adquirir una visión general del panorama *State of the Art actual*, y son:

- *¿Cómo adquirir medidas tridimensionales a través del mapeo del entorno?*

- *¿Cómo integrar los datasets dentro de un mismo sistema de coordenadas?*
- *¿Cómo interpretar el entorno y extraer los objetos de interés?*
- *¿Cómo representar el objeto de interés en un modelo geométrico?*

En este aspecto concuerda Khoshelham, (2018) en su artículo, que resalta la importancia de complementar la digitalización de los espacios a través de información semántica, como documentación histórica y sus relaciones topológicas. Así como otros datos que faciliten la realización de tareas más complejas que las de preservación o restauración, como son la monitorización de la salud, los efectos medioambientales, hacer simulaciones de escenarios hipotéticos y predecir los resultados de una actuación de preservación o restauración.

Dependiendo de la disciplina o campo de conocimiento, existen diversas aplicaciones, por lo que resulta conveniente citar inicialmente aquellas relativas al ámbito de la conservación del patrimonio, tal y como las exponen Croce et al., (2021):

La información disponible producida en el marco de los estudios del patrimonio arquitectónico puede hoy en día referirse directamente a una representación tridimensional (3D) del objeto de estudio. Esto permite llevar a cabo varias tareas, incluyendo el mapeo de materiales y estados de degradación, la representación de superficies con frescos, análisis morfológicos e históricos y la detección de áreas que requieren medidas de recuperación.

Pero también Díaz Gómez et al., (2015) considera de forma adicional una dimensión económica dentro del mercado turístico, planteando que las representaciones tridimensionales interactivas para los turistas son una manera innovadora y llamativa de atraer al público y aumentar su interés sobre el patrimonio histórico, que al observarlo e interactuar con éste de forma digital permite a su vez proteger dichos bienes del posible deterioro que implicaría exponerlo libremente al tránsito de multitudes por largos periodos de tiempo.

En el campo del patrimonio cultural, la generación de contenidos virtuales, aparte de la fotografía, se basa en la digitalización 3D. Debido a la especial naturaleza de los objetos o elementos que se inscriben dentro del patrimonio cultural (fragilidad, alto grado de deterioro, alta sensibilidad a agentes extraños, etc.), a la hora de realizar el proceso de digitalización sólo se pueden utilizar tecnologías no invasivas ni destructivas, que aseguren su integridad e

inalterabilidad. Por lo que están cobrando cada vez mayor importancia las tecnologías de digitalización 3D basadas en técnicas ópticas.

Evidentemente una las principales motivaciones para este tipo de labores en el ámbito de la conservación del patrimonio es evidenciar gráficamente el estado original de los bienes, sus dimensiones, materiales, acabados, entre otras características que pueden facilitar labores posteriores de conservación, mantenimiento e incluso reconstrucción. Tal y como se cita a continuación por J.C. Torres et al. (2010)

Documento gráfico. *El modelo digital constituye un detallado documento gráfico tridimensional, que puede permitir saber cómo era un objeto en un momento dado. Esta documentación es especialmente valiosa cuando se va a realizar alguna intervención en el elemento, ya que constituye un registro tridimensional de la superficie del objeto, que permitiría reconstruirlo en caso de desastre.*

Difusión. *Una de las aplicaciones más frecuentes de la digitalización ha sido la generación de modelos 3D para realizar visitas virtuales. El objetivo aquí es poder crear imágenes o animaciones, que faciliten el conocimiento del patrimonio. Esto es especialmente interesante cuando el original es de difícil, o peligroso, acceso, o cuando las visitas deterioran el original. También tiene sentido para permitir una mayor difusión, llegando a un número de personas mayor. Obviamente se puede usar como vehículo para promocionar el patrimonio. (...)*

Maquetación. *La tecnología de impresión 3D desarrollada en la última década permite realizar copias a escala, o a tamaño real, del elemento. De esta forma es posible realizar maquetas de gran fidelidad, y replicas completas, como se ha hecho con las cuevas de Altamira. Esto ha permitido sustituir las visitas a las cuevas por recorridos en la réplica, favoreciendo la conservación. (...)*

Análisis. *Disponer de información detallada del modelo puede permitir analizar el estado del mismo. Se puede comparar el estado del modelo en dos momentos diferentes y también generar información a partir de las propiedades geométricas del modelo en su estado actual. (...)*

Restauración. *En el proceso de restauración la digitalización puede ser útil como registro de la evolución del proceso. Esto permite analizar los cambios realizados en el objeto. (...)*

2.3. Metodología HBIM.

Según Díaz Gómez et al. (2015) este proceso se conoce como post-procesado y generación de elementos virtuales y considera que es un paso posterior a la creación de una nube de puntos; Establece a propósito la siguiente clasificación:

Hay dos tipos fundamentales de presentación de la información 3D, mediante visualización del propio modelo o mediante el uso de vídeos. En el primer caso, el objetivo final del procesado es la generación de un modelo 3D de alta calidad que, posteriormente, será visualizado (...)

El modelado de un sistema de información que integre los datos de un bien patrimonial a partir de una nube de puntos es una práctica que añade aún más valor a estas labores de documentación histórica, esta metodología ofrece una multitud de aplicaciones dependiendo de la disciplina en la que se use, por ejemplo, la monitorización del proceso de envejecimiento y degradación de la estructura.

Sin embargo, presenta un reto significativo y es que las características constructivas y de diseño que presentan las edificaciones antiguas suelen ser únicas y heterogéneas, lo cual dificulta su representación debido a la limitada variedad de elementos en las actuales librerías *BIM*.

Con respecto a esto Murphy et al. (2013) aborda en su artículo de 2013, el proyecto *HBIM* o "*Historic Building Information Modelling*"; que consiste en un prototipo de librería de objetos paramétricos, que, a partir de nubes de puntos o superficies escaneadas, junto con información obtenida de fuentes bibliográficas antiguas, genera elementos paramétricos a través de lenguaje geométrico descriptivo (GDL). Esto permite introducir estos componentes dentro de la superficie escaneada, obteniendo un producto final que además de la información gráfica cuenta con información de sus materiales y métodos de construcción.

Existen antecedentes recientes a nivel nacional e internacional, que han llevado a cabo estas labores con distintos objetivos, a continuación, se citan algunos de éstos y los objetivos que buscaban conseguir:

Con el objetivo de valorar la posibilidad de gestionar las deformaciones estructurales a través de modelos paramétricos y dentro de flujos de trabajo *HBIM* Moyano et al. (2022) proponen crear a partir de la nube de puntos, análisis numérico avanzado y técnicas no invasivas de muestreo, un modelo paramétrico y dinámico que

permita analizar las consecuencias a nivel estructural del paso del tiempo y otros factores que han provocado o pueden llegar a provocar degradaciones a futuro y comprometer así la conservación de la edificación histórica.

El experimento se realizó sobre el Palacio Arizón, ubicado en Sanlúcar de Barrameda, Cádiz, España; se trata de una edificación declarada de Interés Cultural en 2001, la metodología consistía en determinar la deformación horizontal y vertical de los pilares, arcos y muros mediante la comparación de un modelo paramétrico (basado en la nube de puntos) y un modelo matemático del elemento con geometría ideal creado a partir del lenguaje de programación Dynamo del software Revit. Moyano et al., (2022). Obteniendo como resultado deformaciones en los muros que serían característicos de edificios antiguos, con lo que los autores consideran estos resultados concluyentes.

Un caso similar fue presentado por Carlos A. León-Robles et al. (2018). En el que se realizó el escaneo y creación de modelo paramétrico del puente Ízbor, ubicado en Granada, España; construido en 1860; del que no se contaba con la suficiente documentación técnica para gestionar eficientemente las labores de conservación, que resulta necesaria al emplazarse en una zona con inestabilidad geotécnica que ha provocado patologías en estructuras cercanas similares.

La metodología se estructuró en dos fases, la inicial que consistía en capturar la nube de puntos, y la de *HBIM* que consistía en procesar la nube de puntos, identificar las partes de la estructura y contrastar información con la documentación técnica disponible, para posteriormente generar familias de elementos paramétricos que permitieran modelar la complejidad e irregularidad de los elementos.

Para cada elemento se crearon parámetros comunes como fecha de construcción, planos de proyecto, material y otros, así como también se introdujeron relativos al estado de conservación, como desplazamiento, fisuras, ataques químicos o biológicos, entre otros. Adicionalmente se determinó la distancia entre las siluetas laterales obtenidas de la nube de puntos, y planos uniformes paralelos, detectando deformaciones de aproximadamente cinco centímetros que podrían ser atribuibles a asentamientos del terreno o resultado del proceso de ejecución.

Otro caso de estudio, llevado a cabo por Castellano-Román & Pinto-Puerto, (2019) sobre la creación de un modelo paramétrico que reflejara la evolución histórica del conjunto monumental de *La Cartuja de Santa María de la Defensa* ubicado en la ciudad de Jerez, en Cádiz, España; va incluso más allá con una propuesta de estructuración de fases para la metodología *HBIM* que se fundamente en las principales

líneas de acción que busca abordar ésta metodología definiéndolas como: la Identificación, Protección, Conversación, Disseminación e Investigación.

Basándose en conceptos generales de la metodología BIM propuestos por el *American Institute of Architects*, Castellano-Román & Pinto-Puerto, (2019) extrapolan el concepto de Niveles de Detalle (LOD) y los redefinen como Niveles de Conocimiento (LOK), clasificándose en LOK100 para niveles de identificación básica; LOK200 para la definición de información de protección y disseminación inicial; LOK300 para un nivel intermedio de investigación y modelado, LOK400 que abordan planes de conservación e intervención y LOK500 en caso de proyectos incorporados a un programa periódico de investigación, inversión, conservación preventiva, uso y disseminación.

También extrapola las dimensiones de contenido de la metodología BIM hacia la metodología *HBIM*, redefiniendo 7 nuevas dimensiones que denomina: 3D a aquella que engloba el análisis, captura y procesamiento de datos; el 4D que abarca la evolución histórica; el 5D sobre el diagnóstico del nivel de protección, conservación y categorización; el 6D sobre el contexto cultural y finalmente el 7D que abarca la conservación preventiva.

Para comprender el contexto de la propuesta se adjuntan las imágenes de las propuestas realizadas, propiedad intelectual de Castellano-Román & Pinto-Puerto, (2019) como se muestra en la Figura 3.



Fig. 3. Structure of the Heritage Building Information Repository.



Fig. 7. Characterization scheme of the Levels of Knowledge LOK in HBIR.



Fig. 6. Dimensions in HBIM

Figura 2: Propuestas de metodología HBIM; Fuente: (Castellano-Román & Pinto-Puerto, 2019) .

Otras de las aplicaciones innovadoras de la investigación en este tipo de edificaciones es la de analizar su eficiencia energética a través de BEM, esto fue abordado por artículo de Prado Costa et al., (2024). La metodología de Modelos de

Energía en la Construcción (BEM) facilitan la visualización térmica y simulaciones energéticas en modelos paramétricos partiendo de detalles fehacientes técnicos y constructivos; esto es un reto en el caso de la metodología HBIM que debe recurrir a la obtención de información a través de técnicas de inspección no destructivas.

El artículo realiza una revisión bibliográfica y bibliométrica, determinando que existen 32 referencias que abordan esta línea de investigación y emplean como software BIM predominantemente Revit, y como herramienta BEM distintas alternativas como TerMus, TRNSYS, EnergyPlus, Therm o Wufi Pro 6, así como herramientas VPL, por lo general Dyanmo. El objetivo final de este flujo de trabajo es planificar adecuadamente posibles intervenciones para mejorar aspectos relativos al consumo energético, como el confort térmico, ahorro energético y ventilación. Entre los principales conceptos estaba la envolvente de los elementos, propiedades térmicas de estos, transmitancia (U-Value), absortancia solar y capacidad o densidad térmica. Prado Costa et al., (2024)

Un caso exitoso de la Integración de nube de puntos, antecedentes históricos y datos de evaluación de condiciones en HBIM fue presentado por Chelaru et al., (2024), realizando un modelado del Monasterio De Galata en Rumanía. Los objetivos fueron establecer una plantilla de Revit que se adaptara a los requerimientos del estudio; especificar el nivel de desarrollo (LOD 300); capturar la información de datos pertinentes, integrar la nube de puntos al modelo de Revit, identificar patologías y deterioro, así como estandarizar protocolos para identificar, clasificar y caracterizar estas patologías.

El principal reto era la creación de familias y elementos paramétricos empleando herramientas variadas, además hace uso del concepto de Punto de Información de Superficie (SIP) que junto con un lenguaje Dynamo, logra crear una superficie a partir de reconocer la información de cada punto de la nube de puntos. A modo de conclusión, se considera que aporta la automatización de tareas a través de add-ins de Revit, códigos de Dynamo y software de modelado en un flujo de trabajo que muestra una optimización de la productividad, reducción de errores en las tareas y que todo esto aporta una nueva dimensión de conocimientos en materia de conservación y preservación del patrimonio, se puede observar esto en la Figura 3



Fig. 2. Proposed methodology - Stages to process and edit the input data and generate the Revit model.

Figura 3: Captura de pantalla de imagen sobre la metodología propuesta para el trabajo de Chelaru, et al, de 2024. Fuente: (Chelaru et al., 2024).

Si bien Revit es una herramienta que ha sido empleada en la mayoría de los casos anteriormente citado, también existen antecedentes de flujos de trabajo multidisciplinarios que emplean otras herramientas de modelado tridimensional para complementar las prestaciones de Revit, como lo es Blender, y esto es explorado en profundidad por Elesair et al. (2022).

Siguiendo los pasos iniciales para la obtención de una nube de puntos a través de tecnología láser, en este caso de estudio se realizó un proceso de modelado paralelo, en donde las geometrías complejas, NURBS y orgánicas se crearon en Blender y fueron enriquecidas con el plugin Em tool que conecta con la interfaz de la herramienta Extended Matrix tool (ED tool) creada por E. Demetresco y que esquematiza información de acuerdo al enfoque estratigráfico distintivo de la arqueología.

Posteriormente se emplea el *addon* de código abierto denominado *BlenderBIM* del software *Blender* que permite agrupar elementos geométricos en entidades IFC, esto permite que pueda ser exportado en formato IFC a Revit y tener las prestaciones de dicho software para enriquecer el modelo.

En casos singulares donde resulta inviable a nivel técnico la adquisición de documentación gráfica necesaria para generar una nube de puntos se recurre a otro tipo de métodos para su obtención, bien de carácter semántico como mapas o dibujos técnicos, mediciones en campo, así como información georreferenciada y documentación fotográfica, tal y como abordan en cuanto a la realización del modelo paramétrico del Acueducto Aguas Livres en Lisboa.

Resultando interesante el uso secuencial de varias herramientas, entre las cuales se encuentra Google Earth® para obtener coordenadas del puente, Microsoft Excel® para registrar las coordenadas y poder realizar comparaciones entre diferentes fuentes para obtener todos los nodos importantes del eje longitudinal del acueducto,

Autodesk AutoCAD® para ordenar los puntos georreferenciados, ArcGIS® para superponer la información con mapas, Revit®, como software “clave” al permitir el modelado paramétrico, así como Blender® usado como medio de visualización del modelo.

El modelo se presentó a la Empresa Portuguesa de Aguas Livres que a su vez articuló las necesidades que tenía como organización para la gestión del Acueducto y la comunicación interdepartamental que podrían ser resueltas empleando el modelo, estas necesidades iban desde la identificación de las patologías existentes hasta reflejar en éste solicitudes de intervención dirigida a los equipos de restauración.

A modo de conclusión se considera que para los requerimientos técnicos del proyecto, el modelo y la forma de generarlo fueron adecuadas, así como expone limitaciones relativas a la dificultad de utilizar diferentes software intermediarios, ajustar sus valores paramétricos para que admitan geometrías irregulares propias de las edificaciones antiguas; el tiempo que supone corregir errores sobre el modelo, que implica reiniciar fases de limpieza geométrica, asignación de texturas y resolver las intersecciones y colisiones entre los elementos, afirmando que de requerirse un mayor nivel de detalle, debido a la magnitud del modelo, sería necesaria su segmentación en varios archivos.

Otro ejemplo de flujo de trabajo que integra otras herramientas digitales con el fin de crear un modelo representativo más fidedigno se aborda por Karasaka et al., (2023), para la realización de un modelo de escuela Primaria de İsmetpaşa, en Turquía, partiendo de la nube de puntos.

Los resultados de éste trabajo se estructuran en siete etapas, la primera de ellas fue la extracción de la información geométrica de la nube de puntos a Revit a través de Autodesk Recap 2022 Software, que permitió su procesamiento, gestión y conversión del formato a “.rcp”. La segunda fase fue la de Crear los Niveles en planimetría y representar muros, puertas y ventanas en proyección. Luego, se escogieron familias de muro y suelo que tuviesen dimensiones similares a las determinadas en la nube de puntos y luego se editaron sus propiedades y parámetros, la cuarta, quinta y sexta fase consisten en la creación de ventanas, puertas, escaleras, rampas y barandillas editando familias preexistentes y ajustando sus características basándose en la nube de puntos; la etapa séptima se enfoca en la creación de imágenes renderizadas del resultado.

La adquisición de información de carácter semántico y métrico puede requerir la realización de pruebas, toma de muestras sin provocar daños al bien y muchos más

métodos complementarios, dependiendo del nivel de detalle que se quiera realizar y el tipo de estructura.

2.4. Restricciones, Desafíos y Dificultades

Existen limitaciones de carácter técnico, logístico e incluso legal que restringen o condicionan la calidad y la completitud de los datos obtenidos tanto en la fase de obtención de información como en la de procesamiento de ésta; estas dificultades aumentan si se trata de espacios urbanos o de gran extensión y complejidad geométrica, tal y como lo abordan Aparicio et.al (2022) Todos estos impedimentos se traducen en oclusiones, pérdida de información, deformación de los objetos o visibilidad reducida.

Por ejemplo, en caso de documentar de forma indirecta o directa una edificación que se encuentra habitada, las limitaciones legales relativas a la privacidad de los usuarios o la propiedad del inmueble pueden condicionar el posicionamiento del instrumento de escaneo, bien sea a nivel del suelo como un láser, o en el aire como los drones adaptados, que estarán sujetos a limitaciones relativas al espacio aéreo y la altura en vuelo permitida Xu & Stilla, (2021).

Otro reto relevante es la conciliación entre el tipo de entorno, objeto o edificación a documentar y las prestaciones y características de uso del mismo.

Este fue un reto importante para Khoshelham, (2018) durante el escaneo tridimensional del Palacio Real de Exposiciones en Australia, concluyendo que la eficiencia del proceso de escaneo condiciona en gran medida la calidad de todo el proceso, exponiendo que los radares sostenidos a mano basados en tecnología de algoritmos SLAM generaban información menos fehaciente, así como el proceso de modelado en BIM y sus elementos paramétricos no representaba de forma fiel la geometría de todos los elementos, en especial lo más singulares

La limitación más condicionante es la de la accesibilidad y visibilidad del sitio que se desea documentar, que puede limitar o imposibilitar la captura desde un ángulo determinado; de igual forma, la presencia de individuos, vegetación u otro tipo de elementos que obstaculicen la superficie del objeto que se desea documentar provoca la ausencia de la información gráfica obstruida Xu & Stilla, (2021).

Destaca el caso abordado por Semina et al., (2022), durante la realización de un modelo de información tridimensional a partir de una nube de puntos de la Catedral de la Exaltación de la Santa Cruz de Solikamsk, Rusia, el estado de deterioro avanzado impedía el acceso a ciertas estancias interiores debido al colapso de las escaleras y particiones horizontales, por lo que se decidió realizar un escaneo exterior a partir de

fotogrametría y escaneo láser aéreo con un Dron, limitando el estudio solo a la envolvente externa de la edificación.

En cuanto a la fase de procesamiento posterior y con respecto a los modelos de HBIM, también recalca que una característica de las estructuras históricas es la desviación de sus elementos de una figura geométrica ideal, así como la heterogeneidad de sus materiales y todas las patologías existentes. Esto implica que al modelar con familias paramétricas o generar volúmenes tridimensionales, en ocasiones el modelo idealiza o no representa fielmente la autenticidad geométrica del objeto, que incluye pandeos, deformaciones, daños y muros desiguales, entre otros.

Si bien la mayoría de objetos pueden modelizarse a través del lenguaje geométrico descriptivo (GDL) a partir de la combinación de distintas formas como cilindros, elipses deformadas y esferas, cuando la complejidad aumenta se puede recurrir a prismas torneados, y polilíneas revolucionadas. En casos más complejos y para formas orgánicas y no uniformes se puede recurrir a un diseño complejo de NURBS, mallas u operaciones booleanas.

A modo de ejemplo Kivilcim & Duran, (2021) ofrecen los resultados de la realización de un modelo paramétrico del domo de la Mezquita de Sehzade, construida en 1548 en Estambul, Turquía; en donde el principal objetivo era documentar la deformación existente de la estructura en el modelo generado para lo cual utilizaron el algoritmo denominado *RANSAC*, introducido en 1981 por Fischler y Bolles para detectar figuras geométricas como esferas, cilindros y planos a partir de nubes de puntos, la implementación fue codificada con Python, la visualización con *VTK*, y el objeto paramétrico extraído fue exportado a *FreeCAD* usando módulos de *Python*, que también permitieron exportarlo a formato *IFC* para ser llevado a *Autodesk Revit*.

Murphy, en 2013, propone una nueva metodología para el proceso de HBIM en estructuras y ambientes históricos, que inicia por la recolección y procesamiento de imágenes escaneadas y de laser, la identificación en detalles históricos de libros de patrones arquitectónicos; la creación de objetos paramétricos históricos, su correlación y mapeo con los escaneos de datos. Con el fin de generar documentación 3D, proyecciones ortográficas, secciones, detalles, programas (energéticos, económicos, etc....), añadiendo así la inteligencia de la información a las “nubes de puntos”.

2.5. Conclusiones

La documentación gráfica de edificaciones existentes consideradas bienes de interés cultural o histórico es una práctica contemporánea que atiende a distintas necesidades de carácter investigativo, técnico o bibliográfico y abarca distintas disciplinas como la Historiografía, la Arquitectura, la Ingeniería, la Arqueología, la Sociología, la Antropología, entre muchas otras.

La metodología empleada para lograrlo ha evolucionado a lo largo del tiempo y está en constante evolución como por ejemplo el *HBIM*; La creación de modelos paramétricos a partir de *nubes de puntos*, generadas a partir de tecnología láser constituye actualmente una de las herramientas más modernas, rápidas y de mayor calidad en este contexto, permitiendo elegir un nivel de detalle que puede adaptarse de acuerdo al objetivo del trabajo, el cual puede variar desde documentar toda la edificación, ciertas zonas de esta o componentes particulares como molduras, elementos estructurales, artesanías, tallados, carpinterías y obras de arte incorporadas.

Igualmente existen retos que dependen de varios factores, como la complejidad de las estructuras históricas, la variabilidad en la calidad de los datos obtenidos dependiendo de la tecnología empleada y la integración efectiva de estos en modelos paramétricos; la planificación en éste aspecto permite evaluar aquellos métodos que ofrecen resultados fiables y aquellos que pueden generar errores o imprecisiones a partir de una evaluación cuidadosa de las capacidades y limitaciones de cada una de las alternativas disponibles.

En el contexto de la protección del patrimonio se considera una herramienta que puede facilitar diversas tareas como la de mantenimiento y conservación de estas edificaciones, además de proporcionar una valiosa fuente de información para la investigación, la educación y la apreciación pública del patrimonio cultural.

3. DOCUMENTACIÓN HISTÓRICA DEL CASTILLO DE SAN JUAN BAUTISTA Y LA CASA DE LA PÓLVORA.

A continuación se realizará una revisión bibliográfica exhaustiva sobre la documentación histórica del Castillo de San Juan Bautista y la Casa de la Pólvora en Santa Cruz de Tenerife, siendo edificaciones construidas tras la colonización española y que incorporan influencias arquitectónicas hispánicas con materiales locales (Pérez, 2019); Su uso militar es propio de su ubicación costera y su época de construcción, por un lado, el Castillo de San Juan Bautista, construido entre la primera mitad del siglo XVII y reconstruido en 1765 (García et al., 2019), y la Casa de la Pólvora, construida entre 1756 y 1758 (Ortiz García, 2004), fueron respuestas directas a la necesidad de proteger las islas debido a su posición geoestratégica y la amenaza constante de potencias extranjeras y piratas (Díaz Rodríguez et al., 2019). Esta revisión aborda la historia, evolución y preservación de estas edificaciones, destacando su importancia arqueológica, arquitectónica y cultural. Las fuentes incluyen publicaciones especializadas y consultas en la Biblioteca de Tenerife Espacio de Las Artes (TEA) y el Museo Militar de Almeyda.

3.1. Contexto Histórico

Existen dos tipos de edificaciones en Canarias: las precoloniales y aquellas edificadas posterior a su colonización; las edificaciones precoloniales se caracterizan por el uso de materiales locales como la piedra seca y reflejan las técnicas y conocimientos primitivos de los aborígenes canarios. Por otro lado, las edificaciones coloniales, construidas después de la llegada de los españoles en el siglo XV, incorporan técnicas de la arquitectura hispánica, a la vez que introducen materiales locales, creando edificaciones de tipología nueva y ajustada a las necesidades de la época, como casas señoriales y fortificaciones militares (Pérez, 2019).

Las edificaciones analizadas en esta revisión bibliográfica son el Castillo de San Juan Bautista y la Casa de la Pólvora; estas construcciones costeras fueron una respuesta directa a la necesidad de España de mantener su dominio sobre la Islas Canarias durante periodos de conflictos bélicos, especialmente debido a su posición geoestratégica y la constante amenaza de potencias extranjeras y piratas. Las costas de la isla, especialmente Santa Cruz de Tenerife, tenían una fuerte presencia de edificaciones militares, incluyendo castillos, torres de vigilancia y baterías costeras, diseñadas para salvaguardar tanto a la población local como a las rutas comerciales vitales para el Imperio Español (Díaz Rodríguez et al., 2019).

El Castillo de San Juan Bautista, construido entre la primera mitad del siglo XVII y reconstruido en 1765, tenía como propósito inicial proteger el puerto de Santa Cruz de

Tenerife de los ataques piratas y otras amenazas extranjeras (García et al., 2019). Mientras que la Casa de la Pólvora, construida entre 1756 y 1758, servía como almacén de pólvora para las fortificaciones cercanas, asegurando un suministro constante de municiones para la defensa de la ciudad (Ortiz García, 2004).

En esta revisión se abordará la historia de estas edificaciones dentro de su contexto histórico y de qué forma ha evolucionado su uso, percepción y preservación hasta la actualidad, con el fin de destacar la importancia arqueológica, arquitectónica y cultural de preservar su singularidad arquitectónica como un bien invaluable para la memoria histórica y cultural de Canarias. Preservar estas estructuras a través de modelos digitales no solo garantiza su conservación física, sino también su accesibilidad y apreciación por futuras generaciones (Díaz Rodríguez et al., 2019).

3.2. Castillo de San Juan Bautista

Desde la conquista de Canarias en el siglo XV por parte de la Corona de Castilla, esta región periférica supuso un punto estratégico y la principal ruta de transporte desde la península ibérica hacia sus posesiones y asentamientos en las Américas. Así mismo, supuso el control estratégico por parte de la Corona de Castilla de las rutas marítimas hacia el atlántico y América convirtiendo a la nación como la primera potencia marítima y colonial de la época. También la conquista de las islas aumentó el prestigio de la Corona de Castilla en Europa y permitió crear una política expansionista tanto cultural como religiosa, algunos autores señalan que la conquista de Canarias fue, en parte, un experimento expansionista que actuó como antesala para la colonización de los diferentes países del nuevo mundo, sirviendo de ejemplo y experiencia en cuanto a la manera de colonizar y someter a las poblaciones locales (Suárez J.H, 2018).

Ya en el siglo XVII se había establecido completamente la ocupación de las Islas Canarias en la Corona de Castilla siendo el principal motor económico de la región la producción de azúcar, no obstante, el mayor interés era su posición geográfica como punto intermedio hacia las colonias en América, esta situación fue la causa de diferentes incursiones por parte de diferentes países para obtener los beneficios de los recursos económicos que se movían en este entorno. Países como Francia, Inglaterra o países bajos fueron los principales percuores de estas incursiones, algunas de ellas de manera bélica, según su situación política con la Corona Castellana. También las islas fueron escenarios de varias incursiones piratas, las cuales bloqueaban sus puertos y esperaban para abordar a los barcos mercantes que por ahí pasaban, o en algunos casos, secuestraban a pobladores para su venta en costas africanas como esclavos (Anaya Hernández, L.A 1982).

La construcción del Castillo de San Juan Bautista, también conocido como el "Castillo Negro", comenzó en 1641 y se completó en 1644 en Santa Cruz de Tenerife. Este periodo coincidió con importantes conflictos y cambios geopolíticos en Europa, como la Guerra de los Treinta Años (1618-1648), que involucró a numerosas potencias europeas, incluida España (Gayubas, 2024; Fortera Pérez et al., 2021). Aunque estos eventos no impactaron directamente a las Islas Canarias, influyeron en las consideraciones estratégicas militares de España, enfatizando la necesidad de fortificar sus territorios y proteger rutas marítimas.

La ubicación estratégica de Santa Cruz de Tenerife como un punto vital entre España y sus colonias americanas la convirtió en un objetivo para potencias extranjeras y piratas; el Castillo de San Juan Bautista se construyó como una fortificación de artillería costera para defenderse de tales amenazas, desempeñando un papel fundamental en la red defensiva de la isla (Díaz Rodríguez et al., 2019); el diseño circular del fortín y el uso de piedra volcánica local no solo proporcionaron capacidades defensivas robustas, sino que también ayudaron a integrar la estructura con el paisaje circundante, camuflándolo. (García et al., 2019).

A lo largo de su historia, el Castillo de San Juan Bautista estuvo involucrado en varios enfrentamientos militares. Notablemente, participó en la defensa contra la flota del almirante Robert Blake en 1657 y más tarde contra Horatio Nelson durante la Batalla de Santa Cruz de Tenerife en 1797, donde Nelson perdió su brazo (García et al., 2019). Estos conflictos subrayan la importancia estratégica del castillo en la protección de la ciudad y sus intereses marítimos.

3.2.1. Diseño y Construcción

El castillo de San Juan Bautista se encuentra ubicado en el municipio de Santa Cruz de Tenerife, entre el parque marítimo César Manrique y el Auditorio de Tenerife Adán Martín. Se encuentra en primera línea de mar, con una planta circular de 30 metros de diámetro y una altura total de 8 metros. Los muros están realizados con mampostería de piezas de piedra basáltica característica de la zona, con tonalidad gris oscura o negra, debido a su composición mineral y presencia de minerales máficos.

De manera popular, se nombra al castillo de San Juan Bautista como el castillo negro de Santa Cruz de Tenerife, sin existir testimonio veraz de este apodo y suponiendo su origen al color del basalto que compone sus muros, o a su ubicación primigenia en la conocida como Caleta de Negros (Gobierno de Canarias, s.f). Su planta circular tiene una forma simétrica de su geometría, cuenta con un acceso principal flanqueado por un foso y provisto de un puente de madera levadizo.

En su interior, la primera planta está provista de dos cúpulas principales cuya funcionalidad consistía en almacén de pólvora y una dependencia para el alcaide, además cuenta con una pequeña cavidad que alberga un pedestal y ornamentaría para el culto religioso. Todos estos aposentos conectan con un pasillo central que se alarga hasta un patio central abierto, en su parte trasera, dispone de una sala con geometría rectángulo-circular siguiendo la línea trasera de los muros contorno de la construcción, destinada como lugar de descanso de los soldados custodios del castillo.

En su planta alta, cuyo acceso se produce por una escalera de piedra basáltica conectada desde pasillo principal, se disponía la batería de cañones que servían como defensa del puerto, no existe en esta planta ninguna dependencia o separación horizontal, y se incluye el hueco del patio del castillo, además, alberga dos torreones de forma cilíndrica en los extremos exteriores de las alas del muro contorno, y una pequeña cavidad cuya finalidad consistía en lugar para defecar. Este castillo forma parte de una serie de construcciones que sirvieron en la defensa del puerto de Santa Cruz de Tenerife y supone la segunda defensa más importante del municipio. Figura 4



Figura 4: Fotografía del Castillo de San Juan Bautista (Elaboración propia)

3.2.2. Función Defensiva

Junto con otros fuertes y trincheras, el castillo de San Juan Bautista actuaba como fortificación para la defensa del puerto de Santa Cruz de Tenerife. Durante el siglo XVII, la ciudad capitalina de Tenerife estaba ubicada en la ilustre ciudad de San Cristóbal de La Laguna, y Santa Cruz correspondía al puerto principal junto con el de la villa de la Orotava y Garachico (García Montes de Oca, A et al 2022). La causa de la construcción de las diferentes líneas defensivas, baterías y castillos en el puerto de Santa Cruz correspondía a la necesidad de conferir protección frente ataques enemigos desde el mar dado que, el puerto suponía un punto de alta vulnerabilidad frente al desembarco.

A medios del siglo XVII, como especificamos en los capítulos anteriores, la corona de castilla se encontraba sumergida en varios conflictos bélicos con otros países europeos y dado a la importancia estratégica y económica que suponía las islas

afortunadas, estas eran propensas a ser invadida por los países enemistados con la corona, de los cuales hablaremos más adelante. El primer documento cartográfico que se cuenta de la ciudad de Santa Cruz, fue realizado en 1588 por el ingeniero cremonés, Leonardo Torriani que por encargo del rey Felipe II, habría llegado al pequeño núcleo poblacional, para trazar y levantar una serie de fortificaciones necesarias en la época para defenderse de los continuos ataques piratas, holandeses, ingleses y franceses.

Leonardo Torriani sugirió el levantamiento del castillo de San Juan de Bautista en el año 1577, además de la construcción de un amurallamiento desde el ya existente castillo de San Cristóbal hacia el sur, más allá de la ubicación del castillo negro en el cabo de negros y que protegería el núcleo central de Santa Cruz y el barrio de Cabos separado del primero por el barranco de Santos, además de sugerir en aquel entonces la necesaria fortificación del castillo de San Juan de Bautista, Leonardo Torriani sugiere la expansión del amurallamiento hacia el norte (García barba, F. 2012); Figura 5.



Figura 5: Cartografía de Leonardo Torriani de Santa Cruz de Tenerife, tomado de, *Orígenes Urbanos de Santa Cruz de Tenerife*.

Aun habiéndose definido por Leonardo Torriani la construcción del castillo negro en el año 1577, no fue hasta el año 1640 que comenzó la realización de su construcción, terminada 3 años más tarde. Mas adelante, a comienzos del siglo XVIII, el militar Miguel Tiburcio Rosell realizó una descripción cartográfica de la localidad santacrucera y su contorno marítimo, donde se aprecia la poca expansión urbanística del municipio, (debido a los esfuerzos durante el siglo XVII de expansionarse hacia en interior de la isla proveyendo lugares para la explotación agraria de la caña de azúcar y de viñedos) y la expansión de sus murallas y fortificaciones hacia el norte, plasmando en un plano otras baterías como: Batería de Calvario (1656), el Castillo de Paso Alto (1626), Batería de San Antonio (1656), Batería de N^a Señora de la Concepción (1656), Batería de San Francisco (1656), Batería de San Telmo (1665) y el castillo ya terminado de San Juan de Bautista (1643) (García barba, F. 2012). Figura 6





Figura 6: Dibujo de Miguel Tiburcio Rosell de Santa Cruz de Tenerife, elaborada en el año 1701, tomado de, Santa Cruz de Tenerife en el siglo XVIII.

Ya en el año 1740, a través de la obra “Descripción geográfica de las Islas Canarias” De Antonio Riviere y su equipo de ingenieros, se abarca una descripción detallada de las Islas Canarias, centrandó realmente este trabajo en las islas de Las Palmas de Gran Canaria y Tenerife. Antonie Riviere fue un Ingeniero Frances al servicio de la corte española y al mandato del secretario del estado, Uztáriz, el 23 de noviembre de 1738, fue enviado a las islas con la misión principal de “Reconocer e informar del estado de las dependencias de su ministerio en aquel destino”. Así pues, este ingeniero publicó en su obra algunos documentos cartográficos de la costa e instalaciones defensiva del puerto de Santa Cruz (Gerencia Municipal de urbanismo de Santa Cruz de Tenerife, 2020) (Camarero Bullón, C. 1998); Figura 7



Figura 7: Plano de Antonie Riviere de Santa Cruz de Tenerife, elaborada en el año 1740, tomado de, Santa Cruz de Tenerife en el siglo XVIII.

En este plano, se aprecia por un lado la expansión urbanística del núcleo principal del pueblo costero (debido principalmente al abandono del desarrollo del puerto de Garachico, tras sufrir la erupción del volcánica del Chinyero en 1706 y su sepultamiento) creciendo hacía su interior y estableciéndose como núcleo urbano más consolidado, además, el barrio de El cabo también experimenta un crecimiento hacía sus costados. Aparecen reflejados campos y molinos de vientos en las cercanías de este barrio dando lugar a las “tahonas” o panaderías y configuran el nombre de las calles del barrio a este sentido como la Calle de Los Molinos, Calle del Humo o La Calle de Las Panaderas.

Por otro lado, se refleja la construcción de otras fortificaciones y baterías y la construcción de la pasarela del muelle, enfrentada al castillo de San Cristóbal. En total, se representa en el plano 12 baterías, fuertes y castillos: Castillo de San Juan de Bautista, Batería de San Francisco, Batería de N^a Señora de la Concepción, Castillo de San Cristóbal, Batería del Rosario, Batería de San Pedro, Batería de Santa Isabel y Calvario, Batería de San Antonio, Batería de N^a Señora del Pilar, Batería de Candelaria, Batería de San Miguel, Castillo de Paso Alto, además de la casa de la Pólvora que servía como lugar para almacenamiento de la pólvora y el amurallamiento en la primera línea

de la playa desde el castillo de Paso alto hasta el castillo de San Juan Bautista, extendiéndose este hacia el sur (Gerencia Municipal de urbanismo de Santa Cruz de Tenerife, 2020).



Figura 8: Fotografía del Castillo de San Cristóbal, Santa Cruz de Tenerife, tomado de la página web nuestra Isla Tenerife, consultado el día 08/03/2024.



Figura 9: Dibujo del Castillo de San Cristóbal y la Bateria de San Pedro, tomado de la página web nuestra Isla Tenerife, consultado el día 08/03/2024.



Figura 10: Fotografía del amurallamiento del puerto, Santa Cruz de Tenerife, tomado de la página web nuestra Isla Tenerife, consultado el día 08/03/2024.



Figura 11: Fotografía del Castillo de Paso Alto y la Bateria de San Miguel, tomado de la página web nuestra Isla Tenerife, consultado el día 08/03/2024.



Figura 12; Fotografía de la Bateria de San Francisco, tomado de la página web nuestra Isla Tenerife, consultado el día 08/03/2024.

El Castillo Negro de Santa Cruz de Tenerife formó parte activa en la defensa de la línea de playa y del puerto que junto con los otros castillos, baterías y murallas suponían la primera línea de defensa frente al ataque de piratas y tropas enemigas. Se trataban de construcciones justificadas y de gran importancia dado que durante los siglos XVI, XVII y XVIII, Santa Cruz de Tenerife era el lugar de paso principal en la ruta de comercio que unía América con Europa. La disposición de todo el conjunto de baterías permitía realizar un fuego cruzado que abarcara toda la habia del puerto. Todo este conjunto de infraestructuras defensivas participó activamente en varios conflictos bélicos sufrido en sus costas de los cuales hablaremos más adelante.

3.2.3. Intervenciones bélicas de las defensas de Santa Cruz de Tenerife.

Como comentábamos en anteriores puntos, durante lo siglos XVI al XVIII, la corona de Castilla participó en numerables conflictos bélicos con otros países europeos, destacando conflictos abiertos con Inglaterra, Holanda y Francia. Después del descubrimiento del nuevo mundo en las Indias Occidentales (América) y la conquista de canarias a finales del siglo XV, este último territorio supuso un punto estratégico con respecto al comercio y transporte de mercancías desde América hasta Europa, y viceversa. De ahí, la importancia de defender adecuadamente los puertos que servían de lugar de abastecimiento y almacenaje de los bienes adquiridos en las tierras lejanas. Santa Cruz de Tenerife se convirtió en el puerto principal de repostaje para las empresas que iban y llegaban de las Américas, y con tal importancia, fue debidamente fortificada para repeler los diferentes ataques enemigos. Durante su historia, cabe mencionar 3 importantes hitos bélicos sufridos en sus costas, los cuales tenían a los ingleses como principal contrincante: La batalla de Santa Cruz de 1657, el ataque del almirante John Jennings de 1706 y la batalla de Santa Cruz de 1797 por el almirante Horacio Nelson.

Batalla de Santa Cruz de 1657

La Batalla de Santa Cruz de 1657, en la que los ingleses fueron los contrincantes, es el primer gran conflicto acaecido en el puerto de Santa Cruz. Durante esta época, la Corona de Castilla se encontraba en el último periodo

de la Guerra de los Treinta Años y con la empresa colonialista de Nueva España a pleno rendimiento. El recelo del resto de potencias militares llevó a la expedición de patentes de corso ofrecidas a contrabandistas y piratas para que asaltaran las rutas comerciales de la flota de Nueva España hacia el puerto de Sevilla (Díaz Villanueva, 2021).

La mayoría de estas patentes fueron expedidas por los ingleses, aunque también participaron holandeses y franceses. El almirante inglés Robert Blake atacó el puerto de Santa Cruz de Tenerife en 1657 tras recibir el aviso de un importante cargamento proveniente de las Américas y custodiado por la flota de Nueva España.

El conflicto se desarrolló principalmente en la bahía existente entre el Castillo de San Cristóbal y el de Paso Alto. Según el Capitán General de las islas de realengo, Don Alonso Dávila y Guzmán, en una carta enviada a su majestad el 7 de mayo de 1657:

“El día último de abril a las tres de la mañana, tuve aviso de la isla de Canaria de que se habían visto cuarenta navíos, y que parecía hacían su viaje para esta isla... donde estuve al amanecer, y a esa hora se vieron de la Punta de Naga adentro, veintiséis vageles grandes y dos pequeños, que se conocieron ser ingleses, y luego reconocí el Castillo principal, reductos, y baterías, que están en la marina de este puerto, y los proveí de gente, pólvora y municiones...” (García Montes de Oca et al., 2022).”

Aunque en estos documentos no se menciona específicamente el papel del Castillo de San Juan Bautista en este conflicto, se puede suponer que participó en la batalla, dado que estaba armado y provisto durante el ataque, como se describe en otra carta sobre el inventario de los castillos de Santa Cruz del año 1657:

“...nueve barriles de pólvora de a quintal, con su taza; treinta y seis barriles de pólvora de medio quintal, con la taza; doce barriles de pólvora de arroba con su taza.” (García Montes de Oca et al., 2022).

Finalmente, la flota naval inglesa arremetió contra la flota de Nueva España, ocasionando grandes pérdidas y destrucción. Sin embargo, no lograron su objetivo principal de saquear la flota, ya que esta había sido desembarcada y puesta a buen recaudo en San Cristóbal de La Laguna. Así, el resultado de este conflicto se considera un empate, ya que, aunque la flota española fue destruida, los ingleses no pudieron hacerse con el botín.

Intento de Toma del Puerto por la Armada Inglesa en 1706

Otro importante hito bélico registrado en las costas del puerto de Santa Cruz de Tenerife trata del intento de toma del puerto por la armada inglesa capitaneada por el almirante John Jenning. En este caso, si bien no existió un conflicto bélico como tal, donde se abriera fuego de cañón y demás, si supuso una victoria de las tropas españolas apostadas en Santa Cruz. En 1706, a principios del siglo XVIII, desde las atalayas de situadas en las cumbres de Anaga se divisan navíos acercándose a la costa sin velámenes conocidos, llevando a la preparación de las defensas y fortificaciones del puerto. El almirante Jenning al mando de su compañía naval pretendió conquistar el puerto por medio de un sistema persuasorio, mostrando su poderío y fuerza naval e intentando de esta manera tomar el puerto sin abrir fuego.

Esta táctica fue la misma que emplearon 2 años atrás, en 1704 con la toma de Gibraltar. En este caso, el almirante Jenning, habiendo desplegado y bloqueado el puerto, envió un mensajero estableciendo unas condiciones de rendición y jura bandera al archiduque Carlos de Habsburgo. Habilidosamente, el almirante Jenning, sabiendo las dificultades de comunicación del archipiélago con la corona hispánica por su posición periférica, intenta engañar a las tropas españolas y al comandante José de Ayala y Rojas asegurando que la guerra de sucesión española había terminado con victoria del Archiduque Carlos de Habsburgo y que, para evitar la toma por la fuerza del puerto, estos debían rendirse y jurar bandera al nuevo gobernador. No obstante, las tropas españolas se negaron a jurar bandera al nuevo rey prefiriendo entrar en batalla antes de dejar rendir el puerto (Noriega Agüero, M. A, 2014);

Finalmente, al día siguiente el almirante Jenning retira sus tropas y desbloquea el puerto tras fracasar en el intento persuasorio. Este acontecimiento fue percibido por los historiadores como otra victoria más de las tropas españolas de Santa Cruz frente a la armada inglesa, y si bien ocurrió sin presentar un conflicto bélico, las fortificaciones, baterías y murallas jugaron un papel importante para evitar el ataque (Díaz Villanueva, F. 2021);

Batalla contra Horatio Nelson en 1797

Por último, cabe destacar otra importante victoria y conflicto bélico de Santa Cruz de Tenerife ocurrido a finales del siglo XVIII, este acontecimiento histórico producido en 1797 trata de la mayor victoria de las tropas españolas y milicianos de la localidad frente a las tropas inglesas. Esta contienda tiene como principal contrincante y enemigo al general Horacio Nelson, personaje histórico y emblemático de la historia de la armada inglesa. El 22 de Julio de 1797, este almirante intentó conquistar el puerto de Santa Cruz de Tenerife a través de una empresa militar en la que contaba con gran pertrecho de

militares y navíos. El conflicto duró un total de 5 días, con numerosas ocasiones por parte la marina inglesa de tomar las costas de Santa Cruz.

El primer ataque se produciría el 21 y 22 de julio, donde manda a atacar las costas del bufadero con objetivo de conquistar el castillo de paso alto, no obstante, el mal tiempo y el aviso del ataque por sorpresa que pretendían realizar conllevó a la retirada de sus hombres, perdiendo algunas lanchas y soldados por el camino. El segundo intento nuevamente por la zona del bufadero conllevó al desembarco finalmente de 1.000 hombres, aunque esta operación no resultó provechosa debido al continuo fuego proveniente de este castillo, así como las arduas operaciones de descarga del material bélico por parte de los mismos soldados ingleses. El general Gutiérrez, al mando de las fuerzas militares de Santa Cruz, junto con milicianos y vecinos de la localidad consigue frenar el acceso por el bufadero de los ingleses, obligándolos nuevamente a tomar retirada.

El día veintitrés, el ataque se produjo por medio de intercambio de fuego de fusil y cañón desde las fortificaciones hacia las embarcaciones inglesas, sin ningún intento por parte de los ingleses de desembarcar tropas, así mismo, el comandante Nelson reúne a sus oficiales y establece un ataque total y directo para tomar la plaza de la pila (actual plaza de candelaria) y el castillo de San Cristóbal. Al día siguiente llevan a cabo esta operación, concentrado el fuego sobre el castillo de San Cristóbal, la batería de Candelaria y la de San Pedro además del envío de tropas con barcas hacia esta costa, no obstante, las tropas del general Gutiérrez se pertrechan en el castillo de San Cristóbal y en las otras fortificaciones, y presentan batalla concentrando su fuego en las zonas donde se producía el desembarco, es aquí cuando alcanzan al general Nelson que malherido tuvo que tomar retirada.

Por otro lado, algunas de las tropas inglesa consiguen adentrarse en el núcleo poblacional, intentando franquear el castillo de San Cristóbal, sin embargo, al no conocer el entramado de la localidad y sufrir una emboscada por parte de los milicianos, estos se atrincheraron en el antiguo convento de Santo Domingo (cabe destacar de este episodio el paso de las tropas inglesas por la calle que actualmente recibe el nombre del callejón del combate, donde se dice que los propios vecinos atacaron desde las ventanas a las tropas causando bajas enemigas, razón por la cual tiene este nombre a día de hoy).

Finalmente, viendo las circunstancias y la imposibilidad de tomar el puerto, el 25 de julio de 1797 Nelson oficializa su rendición, la cual se produce con todos los honores (Ferreiro, M.A. 2017) (Díaz Villanueva, F; 2021). Tal como pasaría en el primer enfrentamiento con los ingleses, tras la revisión de la literatura sobre los hechos acaecidos en el puerto de Santa Cruz, no se hace una alusión más directa hacia en

castillo de San Juan Bautista, pero igualmente esta fortificación, protagonizó un papel importante en la defensa de Santa Cruz de Tenerife y en las batallas e intentos de conquistas que esta sufrió.

Por último señalar que el escudo del municipio está representado el castillo de San Juan de Bautista, junto con el de San Cristóbal y el castillo de Paso alto (los 3 castillos), además, se aprecia en el centro la cruz de Santiago dado que la conquista del municipio fue llevada a cabo por el hidalgo y conquistador Alonso Fernández de Lugo el cual pertenecía a la orden de Santiago de Compostela, también se representa por medio de 4 anclas los antiguos puertos de Santa Cruz y el pico del Teide en su parte superior, todo el escudo se encuentra rodeado de una franja ovalada azulada que hace alusión al mar y además, se representan 3 cabezas de leones cuyo significado corresponde a los 3 almirantes y comandantes ingleses que intentaron tomar el puerto, precisamente la cruz de Santiago atraviesa la cabeza del león que figuradamente representa al almirante Nelson (Díaz Villanueva, F. 2021) ;



Figura 13: Imagen de la bandera de Santa Cruz de Tenerife, tomado de la página web Wikipedia, consultado el día 11/03/2024.

3.2.4. Restauración y conservación

En la actualidad, el castillo de San Juan de Bautista se encuentra en buenas condiciones de conservación y es considerado de hecho, el castillo mejor conservado de la isla de Tenerife. Si es cierto que, durante el trabajo de campo de este proyecto final de master, donde se realizaron visitas con acceso al interior de mismo, ya que se encuentra cerrado al público, es notoria la presencia de bastante suciedad y excrementos de animales. También se puede apreciar en su fachada trasera que da directamente hacia el mar, como se refleja en su parapeto exterior el contorno o silueta dibujada por el continuo oleaje, disponiendo en la superficie de machas por humedades, suciedad y productos cristalino de origen salino. De resto, no se aprecia ninguna vulnerabilidad estructural o funcional en sus instalaciones.



Figura 14: Imagen del castillo de San Juan Bautista, de realización propia.

3.2.5. Impacto cultural y turístico.

Como comentábamos, el castillo se encuentra cerrado actualmente, aun teniendo su estructura en perfectas condiciones de conservación, no obstante, su emplazamiento se encuentra debidamente reformado y adecuado, localizado este entre el auditorio Adam Martín y el parque marítimo Cesar Manrique con lo que representa un punto de interés turístico y de obligado paso si se visita esta área de la ciudad. Si es cierto que en el año 1948, el recinto fue cedido al cabildo de Tenerife y se transformó en un museo militar, pero debido a varios incidentes y hurtos, fue devuelto al ayuntamiento de Santa Cruz en 1982 que lo mantiene cerrado al público. Si bien el lugar se encuentra en perfecto estado de conservación, no se ha establecido ningún plan específico para reutilizar su espacio, cabe destacar que cada 25 de julio en el municipio se celebra, a través de la asociación amigos tertulianos del 25 julio una representación de la batalla de 1797 del almirante Horacio Nelson frente a las costas de Tenerife, utilizando este enclave como parte de la representación bélica.

3.3. La casa de la Pólvora.

Justo en las proximidades del castillo de San Juan Bautista se encuentra una singular construcción, de importancia histórica y arqueológica denominada casa de la Pólvora, se trata de una edificación de planta rectangular de 10x30 metros, de un nivel y con una cubierta en forma hiperbólica o abovedada apoyada en los muros perimetrales con refuerzo de contrafuertes en todo su perímetro lateral. Fue proyectada en 1756 por el ingeniero Francisco La Pierre a fin de disponer dentro de las fortificaciones y amurallamientos del municipio costero un lugar donde almacenar la pólvora empleada en la defensa de la población.

Este ingeniero militar, nacido en Lyon entre 1685 y 1690, ingresó al ejército a una temprana edad, destacando por sus cualidades y atributos, realizó sus estudios en la academia de matemáticas de Barcelona, igual como lo habría hecho Antonio Riviere. En 1740, fue encargado por su majestad el rey a realizar un plano de las costas de Santa Cruz de Tenerife, además de la diseñar y proyectar nuevos elementos para las defensas costeras, en este caso, el ingeniero Francisco la Pierre traza un plano que, aunque no se encuentra firmado por él, varios autores e historiadores señalan su autoría y donde ya situaba el lugar o zona que ocuparía esta edificación (Gerencia Municipal de urbanismo de Santa Cruz de Tenerife, 2020). La casa de la Pólvora se encontraba situada en el camino de Regla o del Calvario, antiguo nombre conocido de la que hoy es la Avenida de la Constitución.

Su construcción comenzaría en el año 1756 y finalizaría 2 años más tardes, con un costo total de 6.000 pesos. Posteriormente, dada la situación de inestabilidad política y

las continuas incursiones de barcos enemigos en las costas, durante el mandato del comandante general Joaquín Jose Ibáñez Cuevas, se construyó un espaldón de resguardo que bordeaba el edificio con la finalidad de protegerlo del fuego enemigo y ocultarlo a la visión y la acción del mar (Díaz Lorenzo, J.C, 2023).



Figura 15: Plano costa de Santa Cruz, realizado por Francisco La Pierre, tomado de Santa Cruz de Tenerife en el siglo XVIII.

Su uso principal consistía en almacén para la pólvora y munición de las fortificaciones de la zona. Si bien, se quiso diseñar otro almacén para sustituir a este en una finca llamada el Perú, a las afueras de Santa Cruz pues se juzgaba inadecuado el lugar del emplazamiento tan próximo a la mar y al fuego enemigo (Díaz Lorenzo, J.C, 2023). Según un informe de la comandancia de ingenieros de 1843, recogido en el artículo La Casa de la Pólvora de Santa Cruz de Tenerife (1758) redactado por Juan Carlos Díaz Lorenzo, dice: “se conserva en él la pólvora perfectamente sin humedad no obstante su proximidad al mar, tiene pararrayos y éste y el almacén están en buen estado.

Para cubrirlo de los fuegos del mar, se construyeron en dos de sus lados un grueso y elevado espaldón de tierra sostenido por dos gruesos muros que le sirven de cerca, siendo lo restante de ésta un simple muro de piedra y barro y de poca altura; y como el lado menor en que está la puerta y parte del S. estaban amenazando ruina, se levantó el año pasado desde cimiento toda la pared ruinosa y lo restante del lado mayor necesita igual reparación, levantándolo hasta la altura de lo nuevamente hecho. El terraplén del espaldón había tenido el asiento natural de las tierras y las aguas filtrándose por los muros habían desprendido su encalado exterior, por cuya razón se rellenó de tierras y después bien apisonadas, se empedró dándole bastante declive para que las lluvias derramen por los imbornales á la parte exterior, y se encalaron y encararon los muros en la parte que más lo necesitaban. El espacio entre la cerca y el almacén no estaba dispuesto para que pudiesen salir las aguas, y se regularizó el terreno con piedra á propósito para este sitio todo el camino que han de llevar las aguas hasta su salida por el imbornal” (Díaz Lorenzo, J.C, 2023).

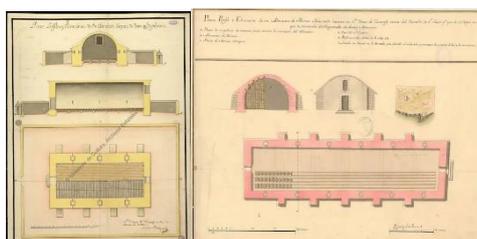


Figura 16: Planos de la Casa de La Pólvara, tomado de La Casa de la Pólvara de Santa Cruz de Tenerife (1758).

3.4 Conclusiones.

Las edificaciones históricas, como el Castillo de San Juan Bautista y la Casa de la Pólvara en Santa Cruz de Tenerife, son testimonios tangibles de la influencia y la estrategia militar española tras la colonización. Estas construcciones reflejan la integración de técnicas arquitectónicas hispánicas con materiales locales, simbolizando el encuentro entre culturas y la adaptación a nuevas condiciones geográficas. Originadas en respuesta a la necesidad de proteger las islas, estas fortificaciones resguardaban tanto la población como las rutas comerciales cruciales para el Imperio Español, siendo esenciales durante periodos de conflicto con potencias extranjeras y piratas.

Su importancia radica no solo en su función defensiva, sino también en su valor arqueológico, arquitectónico y cultural, ofreciendo una ventana al pasado y contribuyendo al patrimonio cultural de Canarias. Preservar y documentar estas edificaciones es crucial para la memoria histórica y cultural de la región, garantizando que su legado perdure. La documentación mediante modelos digitales de superficie, como los generados a partir de nubes de puntos y tecnología láser, permite un registro preciso y detallado de estos bienes patrimoniales, adaptándose a diferentes niveles de detalle según el objetivo del estudio.

La creación de modelos paramétricos proporciona una herramienta valiosa para la conservación y restauración de estas estructuras, facilitando el acceso a información detallada y precisa que puede ser utilizada para investigaciones futuras, tareas de mantenimiento y la apreciación pública del patrimonio cultural. Además, estos modelos digitales aseguran que las edificaciones sean accesibles y apreciadas por las generaciones venideras, perpetuando su relevancia histórica y cultural en la conciencia colectiva.

4 TRABAJO EXPERIMENTAL

Inicialmente se realizó una investigación en soporte digital y físico de diversas fuentes bibliográficas sobre ambas edificaciones, con el fin de comprender su relevancia histórica y cultural dentro del contexto del patrimonio arquitectónico, recurriendo a documentos como su grado de protección, hasta papeles históricos accesibles de forma digital y física a través de la sección de historia de la Biblioteca de Tenerife Espacio de las Artes (TEA).

Esta investigación preliminar permitió reunir una base de conocimientos sólida sobre las edificaciones objeto de estudio, proporcionando un contexto fundamental para el desarrollo del proyecto. Se identificaron aspectos críticos de la historia y la arquitectura de La Casa de la Pólvora y El Castillo de San Juan Bautista, lo que facilitó la planificación de las etapas subsecuentes del trabajo. La recopilación y análisis de esta información fueron esenciales para establecer un marco teórico y metodológico robusto que respaldara el enfoque técnico y práctico del proyecto.

En conjunto con la tutora de este trabajo se establecieron las necesidades y expectativas a satisfacer por el trabajo, definiendo un objetivo general que guiará las valoraciones y puestas en común subsiguientes, se discutieron posibles metodologías de abordaje, sus ventajas y limitaciones, así como se acordó un plan de seguimiento.

A partir de esta colaboración, se delinearon estrategias específicas para abordar los desafíos técnicos y logísticos inherentes a la digitalización y modelado 3D de edificaciones patrimoniales. Se consideraron diversos enfoques metodológicos, evaluando sus potenciales beneficios y restricciones para seleccionar el más adecuado. Este proceso de planificación incluyó la definición de cronogramas, asignación de recursos y establecimiento de hitos para monitorear el progreso del proyecto y asegurar la consecución de los objetivos establecidos.

Este plan de seguimiento permitió una ejecución ordenada y eficiente de las actividades, garantizando que cada fase del proyecto se desarrollara conforme a lo previsto. La claridad en los objetivos y la metodología adoptada fomentaron una implementación coherente y coordinada, permitiendo ajustes oportunos en respuesta a cualquier eventualidad. Este enfoque estructurado y colaborativo fue fundamental para el éxito del proyecto, asegurando que cada etapa contribuyera de manera efectiva al logro de los resultados deseados.

4.1. Trabajo de Campo

Se realizó una visita inicial, en la cual se observó el exterior de las estructuras, se detallaron los materiales y se discutieron consideraciones a tomar en cuenta para la realización del escaneado, con el fin de conseguir la mayor cantidad de detalle posible, en la menor cantidad de estacionamientos del equipo; previendo de forma razonable cómo influiría en la toma de datos la presencia de vegetación que rodea las edificaciones, en especial la casa de la pólvora, y de qué forma se podría obtener la información que estaba parcialmente oculta por el follaje de éstas. Figura 17.



Figura 17: Fotografías realizadas durante la visita inicial (elaboración propia, 18/02/24)

La observación detallada del exterior de las estructuras fue fundamental para identificar los puntos críticos que requerían una atención especial durante el escaneado. Se evaluó cómo la vegetación y otros elementos del entorno podrían afectar la precisión de los datos capturados. Esta fase permitió diseñar estrategias específicas para minimizar las sombras y obtener una cobertura completa, garantizando que los modelos finales fueran lo más fieles posible a la realidad. Asimismo, se discutieron técnicas para abordar áreas de difícil acceso, asegurando que cada aspecto relevante de las edificaciones fuera debidamente documentado.

El acceso limitado a ciertas áreas requirió una planificación cuidadosa del orden de realización para maximizar la eficacia del escaneo 3D e incluso poner en valor la calidad de la información a obtener frente la dificultad que supondría conseguirla.

Dada la complejidad arquitectónica y las restricciones físicas de las estructuras, fue fundamental establecer un plan de escaneo que priorizara la calidad de los datos obtenidos. Se analizaron diferentes enfoques para abordar las zonas inaccesibles, evaluando el uso de herramientas adicionales y la reubicación estratégica del equipo. Esta planificación permitió anticipar y mitigar posibles dificultades, asegurando que el proceso de escaneo se desarrollara de manera eficiente y efectiva, maximizando el rendimiento del equipo y la precisión de los resultados.

Igualmente se consideraron limitaciones de carácter logístico y espacial, como la incapacidad del equipo de capturar la totalidad de la cubierta de la casa de la pólvora, siendo necesario un medio auxiliar como grúa o escalera que a la vez permitiera realizar el estacionamiento del equipo de forma estable y en condiciones de seguridad; En

cuanto al castillo negro se discutió la forma en que se lograría capturar la parte posterior de éste, inaccesible debido a su proximidad al mar, valorando su captura desde la plataforma peatonal y el muelle alejado en su zona posterior, que al hallarse a cierta distancia condicionaría la calidad de los puntos obtenidos.

La consideración de estas limitaciones logísticas y espaciales fue vital para asegurar que el proceso de escaneo se ejecutara sin contratiempos. Se planificó el uso de equipos auxiliares para alcanzar zonas elevadas o de difícil acceso, garantizando tanto la seguridad del personal como la estabilidad del escáner. Para el Castillo de San Juan Bautista, se evaluaron distintas posiciones estratégicas para el escaneo, asegurando que se capturaran datos de alta calidad incluso desde distancias significativas. Esta planificación detallada permitió prever y solucionar posibles problemas antes de iniciar el trabajo de campo, optimizando los recursos disponibles.

Una vez recopilada una cantidad de información bibliográfica considerable y habiendo observado y valorado de igual forma las oportunidades como las limitaciones, se estableció un cronograma para la realización del escaneado láser, tomando en cuenta condicionantes como la climatología y la concurrencia del sitio, lo que podría afectar o dificultar la obtención de los datos visuales y espaciales.

El cronograma diseñado tuvo en cuenta factores externos que podían influir en el proceso de escaneo, como las condiciones meteorológicas y la afluencia de personas en los sitios históricos. Se eligieron momentos óptimos para realizar los escaneos, minimizando interrupciones y asegurando la mayor calidad posible de los datos capturados. Este enfoque proactivo permitió que el equipo pudiera trabajar de manera eficiente, adaptándose a las condiciones cambiantes y garantizando que los objetivos del proyecto se cumplieran en los plazos establecidos.

El trabajo de campo realizado fue adecuado por varias razones fundamentales, en primer lugar, la planificación y la atención a los detalles críticos durante la fase de observación inicial permitieron identificar y abordar los desafíos logísticos y técnicos de manera anticipada. Esto incluyó la consideración de la vegetación circundante, los obstáculos físicos y las restricciones de acceso, lo cual garantizó que cada aspecto relevante de las edificaciones fuera debidamente documentado; la preparación minuciosa aseguró que el escaneo se realizara de manera eficiente y con alta precisión, maximizando la calidad de los datos obtenidos.

Además, el uso de tecnologías avanzadas como el escáner Leica BLK 360 y el software Cyclone 3DRR fue esencial para capturar datos de alta precisión en un corto período de tiempo. Estas herramientas permitieron una documentación detallada y rápida de las estructuras, minimizando las interrupciones y los riesgos asociados con el trabajo en sitios patrimoniales. La capacidad del equipo para adaptar el flujo de trabajo

y utilizar medios auxiliares cuando fue necesario demostró una flexibilidad y una capacidad de respuesta vitales para superar las limitaciones logísticas y espaciales inherentes a los sitios escaneados.

Para futuros trabajos similares, con el fin de mejorar un trabajo de campo como éste, resulta interesante valorar la implementación de tecnologías complementarias como el uso de drones equipados con cámaras de alta resolución podría haber facilitado la captura de áreas inaccesibles, mejorando la precisión del escaneo. Asimismo, la integración de sensores adicionales para capturar datos ambientales, como la humedad y la temperatura, podría haber proporcionado información sobre las condiciones de conservación de las estructuras. Finalmente, la colaboración con expertos en conservación durante el trabajo de campo podría haber enriquecido el proceso con conocimientos específicos sobre las técnicas y materiales de construcción históricos, asegurando una documentación aún más completa y precisa.

4.2. Proceso de Escaneado Láser

El escaneo se llevó a cabo mediante el dispositivo BLK360 de Leica (Figura 18), que consiste en una carcasa que contiene tres cámaras calibradas, una cámara infrarroja y un láser integrado de clase 1, de acuerdo a la normativa estadounidense IEC 60825-1 (2014-05) y la norma armonizada UNE-EN 60825-1; este genera un rayo invisible dirigido a un espejo de rotación, que al proyectarse sobre una superficie registra datos espaciales y visuales, con un rango de precisión de 4 mm hasta 10 metros y 7 mm hasta 20 metros de distancia.



Figura 18: Fotografía del proceso de escaneo, con el dispositivo visible (elaboración propia, 29/02/24)

La elección del BLK360 representó una ventaja técnica debido a su capacidad para capturar datos con alta precisión y rapidez, lo que permite minimizar el tiempo de trabajo en campo y recopilar una mayor cantidad de información de sitios patrimoniales, más allá del aspecto visual, como por ejemplo sus dimensiones. Además, las cámaras calibradas y el láser infrarrojo permiten obtener tanto imágenes térmicas como visuales,

proporcionando un conjunto de datos completo y detallado para su posterior análisis. Esta combinación de tecnologías asegura que se obtengan representaciones fieles de las estructuras, esenciales para un modelado 3D preciso y confiable.

Se sustenta sobre un trípode que debe estabilizarse sobre un suelo nivelado, posicionando el aparato en su base y ajustarse adecuadamente para garantizar que el dispositivo se encuentre completamente estacionado y sea operativo, esto es un condicionante de carácter logístico que se debe tomar en cuenta a la hora de planificar la toma de datos, las imágenes obtenidas son panorámicas y adicionalmente térmicas.

El uso de un trípode nivelado es fundamental para asegurar la estabilidad del escáner y la calidad de los datos capturados. Un posicionamiento adecuado del aparato reduce el riesgo de errores en la medición y garantiza que las imágenes panorámicas y térmicas sean lo más precisas posible. Este enfoque logístico asegura que cada estacionamiento del equipo se realice de manera óptima, maximizando la calidad y utilidad de los datos obtenidos para la creación de modelos 3D detallados y precisos.

La capacidad del láser para capturar información puede verse afectada en superficies altamente reflectantes, de alta absorción y translúcidas, así como por factores ambientales de lluvia, nieve, neblina, iluminación del sol, a contraluz o bajo sombra. También, puede resultar empañada su estructura interna por cambios bruscos de temperatura, huellas dactilares o la acumulación de polvo y humedad.

Estas consideraciones ambientales y de superficie son críticas para la planificación del escaneo. Al identificar y mitigar estos factores, se puede asegurar que los datos obtenidos sean de alta calidad. Por ejemplo, evitar la escanear en condiciones meteorológicas adversas y limpiar regularmente el equipo minimiza la pérdida de datos y errores en las mediciones. Esta atención al detalle es esencial para garantizar que las nubes de puntos sean precisas y completas, proporcionando una base sólida para el procesamiento posterior en Cyclone 3DRR y Blender

La gestión de los estacionamientos realizados y las nubes de puntos asociados a cada uno se realiza a través de la aplicación del aparato, que al emitir una señal Wifi permite la conexión de un dispositivo móvil que cuente con Cyclone Field 360, el software de campo que permite registrar, capturar y examinar la información escaneada.

El uso de Cyclone Field 360 (Figura 19) facilita el manejo eficiente de los datos en campo, permitiendo una revisión inmediata de cada estacionamiento y asegurando que se obtengan los datos necesarios antes de pasar al siguiente. Esta capacidad de revisión en tiempo real es esencial para identificar y corregir posibles errores sobre la marcha, evitando la necesidad de regresar al sitio para escaneos adicionales. Así, se optimiza el uso del tiempo y se mejora la eficiencia del proceso de escaneo



Figura 19: Fotografía de la Tablet a través de la cual se gestionaba el inicio y alineación de los escaneados con Cyclone Field 360 (elaboración propia, 29/02/24)

La duración del escaneado depende del nivel de detalle deseado de la nube de puntos en función de la capacidad del escáner, que en este caso es especialmente susceptible a condiciones climatológicas que disminuyan la visibilidad en los entornos exteriores, por lo que se optó por el tipo de barrido más prolongado que capturara la mayor cantidad de puntos posibles, en este caso cada estacionamiento genera 65 millones de puntos.

Optar por un barrido prolongado asegura que se capture una cantidad máxima de datos, lo cual es esencial para crear modelos detallados y precisos. Sin embargo, esta opción también implica un mayor consumo de espacio de almacenamiento y un tiempo de procesamiento más largo; el objetivo de realizar este tipo de barrido láser era alinear los recursos técnicos disponibles con el compromiso consciente de priorizar la calidad y el detalle de los datos frente a las limitaciones logísticas, asegurando que los modelos resultantes sean lo más completos y precisos posibles para luego ser de utilidad durante el proceso de modelado, en la Figura 20 se observa un escaneo realizado en el interior del Castillo.



Figura 20: Fotografía del interior del Castillo de San Juan Bautista durante el proceso de escaneado (elaboración propia, 01/03/24)

Esto tiene una repercusión directa en la cantidad de espacio que requiere generar la nube de puntos, lo que introduce una limitación adicional y es la capacidad

de almacenamiento del equipo de escaneo, la cual es suficiente para 100 estacionamientos, dependiendo de la densidad de éstos.

La capacidad de almacenamiento del equipo es una consideración importante, ya que limita el número de escaneos que se pueden realizar antes de transferir los datos a un ordenador. Planificar adecuadamente la cantidad de datos a capturar y gestionar eficientemente el almacenamiento garantiza que el proceso de escaneo se desarrolle sin interrupciones. Esta planificación incluye la transferencia regular de datos y la eliminación de puntos redundantes o innecesarios para maximizar el uso del espacio disponible.

Una vez se realiza un estacionamiento, este se puede examinar en el dispositivo portátil, en su proyección en planta como en su vista tridimensional.

La capacidad de examinar cada estacionamiento en tiempo real permite una evaluación inmediata de la calidad y precisión de los datos capturados. Esta revisión instantánea facilita la identificación de posibles errores o áreas que necesiten un escaneo adicional, asegurando que cada punto de datos se capture de manera óptima. Además, esta función permite ajustar la estrategia de escaneo en tiempo real, mejorando la eficiencia y efectividad del proceso

El siguiente estacionamiento debe realizarse próximo al anterior y en un lugar que haya sido visible por el escaneo previo, de esta forma se posibilita la alineación de los puntos capturados en uno con respecto al otro, este proceso puede realizarse manualmente rotando o desplazando los puntos de ese barrido con respecto a otro, puede realizarse automáticamente o combinando ambas maneras, sin embargo no está exento de errores ya que depende de la facilidad con la cual se consiga la alineación y la capacidad del equipo para detectar los puntos coincidentes.

La alineación precisa de los puntos es decisiva para construir una nube de puntos coherente y continua. Realizar los estacionamientos en lugares visibles desde los escaneos anteriores facilita esta tarea y minimiza la probabilidad de errores de alineación. Sin embargo, la alineación manual y automática tiene sus propios desafíos y limitaciones. La combinación de ambas técnicas proporciona una mayor flexibilidad y permite corregir errores que pueden surgir durante el proceso de escaneo

En los casos en que no fue posible realizar una alineación correcta, se decidió efectuar un escaneo en una posición intermedia, de modo que aumentara la cantidad de puntos reconocibles por el software y facilitar con ello que la alineación se realizara automáticamente.

La decisión de realizar escaneos adicionales en posiciones intermedias fue una decisión proactiva que buscaba asegurar la calidad de los datos; puesto que, al aumentar el número de puntos reconocibles, se facilita la alineación automática,

reduciendo la carga de trabajo manual y mejorando la coherencia de la nube de puntos. Este enfoque asegura que cada área de la estructura esté bien documentada, siendo esto esencial para la precisión y detalle del modelo final (Figura 21).

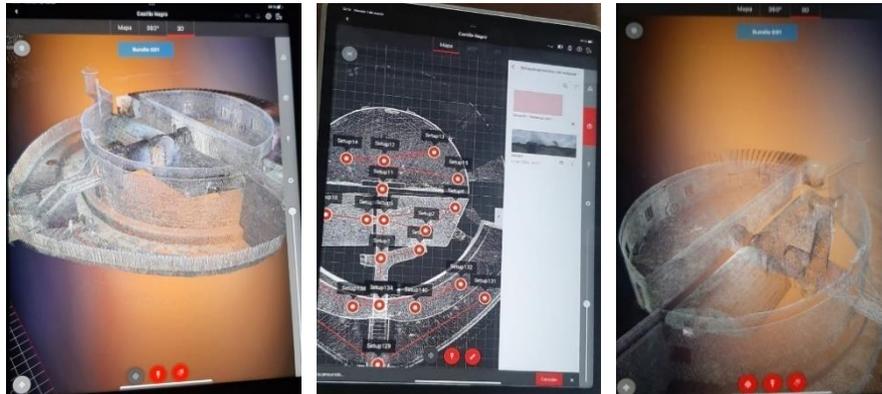


Figura 21: Fotografía de la Tablet a través de la cual era posible visualizar en planta y vista tridimensional el proceso con Cyclone Field 360 (elaboración propia, 01/03/24)

4.3. Procesamiento de la Nube de Puntos en Cyclone 3DRR

Una vez obtenidos todos los puntos, es posible exportar en conjunto toda la nube de puntos conectando el aparato a un ordenador y transfiriendo el archivo, pudiendo ser de forma separada o conjunta, en formatos e57 y lgs.

La exportación de la nube de puntos en formatos compatibles como e57 y lgs es esencial para garantizar la interoperabilidad con otros software de procesamiento y modelado. Estos formatos son ampliamente utilizados y permiten una transferencia de datos eficiente y sin pérdida de información. Esta capacidad de exportación facilita la integración de los datos escaneados en diversos flujos de trabajo, asegurando que la información capturada se utilice de manera efectiva en las etapas posteriores del proyecto.

A partir de estos archivos y mediante el uso del software Cyclone 3DR, se generó una malla a partir de la nube de puntos. Este proceso consiste en la triangulación de los puntos mediante la creación de polígonos (usualmente triángulos) que conectan los puntos adyacentes, formando una superficie continua. Cada polígono define una cara de la malla, y las aristas de estos polígonos representan las conexiones entre los puntos de la nube. De esta manera, se logra rellenar el espacio entre los puntos con elementos superficiales, sin generar volumen, resultando en una representación precisa de la superficie del objeto escaneado (Figura 22).

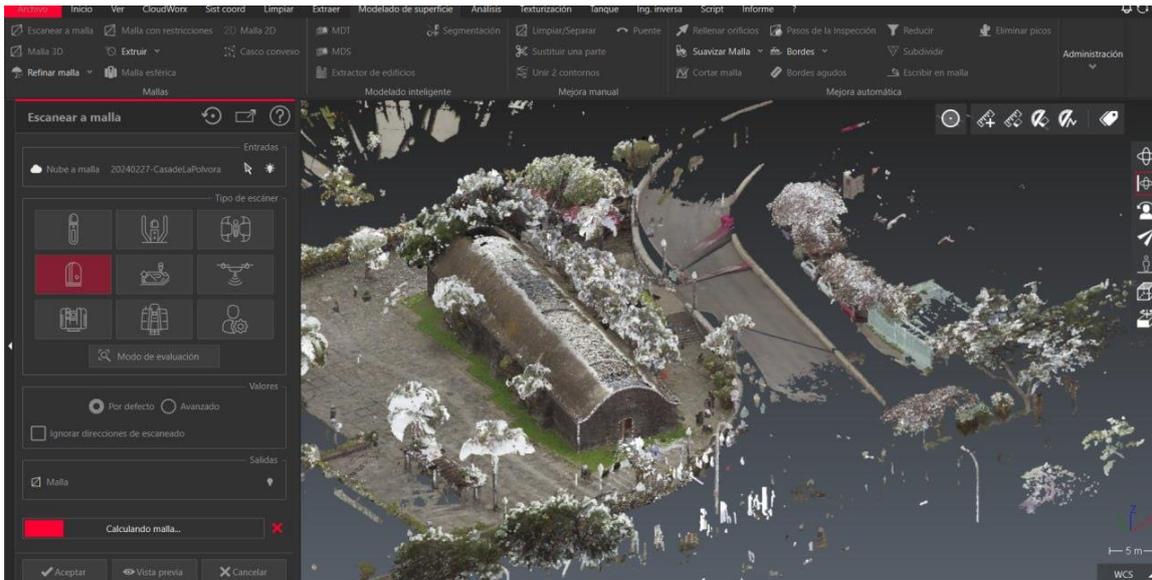


Figura 22: Captura de pantalla del software Cyclone 3DR, donde se observa la malla (elaboración propia, 01/03/24)

La generación de mallas mediante triangulación es un paso crítico en el proceso de creación de modelos 3D. Este método permite convertir la nube de puntos en una superficie continua que representa con precisión las formas y características de las estructuras escaneadas. La triangulación asegura que los modelos sean detallados y fieles a la realidad, facilitando el análisis y la manipulación posterior en software de modelado como Blender. Este enfoque permite capturar y representar detalles finos que son esenciales para la conservación y restauración del patrimonio.

Una vez generada la malla, esta se exportó utilizando una de las extensiones ofrecidas por el software Cyclone 3DRR. Se compararon estos formatos de exportación con los formatos de importación admitidos por Blender, el siguiente software de modelado a utilizar. Se determinó que ambos programas son compatibles con la extensión ".obj".

La extensión de archivo ".obj" es un formato abierto y comúnmente utilizado por aplicaciones de visualización gráfica 3D. Este formato es simple y representa únicamente la geometría tridimensional, incluyendo la posición de cada vértice, así como la información visual asociada al mapeo UV, como color y textura. Además, el formato OBJ puede almacenar información de normales, tanto para las caras de los polígonos como para los vértices.

El uso del formato ".obj" es ventajoso debido a su amplia compatibilidad y capacidad para representar con precisión la geometría tridimensional y los detalles visuales asociados. Este formato permite una transición fluida entre Cyclone 3DR y Blender, asegurando que la integridad de los datos se mantenga durante el proceso de exportación e importación. La compatibilidad del formato ".obj" facilita la manipulación y

edición de las mallas en Blender, optimizando el flujo de trabajo y garantizando que los modelos finales sean detallados y precisos.

Una vez importado el archivo de la malla al software de modelado, se editó la misma para eliminar cualquier polígono que no fuera necesario para la realización del modelo, como por ejemplo peatones en movimiento captados por el equipo, automóviles, entre otros, como se ve en la Figura 23.

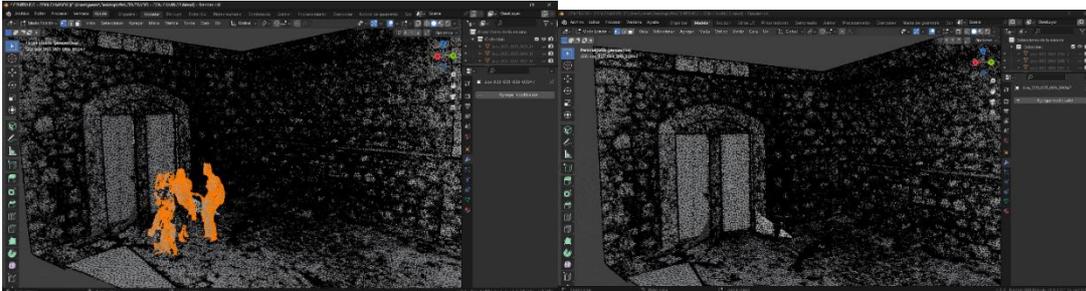


Figura 23: Captura de pantalla del software Blender, durante el proceso de edición de los vértices que componen la malla (elaboración propia, 01/03/24)

La edición de la malla en Blender es un paso crítico para asegurar que el modelo final sea preciso y limpio. Al eliminar elementos innecesarios, se mejora la calidad y la usabilidad del modelo. Este proceso de refinamiento permite enfocarse en los detalles arquitectónicos relevantes, eliminando ruido y distracciones que podrían afectar el análisis y la visualización. La capacidad de Blender para manejar estos ajustes de manera eficiente es una de las razones por las que se eligió este software para el modelado final, nuevamente visible en la Figura 24.

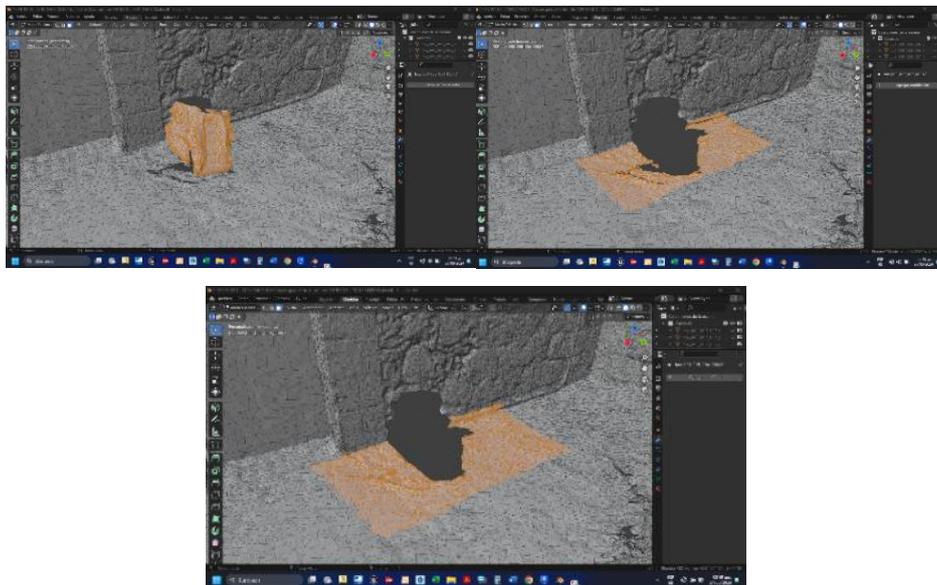


Figura 24: Captura de pantalla del software Blender, durante el proceso de edición de los vértices no relacionados a las edificaciones en la malla (elaboración propia, 01/03/24)

También es importante destacar que se valoraron y se realizaron intentos por integrar otros softwares de modelado 3D en el flujo de trabajo con el propósito de facilitar o agilizar procesos que resultaban más complejos en Blender, como por ejemplo la

segmentación de la malla, sin embargo, se descartó su uso y resultados, al presentar una pérdida de información considerable durante el proceso de exportación e importación, así como aumentaba la complejidad del flujo de trabajo, por lo que se optó por realizar todos los procesos de modelado en Blender, aunque esto implicara un mayor tiempo de aprendizaje y familiarización con la interfaz, pero obteniendo resultados más eficientes y un flujo de trabajo simplificado.

La decisión de centralizar el modelado en Blender, a pesar de las complejidades iniciales de aprendizaje, se basó en la eficiencia a largo plazo y la calidad de los resultados obtenidos. La consolidación del flujo de trabajo en una única plataforma minimizó la pérdida de datos y redujo la complejidad del proceso, permitiendo un manejo más efectivo y una mejor integración de todas las etapas del proyecto. Esta estrategia resultó en un modelo más cohesivo y preciso, alineado con los objetivos del trabajo y las expectativas de calidad y detalle requeridas.

4.4. Modelado en Blender

El proceso de modelado de Blender inició por la importación de los distintos archivos en la extensión “.obj” que componen la malla, y que anteriormente fue exportada desde el software Cyclone 3DR; cada uno de estos archivos contiene parte de la malla original que al ser exportada se divide en cuadrícula, sin distinguir los elementos representados visualmente en la malla, es decir una cuadrícula puede contener tanto parte del edificio como del entorno, incluyendo el suelo o vegetación existente, en polígonos continuos e interconectados.

Para asegurar una transición fluida de Cyclone 3DR a Blender, se realizó una revisión minuciosa de cada archivo importado para garantizar que no hubiera pérdida de datos ni errores en la conversión. Esta etapa inicial fue fundamental para mantener la integridad de la información y preparar el terreno para una segmentación precisa y detallada. Además, se implementaron técnicas de preprocesamiento para organizar y categorizar los elementos visuales, facilitando así el trabajo posterior de modelado y edición en Blender.

Para facilitar la visualización de la malla, sectorizar la información visual y ocultar aquella que no resultaba de interés para el modelado inicial, se inició por segmentar los polígonos y los vértices que los componen, en función de lo que representaban visualmente (muros, cubiertas, pilares, contrafuertes, ornamentación...) entre otros. Esto se realizó en el entorno de edición de Blender, seleccionando los vértices deseados y separándolo de la malla total, evidenciado en la Figura 25.

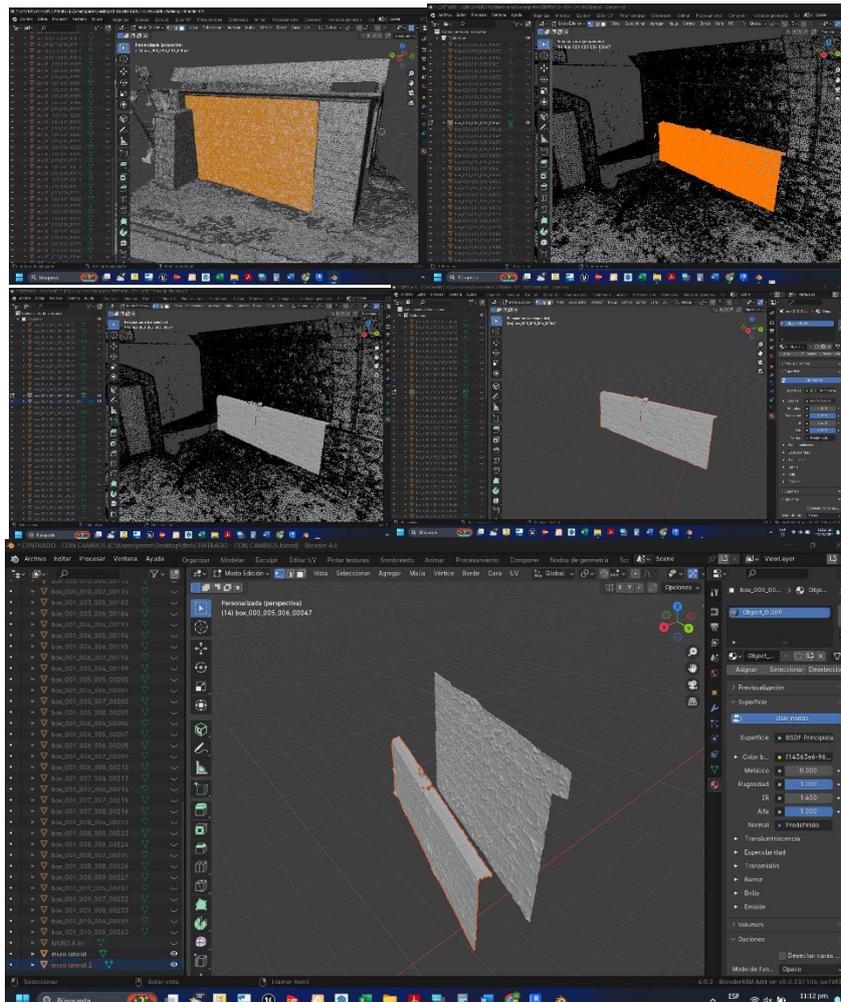


Figura 25: Captura de pantalla del software Blender, durante el proceso de edición de los vértices que componen la malla (elaboración propia)

La segmentación de los polígonos y vértices permitió una organización más eficiente de la malla, dividiendo claramente las diferentes partes del edificio y su entorno. Este proceso facilitó la eliminación de elementos no deseados y permitió un enfoque más preciso en las áreas de interés. La capacidad de Blender para manejar grandes conjuntos de datos y su flexibilidad en la edición de mallas complejas permitieron llevar a cabo esta tarea con éxito.

Una vez sectorizada la información, se realizó un inventario de los elementos constructivos existentes y se clasificaron de acuerdo a la simplicidad de su geometría, en respuesta a la cual se emplearían unas u otras herramientas de Blender, que variarían en el nivel de complejidad, pero que cumplieran con el requisito de representar de la forma más fiel posible la geometría de dicho elemento, evidenciando en la Figura 26.

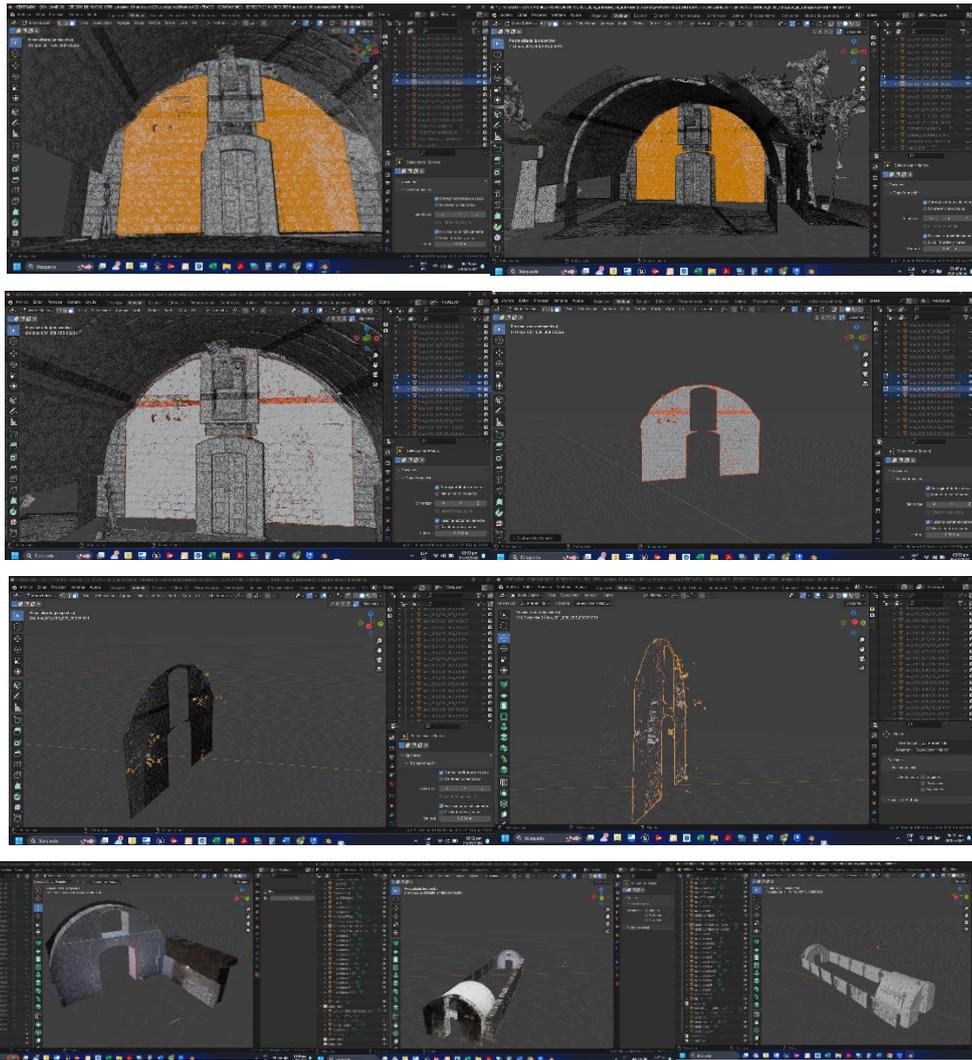


Figura 26: Captura de pantalla del software Blender, durante el proceso de edición de los vértices que componen la malla (elaboración propia)

El inventario detallado de elementos constructivos permitió seleccionar las herramientas más adecuadas para cada tipo de geometría. Para elementos simples, se utilizaron herramientas básicas de modelado, mientras que para geometrías más complejas se aplicaron técnicas avanzadas. Esta clasificación no solo optimizó el proceso de modelado, sino que también aseguró que cada componente se representara con el mayor grado de precisión posible, respetando las características originales de las edificaciones.

Para aquellos elementos más simples, se empleó la herramienta de adición de objetos disponible tanto en el entorno de visualización del objeto, como en el de edición y al cual permite generar sólidos euclidianos como cubos, conos, cilindros y esferas con atributos, escogiendo aquellos similares geoméricamente a los elementos que se deseara representar y cuyas caras fuesen tangentes a la malla que representara dicho objeto, con esto se conseguía inicialmente una similitud superficial y aproximada de las

dimensiones reales del objeto, así como de su posición con respecto a la totalidad de la edificación.

El uso de sólidos euclidianos simplificó el proceso de modelado inicial al proporcionar formas básicas que podían ajustarse rápidamente a las dimensiones y posiciones requeridas. Este enfoque permitió una representación inicial precisa y facilitó los ajustes posteriores necesarios para alcanzar un mayor nivel de detalle. La capacidad de Blender para manejar estos ajustes de manera eficiente fue vital para asegurar que los modelos finales reflejaran fielmente las características geométricas de las estructuras originales, como se observa en la Figura 27.

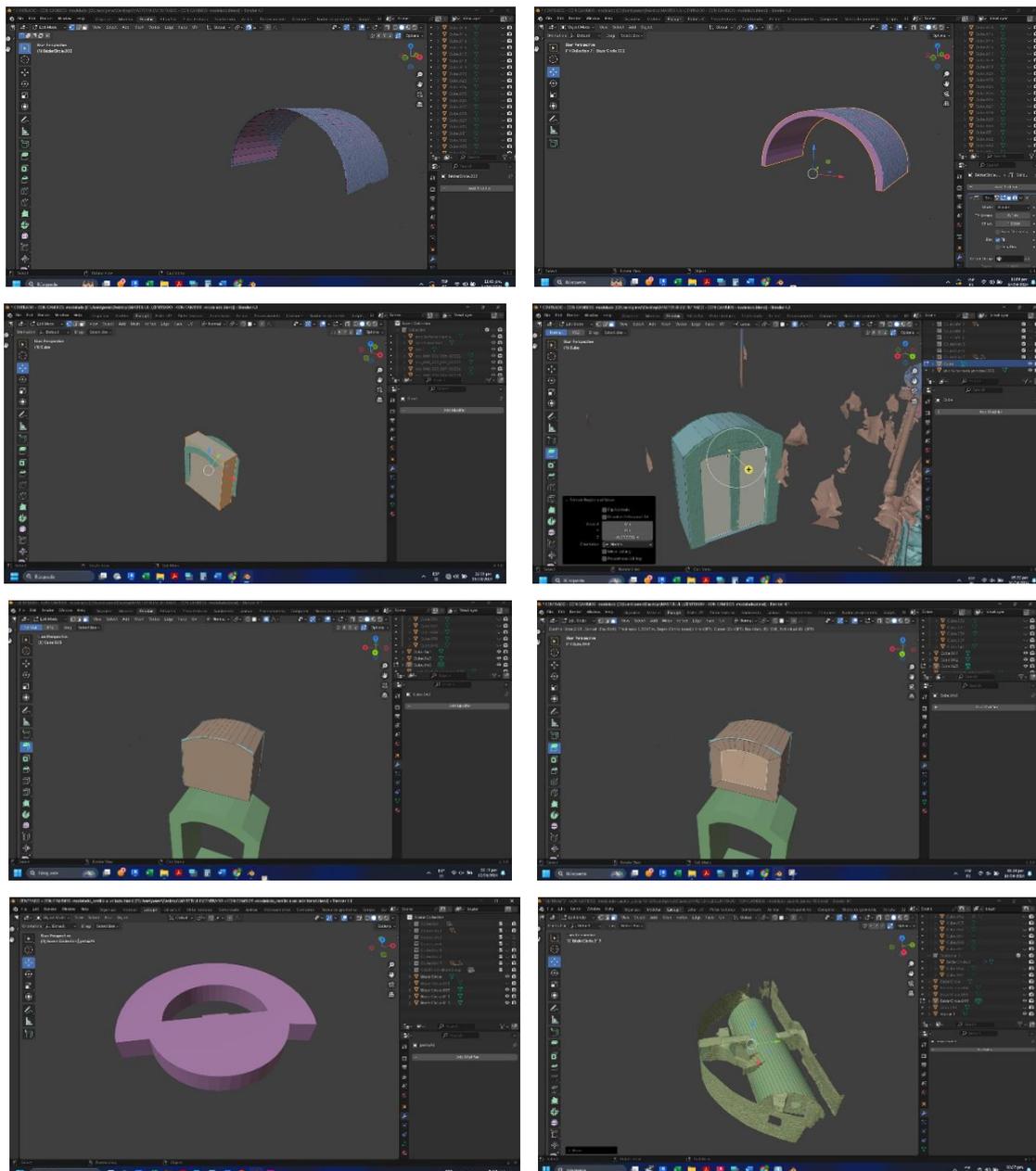


Figura 27: : Captura de pantalla del software Blender, durante el proceso de creación de sólidos (elaboración propia)

Una vez dispuesto el sólido en su ubicación y tamaño aproximado, se seleccionaba y en el entorno de edición se realizan ajustes a sus vértices, aristas y caras para que se aproximaran más a la superficie de la malla, siempre manteniendo una tangencia superficial a los vértices que correspondían al objeto al que se deseaba adaptar el sólido generado, priorizando la aproximación más cercana posible a la altura, anchura y longitud de cada elemento.

Estos ajustes finos permitieron que los sólidos generados se integraran perfectamente con la malla existente, asegurando una representación precisa de cada elemento. La flexibilidad de Blender para manipular vértices, aristas y caras permitió realizar modificaciones detalladas que mejoraron la fidelidad del modelo. Este proceso de refinamiento garantizó que cada componente del edificio se modelara con la máxima precisión, respetando las proporciones y detalles específicos de las estructuras patrimoniales

En el caso de que el sólido adquiriera cierto grado de complejidad en alguna parte de su geometría, se podía incluso generar extrusiones, añadir vértices, desplazar, rotar o girar sus caras y realizar subdivisiones a las ya existentes, modificándose para asimilarse a cualquier detalle singular, ornamentación existente o incluso deformación considerable presente en el elemento, esto se realizó con el fin de que representara fielmente el elemento constructivo a modelar, como se observa en la Figura 28.

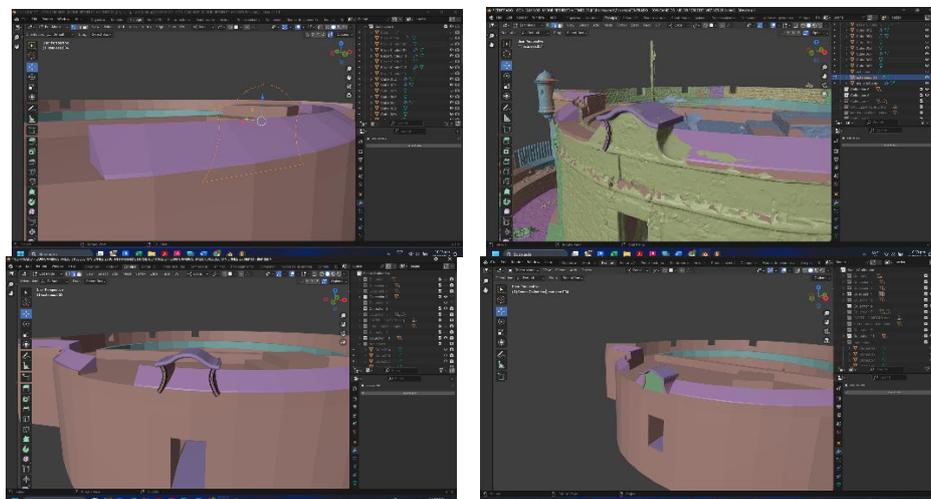


Figura 28: Captura de pantalla del software Blender, durante el proceso de creación de sólidos (elaboración propia)

La capacidad de Blender para realizar extrusiones y subdivisiones permitió abordar la complejidad geométrica de ciertos elementos arquitectónicos. Estas técnicas avanzadas de modelado fueron esenciales para capturar los detalles ornamentales y las deformaciones presentes en las estructuras. La posibilidad de ajustar y modificar los sólidos según las necesidades específicas de cada elemento garantizó que el modelo final fuera una representación precisa y detallada de la realidad.

Para sólidos curvos que no podían derivarse de un sólido euclidiano, se buscó simplificar su edición y modelado abordando su creación a través de la herramienta de adición de curvas en el entorno de visualización de objetos, generando Curvas de Bézier, que en el entorno de edición podían modificar su recorrido desplazando sus vértices sobre un solo eje, para que delinearan el perímetro del elemento constructivo en su proyección en planta, tanto en su cara interior como en la cara exterior, teniendo así dos curvas de Bézier perimetrales, evidenciándose en la Figura 29.

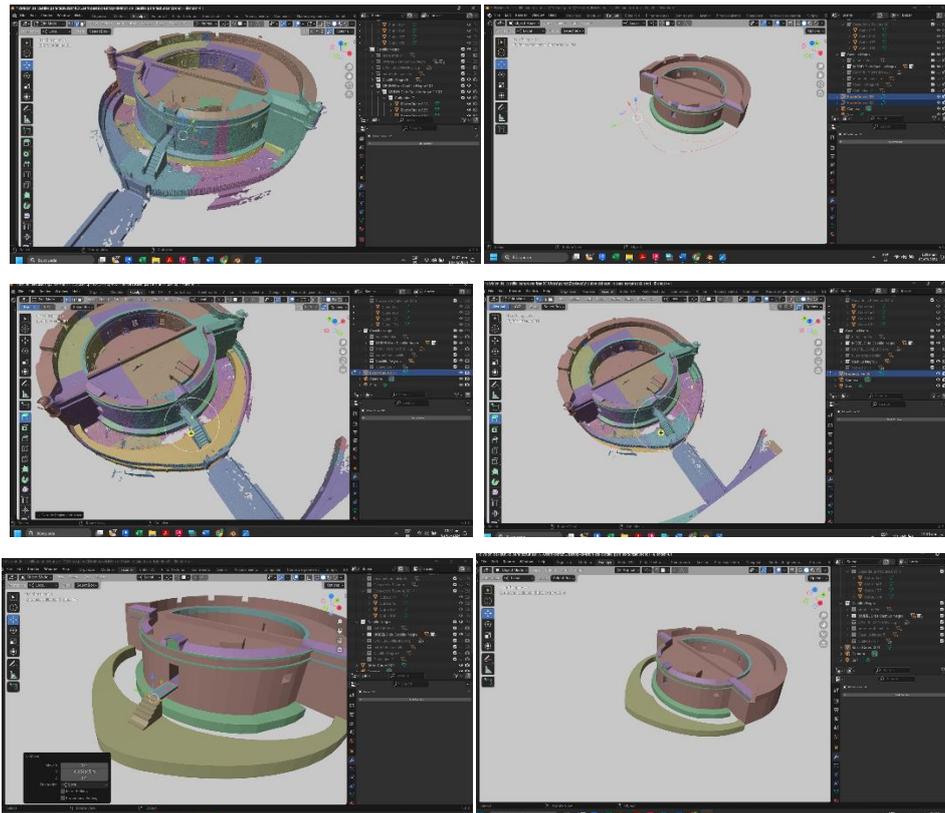


Figura 29: Captura de pantalla del software Blender, durante el proceso de creación de sólidos (elaboración propia)

El uso de Curvas de Bézier fue una solución efectiva para modelar sólidos curvos complejos. Estas curvas permitieron una representación precisa del perímetro de los elementos constructivos, facilitando la creación de superficies curvas y detalladas. La flexibilidad de Blender para manipular Curvas de Bézier aseguró que incluso los elementos más complicados pudieran modelarse con precisión, manteniendo la integridad geométrica de las estructuras originales

Para generar una cara a partir de estas curvas, separadas por una distancia igual a la de las caras opuestas del objeto que delineaban en planta, se cerraba el perímetro de ambas uniendo sus vértices iniciales y finales mediante una arista, a través de la selección de éstos y accionar la función de “*new Edge/Face from vértices*”; una vez cerrado el perímetro y al iniciar de nuevo este comando, se genera una cara a partir de los vértices.

La creación de caras a partir de Curvas de Bézier permitió formar superficies continuas y precisas que podían extruirse para generar sólidos. Este método garantizó que los elementos curvos mantuvieran su forma y detalle durante el proceso de modelado. La capacidad de Blender para manejar estas operaciones de manera eficiente facilitó la creación de modelos tridimensionales que capturaran la complejidad de los elementos arquitectónicos curvos con gran precisión.

La cara recién generada puede entonces ser extruida mediante la herramienta de extrusión; esto genera la sección transversal definida del sólido que posteriormente puede ser editada, añadiendo vértices, desplazando, rotando o girando sus caras y realizando subdivisiones a las ya existentes, modificándose para asimilarse a cualquier detalle singular, ornamentación existente o incluso deformación considerable presente en el elemento.

La extrusión de caras permitió transformar las secciones transversales en sólidos tridimensionales completos, que luego podían editarse para reflejar detalles específicos. Esta técnica fue esencial para modelar elementos con geometrías complejas, asegurando que cada detalle ornamental o deformación se representara con precisión. La capacidad de realizar ajustes detallados en las caras extruidas permitió crear modelos tridimensionales que reflejaban fielmente la realidad arquitectónica de las estructuras patrimoniales.

En el caso de ciertos elementos que presentaban un nivel de dificultad elevado, como por ejemplo las garitas del Castillo de San Juan Bautista, se optó por generar polilíneas sobre imágenes del objeto, que se ajustaran a la silueta de éste en su proyección vertical, añadiendo vértices que permitieran desplazar y modelar la polilínea hasta ajustarse a la silueta del mismo, y posteriormente se generó un “*Modifier*” de “*Screw*”, que revoluciona la polilínea seleccionada, creando un sólido amorfo que se despliega radialmente alrededor del eje seleccionado, como se ve en la Figura 30.

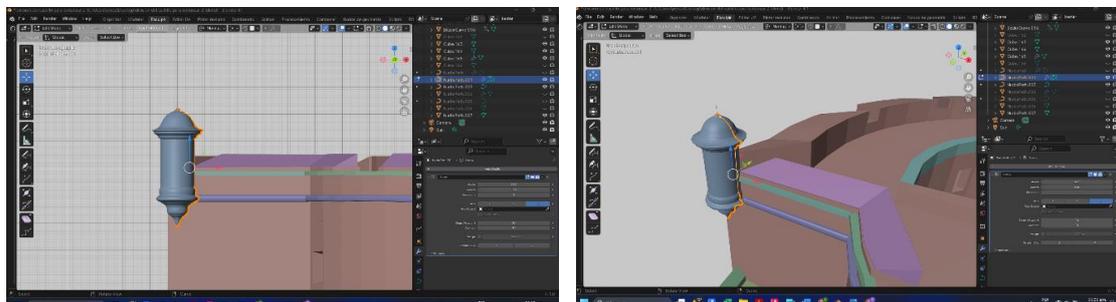


Figura 30: Captura de pantalla del software Blender, durante el proceso de creación de sólidos (elaboración propia)

La utilización de polilíneas y el "Modifier" de "Screw" en Blender fue una estrategia eficaz para modelar elementos complejos como las garitas. Este método permitió crear sólidos amorfos y detallados a partir de perfiles simples, asegurando que cada

componente del modelo capturara la complejidad geométrica del original. La flexibilidad de Blender para aplicar estos modificadores permitió abordar los desafíos de modelado de manera creativa y eficiente, logrando resultados precisos y detallados

De igual forma, para facilitar el modelado de otros elementos, se generaron, cuando resultaron convenientes, otros “*Modifier*”, como *Mirror* (para facilitar el modelado de objetos simétricos) *Bevel* (para crear los peldaños de escaleras, molduras de cubiertas, entre otros...), *Array* (para duplicar objetos en una serie lineal o radial), *Decimate* o *Remesh* (para reducir o mejorar la malla) y en varias ocasiones *Solidify* (para añadir grosor a un objeto de malla).

La utilización de estos modificadores permitió optimizar el proceso de modelado, ahorrando tiempo y esfuerzo al crear múltiples copias o ajustar geometrías complejas. El uso del modificador *Mirror*, por ejemplo, resultó adecuado para modelar elementos simétricos de manera rápida y precisa, garantizando que ambas mitades de un objeto fueran idénticas. El modificador *Bevel* fue especialmente útil para añadir detalles a bordes y esquinas, mejorando la precisión y la apariencia estética del modelo final. Estos modificadores no solo facilitaron el trabajo, sino que también mejoraron la calidad y la precisión del modelado.

Siendo particularmente frecuente el uso del “*Modifier*” de “*Boolean*”, que mediante operaciones booleanas permitió crear los huecos para ventanas, puertas y el patio interior del Castillo de San Juan Bautista, pero especialmente facilitó la intersección entre las distintas geometrías que constituían las edificaciones, especialmente el Castillo de San Juan Bautista donde existía una complejidad considerable debido a la intersección de las bóvedas de cañón interiores con el pasillo transversal que conecta tanto a estas con el exterior del castillo, como con el patio interior y a su vez con las escaleras que ascienden a la cubierta del castillo.

El uso extensivo del modificador *Boolean* fue esencial para manejar las complejas intersecciones de geometrías dentro del Castillo de San Juan Bautista. Este modificador permitió “tallar” con precisión las formas deseadas dentro del volumen principal del castillo, creando huecos y conexiones internas que serían difíciles de modelar manualmente. La capacidad de realizar estas operaciones booleanas facilitó la creación de un modelo coherente y detallado, asegurando que todas las intersecciones y conexiones fueran precisas y estéticamente correctas, como se ve en la Figura 32.

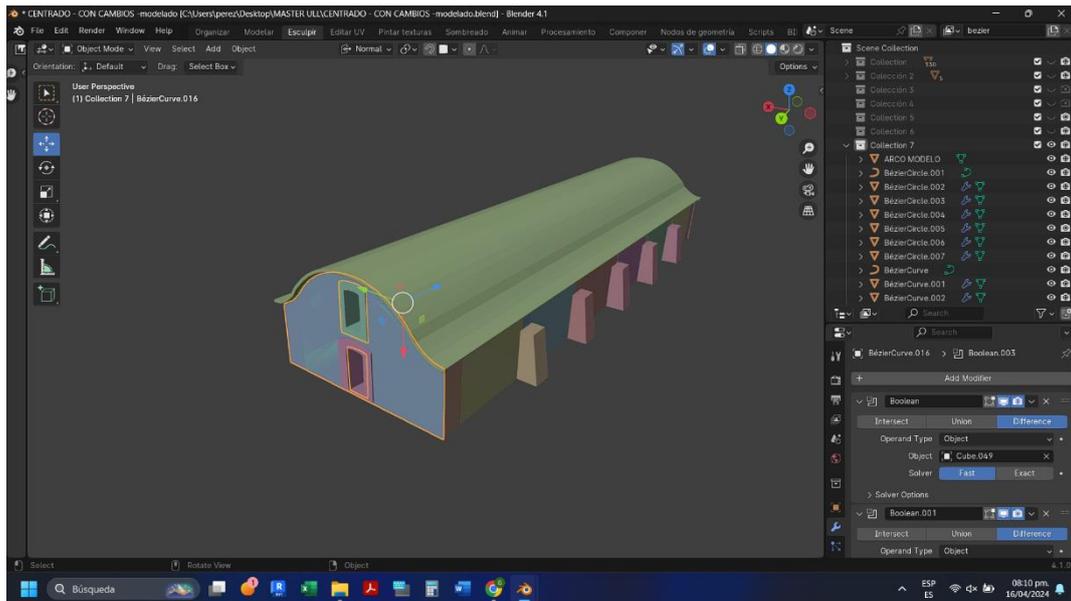


Figura 31: Captura de pantalla del software Blender del proceso de modelado del Castillo de San Juan Bautista (elaboración propia)

A diferencia de la Casa de la Pólvara (Figura 31) cuyo modelado se realizó elemento a elemento, el Castillo de San Juan Bautista (Figura 31) se realizó creando inicialmente el sólido que representara su volumen total y en su interior se crearon los sólidos que representaban la envolvente de los espacios interiores, una vez conseguido y mediante operaciones booleanas de diferencia e intersección se consiguió “tallar” interiormente el volumen total del castillo, generando continuidad en la superficie del mismo con respecto a los espacios exteriores e interiores, algo que no era posible si se mantenían de forma separada los objetos.

Este enfoque de modelar el volumen total del castillo primero y luego tallar los espacios interiores permitió una integración más natural y continua de todas las superficies. La técnica aseguró que las transiciones entre los espacios exteriores e interiores fueran fluidas y precisas, eliminando problemas de discontinuidad que podrían surgir si se modelaran los elementos por separado. Esta metodología no solo simplificó el proceso de modelado, sino que también resultó en un modelo más coherente y detallado, reflejando con mayor fidelidad la complejidad arquitectónica del castillo.

A partir de este punto es necesario convertir el volumen tallado en una malla, de esta forma se independiza de los sólidos interiores anteriormente generados para ser tomados de referencia por el “Modifier” de “Boolean”, los cuales pueden eliminarse sin que esto implique la pérdida de la operación booleana.

La conversión del volumen tallado en una malla permitió que el modelo se independizara de los sólidos de referencia utilizados para las operaciones booleanas. Este paso fue decisivo para consolidar el modelo y facilitar su posterior edición y manipulación. Al eliminar los sólidos de referencia sin perder las modificaciones

realizadas, se garantizó que el modelo final fuera limpio y manejable, listo para recibir ajustes adicionales y detalles finos que mejorarían su precisión y apariencia.

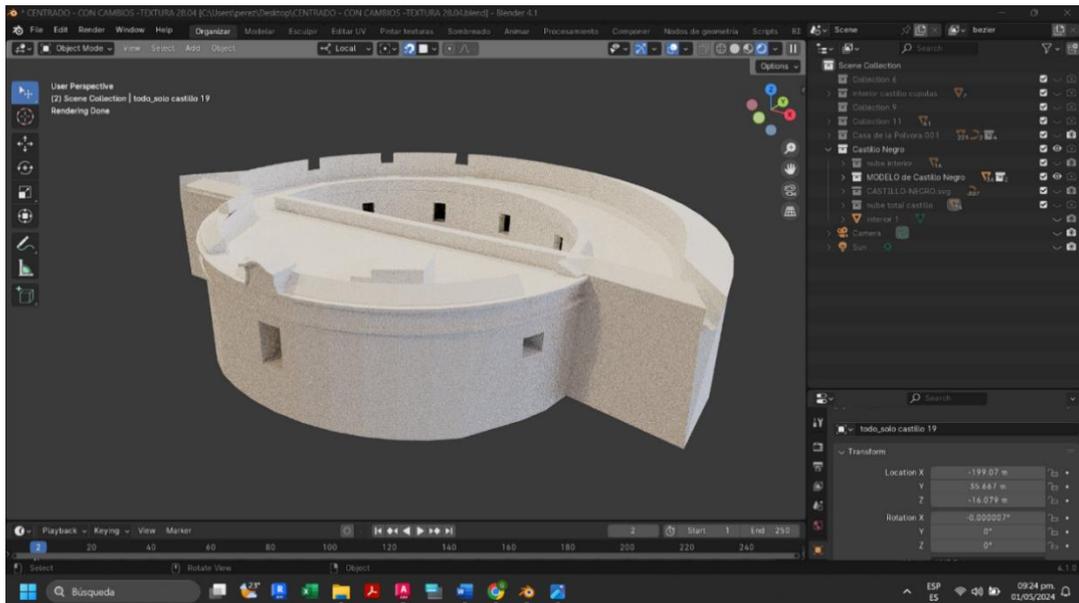


Figura 32: Captura de pantalla del software Blender del proceso de modelado del Castillo de San Juan Bautista (elaboración propia)

Habiendo obtenido los elementos constructivos de mayor relevancia, se procede a prestar atención a los elementos de ornamentación con un volumen mas reducido, como molduras, rebordes, las almenas del castillo, los contrafuertes de los arcos de la casa de la pólvora entre otros. (Figura 33)

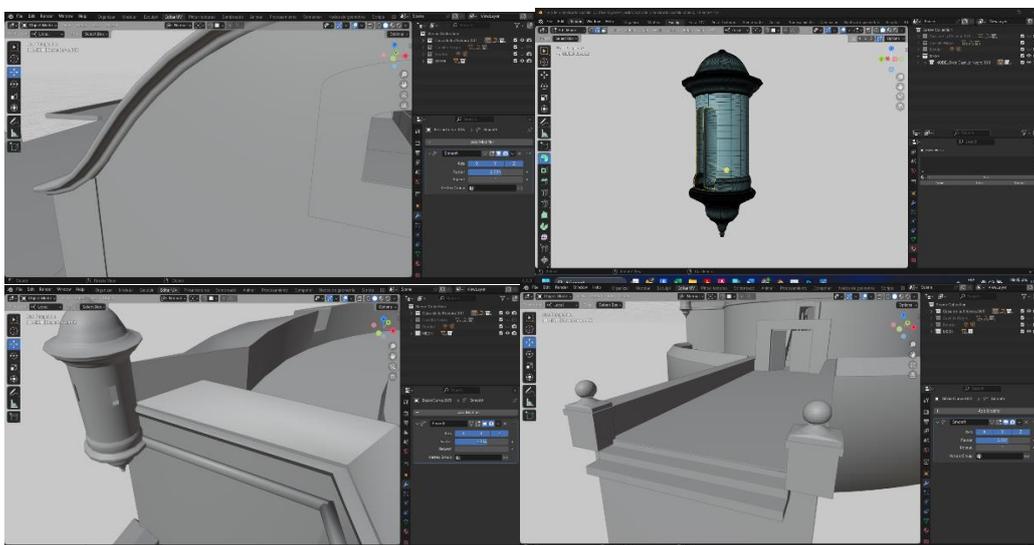


Figura 33: Captura de pantalla del software Blender del proceso de modelado de las garitas del Castillo de San Juan Bautista (elaboración propia)

El enfoque en los detalles ornamentales fue esencial para completar el modelado con un alto nivel de precisión y realismo. Estos elementos, aunque más pequeños en volumen, juegan un papel esencial en la representación fiel de las estructuras arquitectónicas. La adición de molduras, rebordes y otros detalles finos requirió un trabajo minucioso, utilizando herramientas avanzadas de Blender para asegurar que

cada elemento ornamental se integrara perfectamente en el modelo, reflejando con exactitud su apariencia y proporciones reales.

Finalmente se procede a generar mediante las mismas herramientas el espacio exterior de ambas edificaciones, en especial en la casa de la pólvora, donde el área externa de tránsito peatonal es necesario para valorar la preservación del conjunto, si se considera la forma en que influye el tránsito del público que circula a su alrededor, aunque en menor detalle debido a que su construcción es moderna y por tanto no entra en valoración su relevancia histórica, como se aprecie en la Figura 34.

La inclusión del espacio exterior en el modelado permite un análisis más completo del entorno de las edificaciones patrimoniales. Aunque la construcción del área peatonal es moderna y no posee una relevancia histórica directa, su influencia en la preservación del conjunto arquitectónico es significativa. El tránsito de personas puede tener efectos en la estructura y el estado de conservación del edificio, así como en su percepción visual y acceso. Por lo tanto, modelar estos elementos exteriores proporciona una visión integral que es fundamental para la planificación de la conservación y gestión del sitio.

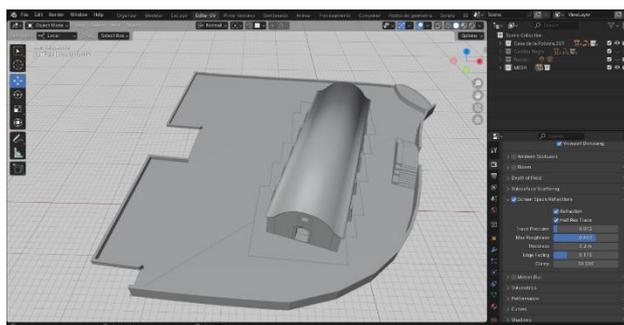


Figura 34: Captura de pantalla del software Blender del proceso de modelado del área exterior de la Casa de la Pólvora (elaboración propia)

Además, la representación del entorno exterior ayuda a identificar posibles áreas de intervención y mejora que puedan contribuir a la preservación y valorización del patrimonio. Por ejemplo, analizar el flujo peatonal y su impacto puede llevar a recomendaciones para desviar o gestionar mejor el tránsito para reducir el desgaste en áreas sensibles. Esta información también es útil para diseñar proyectos de restauración y conservación que consideren tanto el edificio en sí como su contexto inmediato, asegurando una protección más holística del patrimonio cultural.

La atención a los detalles del entorno, aunque en menor detalle que las edificaciones históricas, asegura que el modelo sea una herramienta útil no solo para la documentación y preservación del patrimonio, sino también para la planificación urbana y la gestión del entorno. Este enfoque integral permite a los investigadores, conservadores y urbanistas tomar decisiones informadas que beneficien tanto la

preservación del patrimonio como la experiencia del público que interactúa con estos espacios, como se ve en la Figura 35.

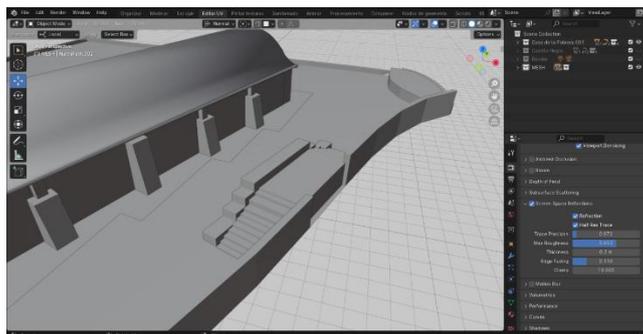


Figura 35: Captura de pantalla del software Blender del proceso de modelado de la área exterior de la Casa de la Pólvara (elaboración propia)

El trabajo de modelado realizado en Blender fue adecuado por varias razones. En primer lugar, la minuciosa revisión e importación de los archivos ".obj" desde Cyclone 3DR aseguró una transición fluida y sin pérdida de datos críticos. Este cuidado inicial garantizó que la integridad de la información se mantuviera, permitiendo una segmentación y organización precisas de los elementos visuales. La capacidad de Blender para manejar grandes conjuntos de datos y su flexibilidad en la edición de mallas complejas fueron esenciales para el éxito de esta fase. Además, la segmentación de los polígonos y vértices facilitó una organización más eficiente, permitiendo un enfoque preciso en las áreas de interés y eliminando elementos no deseados.

El uso de diversas herramientas y modificadores en Blender, como Mirror, Bevel, Array y Boolean, permitió optimizar el proceso de modelado y manejar eficientemente las geometrías complejas de las edificaciones. Estas herramientas facilitaron la creación de modelos precisos y detallados, respetando las características originales de las estructuras patrimoniales. La capacidad de Blender para realizar ajustes detallados en vértices, aristas y caras fue vital para mejorar la fidelidad del modelo, asegurando que cada componente del edificio se integrara perfectamente con la malla existente. Este enfoque garantizó una representación fiel y detallada de la realidad arquitectónica, abarcando tanto los elementos constructivos como ornamentales.

El enfoque integral en la inclusión de detalles ornamentales y del entorno exterior de las edificaciones completó el modelado con un alto nivel de precisión y realismo. La atención a estos elementos, aunque en menor detalle que las edificaciones principales, permitió proporcionar una visión completa y holística del sitio patrimonial. La inclusión del área de tránsito peatonal, aunque moderna, permitió analizar su impacto en la preservación del conjunto arquitectónico, asegurando una planificación adecuada para la conservación y gestión del sitio. Este enfoque no solo benefició la documentación y

preservación del patrimonio, sino que también proporcionó información de referencia para la planificación urbana y la gestión del entorno.

Para mejorar futuros trabajos durante esta etapa de modelado, se podrían considerar algunas adiciones y cambios. La implementación de técnicas avanzadas de texturizado y sombreado en Blender podría mejorar aún más la representación visual y realista de los modelos. Además, la utilización de otras funcionalidades y herramientas de modelado podría permitir refinar detalles y agilizar aún más el proceso, que en ocasiones se veía ralentizado debido al desconocimiento algunas funciones, que se conocerían posteriormente.

4.5. Asignación de texturas

El proceso de atribuir texturas a los sólidos tridimensionales requiere un paso inicial de obtención de las mismas, su edición para que abarque todo el sólido y la configuración de valores de visualización, como las de la Figura 36

Este paso inicial es decisivo, ya que la calidad y precisión de las texturas influyen directamente en el realismo y la fidelidad del modelo 3D. Las texturas deben ser seleccionadas y editadas cuidadosamente para asegurar que se ajusten correctamente a la geometría de los sólidos. Esto implica no solo la captura de imágenes de alta resolución, sino también su procesamiento para corregir cualquier distorsión y asegurar una proyección adecuada sobre las superficies del modelo. El uso de software de edición de imágenes, como Adobe Photoshop o GIMP, puede ser fundamental en esta etapa para ajustar el color, el brillo y la saturación de las texturas, garantizando que representen fielmente los materiales originales.

Las fotografías panorámicas capturadas por el dispositivo de escaneado, si bien cuentan con un nivel de detalle adecuado y permiten la extracción de la mayoría de las texturas, en ocasiones pueden estar sujetas a la deformación característica de este tipo de fotografías por lo que se distorsionan sus dimensiones y ortogonalidad, dejando un resultado poco natural.

Para abordar estos problemas de distorsión, se pueden utilizar herramientas específicas dentro del software de edición de imágenes para corregir las perspectivas y alinear las texturas de manera adecuada. Esto puede implicar la aplicación de filtros de corrección de lente y la manipulación manual de la imagen para ajustar los bordes y líneas de referencia. Estas correcciones son esenciales para mantener la ortogonalidad y proporciones correctas en las texturas aplicadas, asegurando que los elementos arquitectónicos se representen de manera realista y sin distorsiones visuales que puedan afectar la interpretación del modelo.

Por ello se recurrió a fotografías de alta resolución, que se adaptaran a las características deseadas, evitando las deformaciones por perspectiva y buscando una captura lo más ortogonal posible, como por ejemplo las de la Figura 37.



Figura 36 Imágenes de Alta Resolución utilizadas para extraer las texturas. (elaboración propia)

El uso de fotografías de alta resolución permite capturar texturas más precisas y detalladas, eliminando la mayoría de las distorsiones asociadas con las imágenes panorámicas. Al tomar las fotografías desde ángulos cuidadosamente seleccionados y utilizando equipos profesionales, se puede obtener una representación más fiel de los materiales y colores de las estructuras. Estas imágenes son luego procesadas para asegurar que se ajusten perfectamente a las superficies del modelo, manteniendo la coherencia visual y la integridad de los detalles arquitectónicos. Figura 37



Figura 37 Ejemplo de texturas de los materiales existentes, extraídas para su posterior procesamiento en el modelo. (elaboración propia)

Para garantizar que el resultado fuese razonablemente eficiente a la hora de representar de forma orientativa los materiales de cada elemento, se tomaron medidas durante el proceso de obtención y edición para evitar la teselación de éstas, así como ajustar su color para que representaran fielmente la realidad existente.

La teselación es un problema común cuando se aplican texturas a grandes superficies, ya que puede crear patrones repetitivos que disminuyen el realismo del modelo. Para evitar esto, se pueden utilizar técnicas de mezcla y mapeo de texturas que suavicen las transiciones y eliminen las repeticiones visibles. Además, ajustar el color y la iluminación de las texturas para que coincidan con las condiciones reales de iluminación del sitio es esencial para mantener una apariencia natural y coherente en el modelo tridimensional, mejorando así su utilidad para análisis y visualización.

El Proceso de Texturizar en Blender:

Cuando se crea un objeto tridimensional en Blender, su visualización gráfica viene predefinida por defecto, sin textura o color asignado; la personalización de estos atributos puede variar dependiendo del objetivo y resultado final buscado.

La metodología aplicada para asignar una representación visual a los elementos tridimensionales depende de las expectativas y necesidades del proyecto, esto puede implicar desde la asignación de colores básicos hasta la aplicación de texturas complejas que replican materiales reales. Esta capacidad de personalización no solo mejora la apariencia visual de los modelos, sino que también facilita una mejor interpretación y análisis de las estructuras representadas, especialmente en proyectos de conservación patrimonial donde la fidelidad visual es fundamental.

La edición de texturas en Blender puede abordarse de distintas maneras, En este caso, se eligió un método considerado adecuado tras evaluar la relación entre el tiempo empleado y el resultado obtenido.

Elegir el método adecuado para la edición de texturas implica considerar varios factores, como la complejidad del objeto, la calidad visual deseada y los recursos disponibles. En este proyecto, se optó por un enfoque que equilibrara eficiencia y resultados de alta calidad. Este enfoque permitió maximizar el uso del tiempo y los recursos disponibles, asegurando que las texturas aplicadas no solo fueran precisas y realistas, sino que también se integraran de manera eficiente en el flujo de trabajo de Blender, facilitando una producción rápida y efectiva de los modelos 3D.

Como parte de la funcionalidad del Rendering, el entorno de Shader Nodes o Nodos de Texturizado permite definir una textura que se visualizará en la superficie de un objeto tridimensional. Para ello, es necesario haber asignado un material al elemento, una vez hecho esto, se habilita el nodo principal que regula la función de distribución de bidireccional de dispersión, que caracteriza la forma en que se dispersa la radiación óptica desde una superficie, en función de las posiciones angulares de los haces incidente y dispersos configurados en los controles de iluminación del software.

El uso de Shader Nodes es una técnica avanzada que permite un control preciso sobre cómo se aplican y visualizan las texturas en un objeto 3D. Asignar un material y

configurar los nodos de dispersión óptica son pasos esenciales para crear texturas que respondan de manera realista a las condiciones de iluminación. Este nivel de control permite ajustar la reflectancia, translucidez y otros aspectos visuales de las texturas, mejorando significativamente la apariencia final del modelo. Además, la capacidad de manipular la dispersión de la luz contribuye a una representación más realista y detallada de los materiales, vital para la precisión y autenticidad del modelo.

Para que la textura cubra adecuadamente la superficie del sólido, en el entorno de edición y tras seleccionar el objeto tridimensional, se procede a generar el “UV map”, una función que, en un archivo independiente, mapea un elemento tridimensional, delineando las caras que lo componen sobre un plano bidimensional. La forma en que cada cara se despliega sobre el archivo dependerá del tipo de proyección que se desee, pudiendo ser cónica, cilíndrica, en caja u otro tipo, según las necesidades y la forma del elemento, como las de la Figura 38.

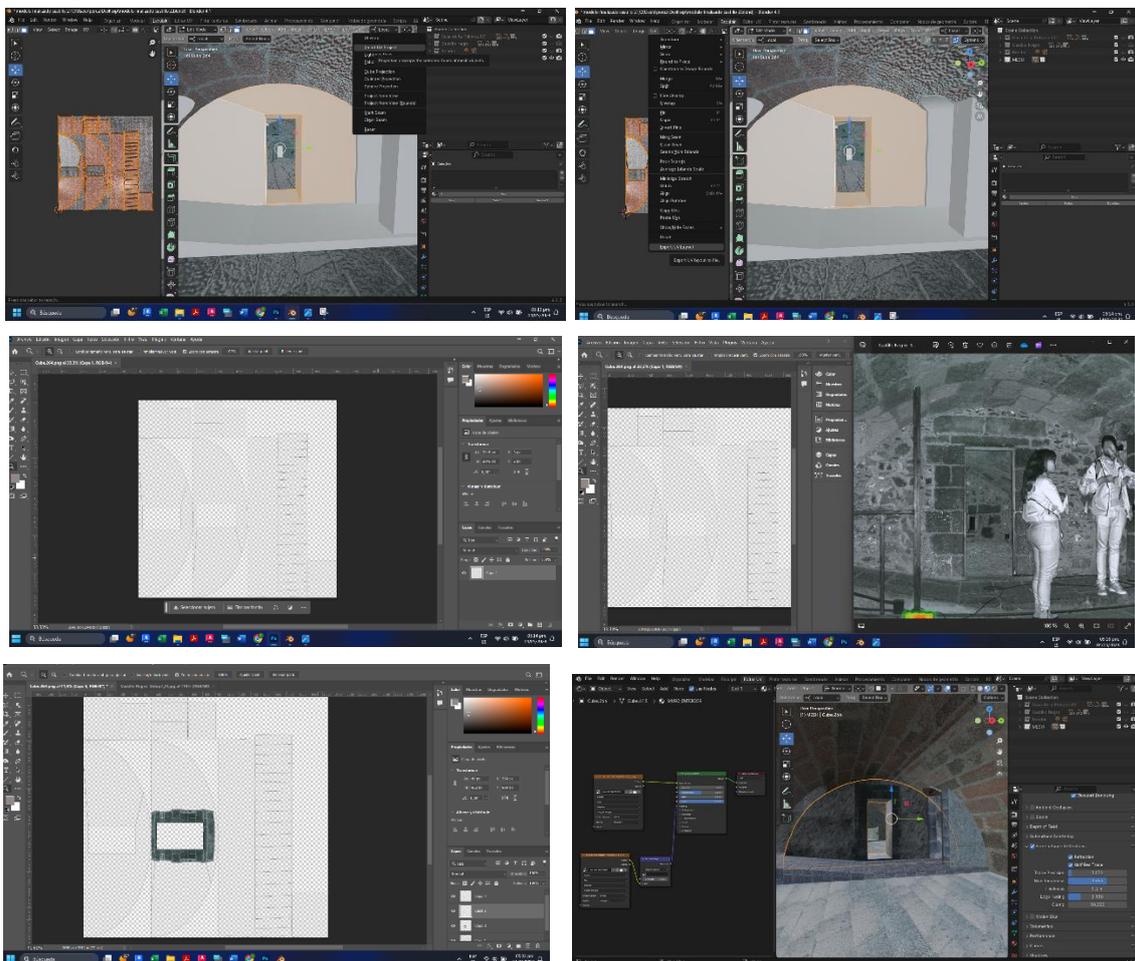


Figura 38: Ejemplo de proceso de extracción y edición de texturas de los distintos elementos constructivos. (elaboración propia)

La generación del UV map es un paso importante para asegurar que las texturas se apliquen correctamente a las superficies del modelo 3D. Este proceso de mapeo transforma las coordenadas tridimensionales en coordenadas bidimensionales,

permitiendo una aplicación precisa de las texturas. Seleccionar el tipo de proyección adecuado es fundamental para minimizar distorsiones y asegurar que las texturas se alineen correctamente con la geometría del objeto. Este método proporciona una base sólida para la texturización, facilitando una representación visual coherente y realista del modelo.

Este “Uv Map” puede ser exportado en extensión de imagen, para ser usado como referencia con el fin de crear una textura para ese objeto, organizando de tal forma la información visual que, al ser importada de nuevo a Blender, muestra con precisión la textura deseada sobre la cara deseada.

La exportación del UV Map como en la Figura 39 y Figura 40 en formato de imagen permite trabajar en la creación de texturas de manera externa, utilizando el software Photoshop para la edición de imágenes lo que permite ajustar y perfeccionar la apariencia visual. Este enfoque asegura que las texturas se ajusten perfectamente a las caras del modelo cuando se reimporten a Blender, eliminando errores y garantizando una aplicación precisa. Organizar la información visual de esta manera optimiza el proceso de texturización y asegura que el resultado final sea de alta calidad, fiel a la realidad y estéticamente coherente con las necesidades del proyecto.

La metodología empleada basa en un proceso estructurado que proporciona un control detallado sobre la apariencia final de los modelos tridimensionales; la personalización de los atributos visuales, desde colores básicos hasta texturas complejas, permite una mejor interpretación y análisis de las estructuras representadas, especialmente en proyectos de conservación patrimonial donde la fidelidad visual es decisiva. Ventajas de este enfoque incluyen la capacidad de replicar materiales reales con alta precisión y la flexibilidad para ajustar la apariencia según las condiciones de iluminación. Sin embargo, también presenta desventajas como la necesidad de habilidades avanzadas en manejo de software de edición de imágenes y la posibilidad de que el proceso sea muy laborioso y consuma mucho tiempo.

La elección de un método equilibrado entre tiempo empleado y calidad es un aspecto relevante a tomar en cuenta en este tipo de proyectos, en especial de carácter académico, donde los recursos y el tiempo son limitados. La utilización de Shader Nodes para definir las texturas y la generación de UV maps asegura que las texturas se apliquen de manera realista y precisa a las superficies del modelo 3D. Este proceso permite ajustar la reflectancia, translucidez y otros aspectos visuales de las texturas, mejorando significativamente la apariencia final del modelo. No obstante, este enfoque puede ser complejo para los usuarios menos experimentados, y requiere un conocimiento profundo de las herramientas y técnicas de Blender.

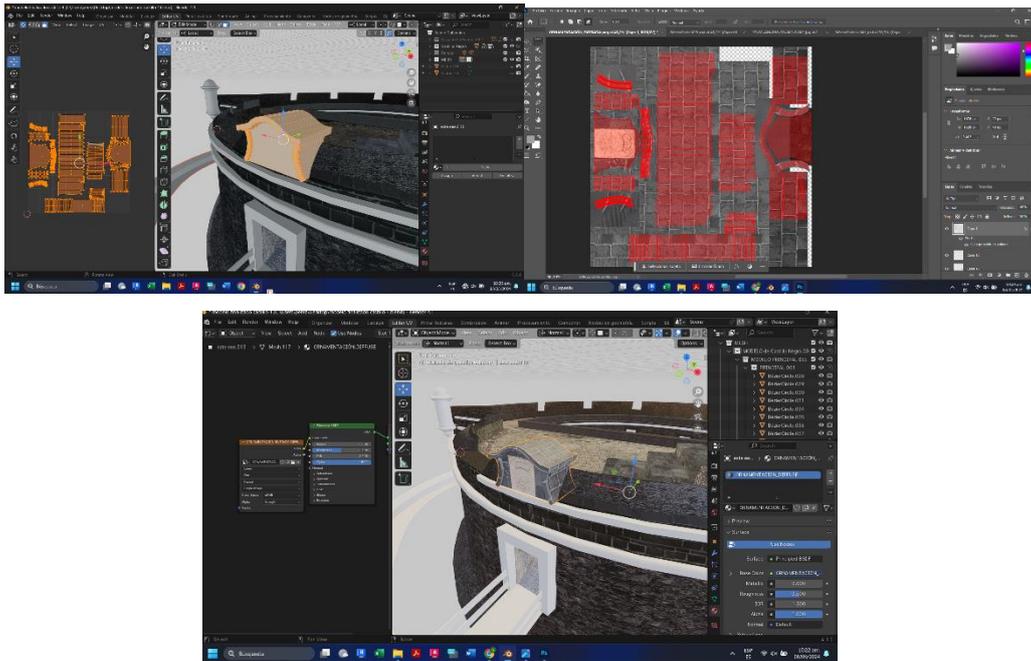


Figura 39: Ejemplo de proceso de extracción y edición de texturas de los distintos elementos constructivos. (elaboración propia)

Para mejorar este método de asignación de texturas, se podría integrar el uso de bibliotecas de texturas predefinidas que ya estén optimizadas para su aplicación en modelos tridimensionales. Además, la implementación de herramientas automatizadas de ajuste de texturas, que puedan identificar y corregir distorsiones automáticamente, podría agilizar el proceso y reducir la carga de trabajo manual. Otra mejora podría ser la incorporación de técnicas de fotogrametría, que permiten capturar texturas altamente detalladas directamente desde fotografías de los objetos reales, proporcionando una precisión aún mayor y reduciendo la necesidad de ajustes manuales extensivos.

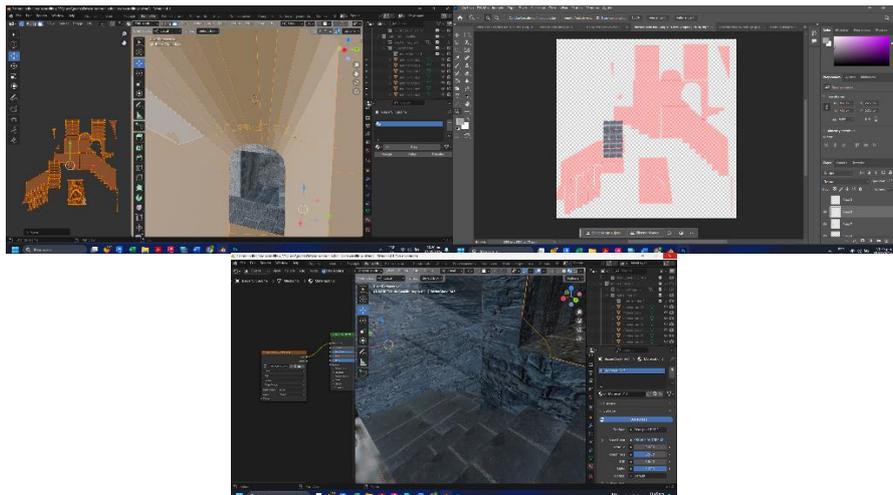


Figura 40: Ejemplo de proceso de extracción y edición de texturas de los distintos elementos constructivos. (elaboración propia)

4.6. Edición de texturas en Photoshop.

La creación de la textura final se realizó en el software de edición gráfica “Photoshop”, el cual permite la importación de distintas extensiones de imagen, además que cuenta con herramientas que facilitan la organización y edición de la información visual, con una precisión elevada sobre el resultado final.

Photoshop ofrece una amplia gama de herramientas de edición que permiten realizar ajustes detallados en las texturas. Estas herramientas incluyen la capacidad de corregir el color, ajustar el brillo y el contraste, y aplicar filtros para mejorar la calidad visual. La capacidad de trabajar con capas permite a los usuarios combinar múltiples imágenes y realizar ajustes sin afectar la imagen original, lo que es esencial para mantener la precisión y la fidelidad de las texturas aplicadas a los modelos tridimensionales.

Las texturas fueron obtenidas directamente de fotografías, así como por las capturadas por el equipo de escaneo laser, escogiendo una u otra en función de la calidad y la capacidad de representar fielmente la textura real del elemento esto permitiría identificar su material, aunque fuese superficialmente.

La selección entre fotografías de alta resolución y capturas del escáner láser se basó en criterios de calidad y fidelidad de representación. Las fotografías de alta resolución, tomadas con cámaras de alta resolución, proporcionan detalles precisos y colores naturales que son esenciales para una representación realista. Por otro lado, las imágenes del escáner láser, aunque pueden presentar ciertas deformaciones, ofrecen una vista completa y detallada que es invaluable para ciertas superficies y texturas específicas. La combinación de ambas fuentes asegura que cada textura aplicada sea lo más precisa y representativa posible del material original.

Una vez generada la textura esta es exportada en extensión “.png”; para luego, en la ventana de “Shader Editor” o Nodo de Texturizado, importarla desde un nodo de Textura recién creado, este nodo es denominado imagen de textura; y cuenta con tres propiedades, la de “*interpolation*” que define el método de escalado para las imágenes al ser renderizado, la de “*Projection*” que establece como proyectar un vector y la de “*Repeat*” la cual no fue utilizada, para evitar la teselación de ésta.

El formato “.png” se eligió debido a su capacidad para mantener una alta calidad de imagen y soporte de transparencia, lo que es útil para texturas con áreas no opacas. En el Shader Editor de Blender, la configuración de las propiedades de textura es fundamental para asegurar que la textura se aplique de manera correcta y sin distorsiones. La propiedad de “*interpolation*” permite que las texturas se escalen suavemente, mientras que “*Projection*” asegura que las texturas se alineen

correctamente con la geometría del modelo. Al no utilizar la propiedad “Repeat”, se evita la repetición de patrones, lo que podría comprometer el realismo del modelo.

Este enfoque en la creación y aplicación de texturas garantiza que el modelo tridimensional final sea preciso y visualmente coherente. La combinación de herramientas avanzadas de edición en Photoshop con las capacidades de texturizado de Blender permite mejorar la fidelidad y el realismo del modelo 3D. como la Figura 41.

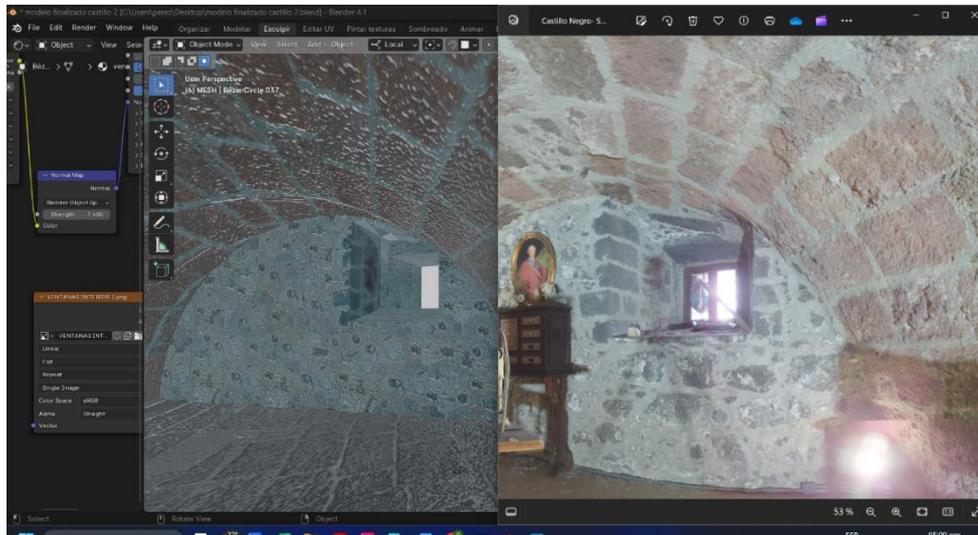


Figura 41: Imagen comparativa entre el resultado visual obtenido y una fotografía. (elaboración propia)

Con respecto a la implementación de este software dentro del flujo de trabajo, se justifica en que Photoshop facilita la sustracción y edición de texturas obtenidas de fotografías de alta resolución y capturas del escáner láser, entre sus ventajas está la capacidad de realizar ajustes detallados en color, brillo y contraste, y la facilidad de trabajar con capas para combinar múltiples imágenes. Además, el formato “.png” garantiza una alta calidad de imagen y soporte de transparencia. Sin embargo, esta metodología también presenta desventajas, como la necesidad de habilidades avanzadas en software de edición de imágenes y la posibilidad de que el proceso sea laborioso y consuma mucho tiempo.

Vectores de Normales y su impacto en la calidad visual

Con el fin de mejorar visualmente el resultado y añadir atractivo a la visualización del modelo, se procedió a generar mapas de normales para cada textura; este es un tipo especial de textura que guarda información del relieve de la imagen y genera desviaciones en la posición y dirección de los píxeles que conforman la superficie del sólido original, añadiendo detalles como protuberancias, ranuras, grumos, juntas u otros.

Los mapas de normales juegan un papel vital en la creación de efectos de relieve detallados sin necesidad de incrementar la cantidad de polígonos en el modelo 3D, lo que permite mantener la eficiencia del rendimiento. Estos mapas funcionan modificando

la dirección en la que la luz interactúa con la superficie, creando la ilusión de profundidad y complejidad en los materiales. Este proceso es especialmente útil en modelos arquitectónicos y patrimoniales donde los detalles superficiales son esenciales para una representación precisa y realista.

Además de los archivos de *diffuse map* y *normal map* (Figura 42) que se han utilizado para mejorar la calidad visual de las texturas en Blender, existen otros tipos de mapas que pueden enriquecer aún más la representación de los materiales y superficies. Entre estos se incluyen los mapas de especularidad, que ayudan a controlar el brillo y los reflejos de las superficies; los mapas de desplazamiento, que pueden alterar la geometría de la malla para añadir detalles en relieve más profundos; y los mapas de oclusión ambiental, que incrementan el realismo al simular cómo la luz se bloquea en los rincones y grietas.

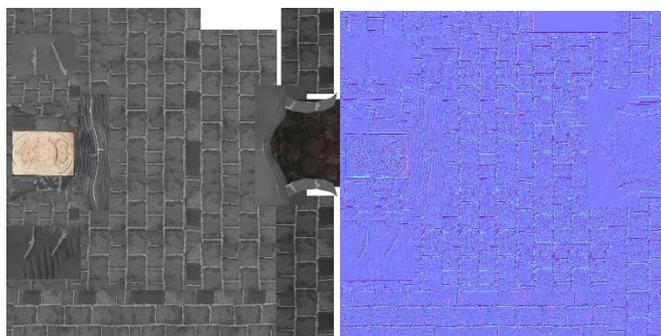


Figura 42: Extracto del proyecto donde se observa, para un mismo elemento, los archivos que componen su textura, que son el archivo del "Diffuse Map" (izquierda) y el "Normal Map" (derecha). (elaboración propia)

Para lograrlo se valoraron distintos métodos y se aplicó el que más se ajustaba a la complejidad de la geometría del objeto.

Éste método fue el conocido como *Render Baking* a través del motor de renderizado Cycles, que genera una imagen de textura de normales con información sobre sombras e iluminación, generando un archivo RGB; este proceso necesita que el objeto del cual se obtendrá dicha textura especial, sea una malla y que además tenga un "Uv Map" definido, bien sea un atributo de color o un nodo de textura de imagen, ya que sobre éste nodo será donde se efectue el proceso de *Baking*.

Render Baking (Figura 43) es una técnica que permite capturar toda la información de iluminación y sombras en una textura, facilitando la transferencia de detalles de la malla de alta resolución a una de menor resolución sin perder calidad visual. Este método es particularmente eficaz para elementos con geometrías complejas y detalles finos, ya que conserva la precisión y la exactitud de la superficie original. Al utilizar el tipo de normal "tangent", se asegura que las normales de la malla original se transfieran correctamente al sólido modelado, manteniendo la coherencia visual y el realismo.

El tipo de “Normal” dependerá de lo que se espere obtener, en este caso, al haber modelado un sólido sobre la malla original que se obtuvo de la nube de puntos, se eligió la opción de “tangent” que permitía que las normales ya existentes en la malla se transfirieran sobre el sólido previamente modelado y adyacente a ésta, de modo que la malla transfería, al ser tangente al sólido modelado, sus normales originales al Nodo de éste.

La transferencia de normales mediante el método tangente es especialmente útil en contextos donde la precisión añade valor a los productos obtenidos, como en la conservación del patrimonio. Este proceso asegura que todos los detalles capturados durante el escaneo 3D se mantengan en el modelo final, proporcionando una representación fiel de las texturas y relieves originales. La calidad del escaneo y la capacidad de procesamiento del software son determinantes para obtener resultados precisos y detallados, reflejando la complejidad y autenticidad del objeto modelado.

Esto permitía que se transfiriera información real de la textura del objeto, directamente desde la malla, la cual captura la textura tal cual es, en toda su extensión, con la calidad y precisión que se le atribuya al equipo de escáner y a la capacidad de procesado de datos del software que generó la malla.

Estas normales se importan posteriormente a Blender a través de un nodo de imagen de textura, pero se añade a éste un nodo adicional de “vector” y “normal map”, enlazando estos dos nodos con el árbol de nodos. Este enfoque modular facilita la experimentación y la refinación de los efectos visuales, asegurando que las texturas se alineen correctamente con la geometría del modelo y respondan adecuadamente a las condiciones de iluminación. La combinación de diferentes técnicas de generación de normales proporciona flexibilidad y precisión, optimizando el proceso de texturización para obtener resultados visualmente impactantes y realistas.

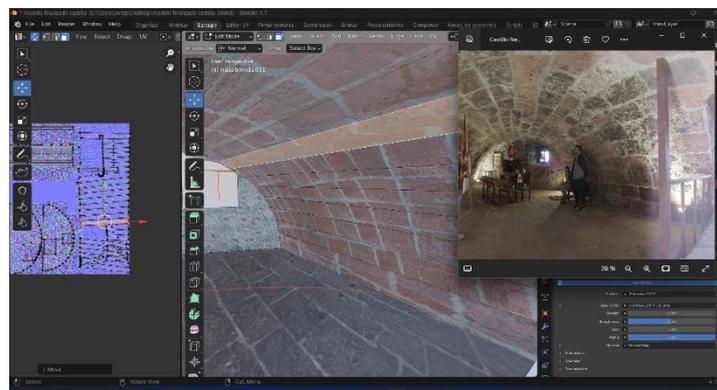


Figura 43: Captura de pantalla de Blender, durante el proceso de Baking, junto con comparación de fotografía (elaboración propia)

4.7 Importación de una malla de emplazamiento

Con el fin de añadir valor a la realización del modelo, se investigaron métodos para importar de forma rápida y con calidad considerable una malla del emplazamiento donde se encuentran ambas edificaciones, con el propósito de enriquecer la cantidad de información y las aplicaciones del modelo.

Durante esta fase, se exploraron diferentes fuentes de datos geoespaciales que pudieran proporcionar mallas tridimensionales precisas del entorno urbano. Se consideraron opciones como las bases de datos de modelos 3D urbanos de Google Earth, servicios de cartografía 3D de organizaciones gubernamentales y proveedores comerciales especializados en geodatos. La evaluación de estas fuentes se centró en la resolución y precisión de las mallas, así como en la compatibilidad con las herramientas de modelado utilizadas en el proyecto. La integración de una malla de emplazamiento de alta calidad permite contextualizar mejor las edificaciones en su entorno, ofreciendo una perspectiva más completa y detallada.

Se consiguió mediante el software StuDocu y el Addon “*Maps Models Importer*” creado por Elis Michel, una malla del conjunto urbano que rodea ambas edificaciones, sobre la cual se situaron los modelos previamente generados; la malla tiene una calidad relativamente alta que cumple con las expectativas de definir la situación de ambas edificaciones, y de ofrecer una visión más global de su ubicación y relación entre ambas y su entorno. Esto es especialmente útil para estudios de impacto ambiental, planificación urbana y proyectos de conservación que necesitan considerar tanto las estructuras individuales como su interacción con el entorno

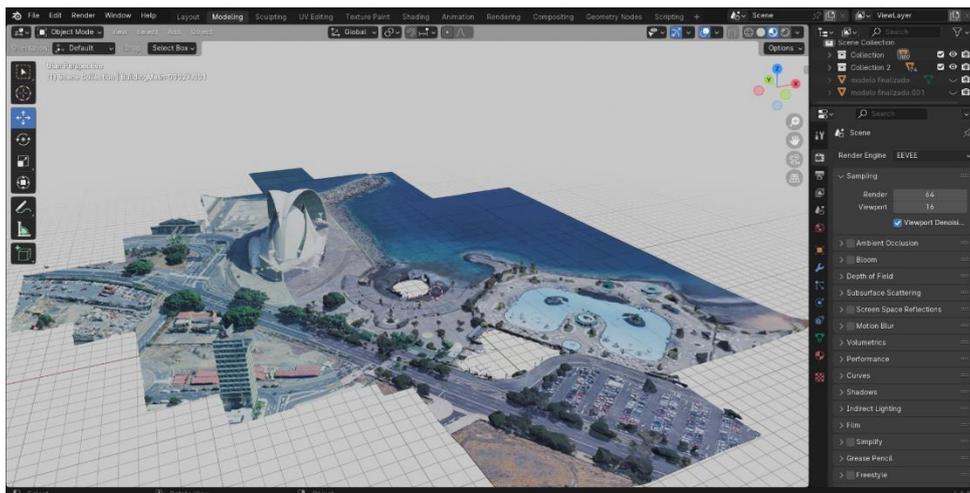


Figura 44: Emplazamiento importado (elaboración propia)

4.8 Flujo de Trabajo

El flujo de trabajo se estructuró en varios niveles de actuación, que se reflejan en la Figura 45; primero, se generó un plan cronológico de trabajo; en esta etapa, se recogieron los requerimientos técnicos y logísticos necesarios para el proyecto, previendo la correcta coordinación de las actividades. Luego, se pasó a la fase de trabajo de campo, que incluyó escaneos láser con el dispositivo Leica BLK 360; este proceso creó nubes de puntos en formatos E57 y LGS, proporcionando datos precisos de las geometrías de las edificaciones.

En la etapa de procesamiento de datos, las nubes de puntos se transformaron en mallas 3D manipulables con el software Cyclone 3DR; este paso permitió convertir los datos brutos en representaciones gráficas editables; los archivos de nube de puntos en formato .obj fueron el principal resultado de esta fase, sirviendo como base para el modelado detallado en Blender. En la fase de modelado, se usaron estas mallas para crear modelos 3D precisos de la Casa de la Pólvora y el Castillo de San Juan Bautista, aprovechando las capacidades avanzadas de modelado geométrico de Blender.

Simultáneamente, se obtuvieron y procesaron texturas de las edificaciones; usando técnicas de fotografía y escaneo, se generaron texturas detalladas, editadas en Photoshop para asegurar su precisión y calidad visual; estas texturas, en formatos .png (Diffuse Map y Normal Map), se integraron en los modelos 3D, mejorando su realismo visual. Finalmente, se generaron planos y documentación gráfica a partir de los modelos texturizados, incluyendo planos y secciones en formato .dwg; proporcionando una representación detallada y útil para la conservación y estudio del patrimonio.

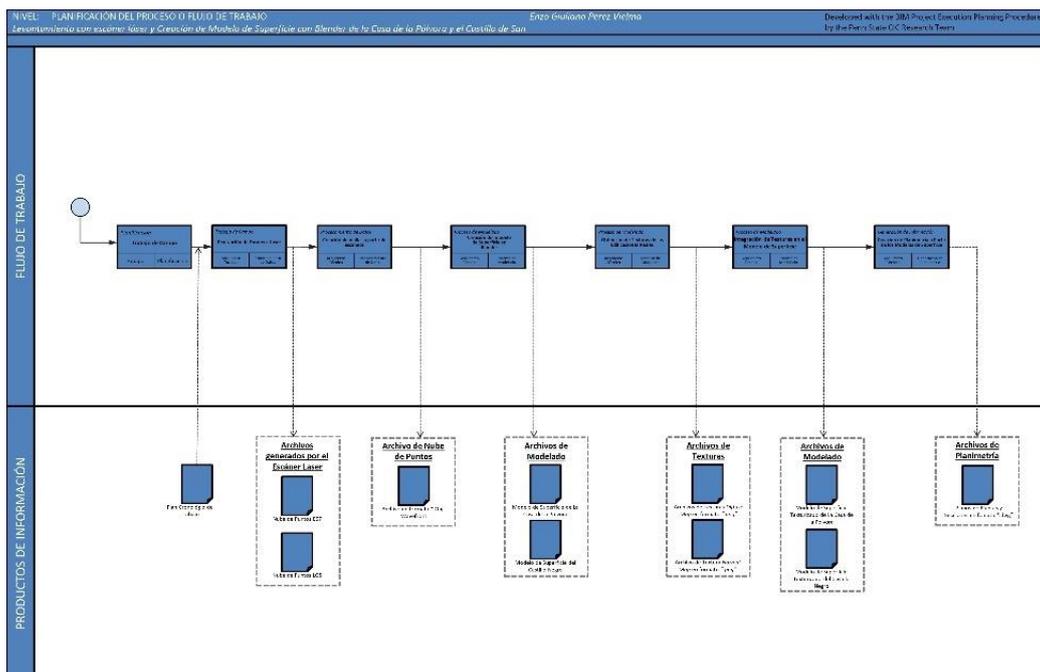


Figura 45: Flujo de Trabajo general

La etapa inicial de planificación contempló la obtención de información semántica y técnica de partida, reflejada en la Figura 46. Durante esta fase, se recopilaron datos históricos y técnicos necesarios para el proyecto; este proceso incluyó la búsqueda de información histórica, la revisión de antecedentes investigativos y la obtención de datos sobre el software y el dispositivo escáner a utilizar. Todos estos datos fueron cohesionados para establecer una base sólida para las siguientes etapas del proyecto.

Primero, se realizó una exhaustiva búsqueda de información histórica; esto permitió reunir antecedentes sobre las edificaciones objeto de estudio, identificando características arquitectónicas y hechos históricos significativos. Paralelamente, se investigaron antecedentes de investigaciones previas sobre la conservación y modelado de patrimonio arquitectónico; esta etapa ayudó a comprender las metodologías empleadas y evaluar su aplicabilidad al proyecto.

Asimismo, se buscó información técnica sobre los softwares empleados, como Cyclone 3DR y Blender; este conocimiento permitió una correcta configuración y uso de las herramientas tecnológicas. Además, se recopilaron detalles técnicos sobre el escáner láser Leica BLK 360, asegurando su correcta operación durante el trabajo de campo.

Todos estos datos fueron compilados y cohesionados; la integración de esta información técnica e histórica proporcionó una base teórica y metodológica adecuada. El resultado de esta etapa incluyó una revisión bibliográfica detallada, conocimientos avanzados sobre el uso de software y dispositivos de escaneo, así como un plan estructurado para el modelado de superficies.

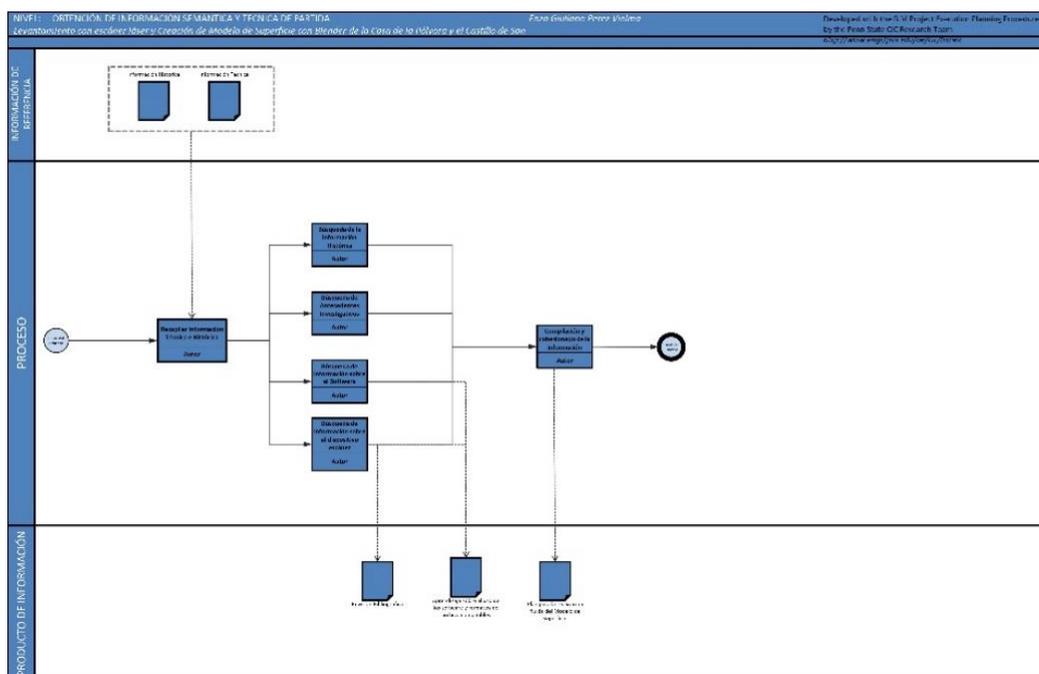


Figura 46: Nivel de obtención de la información semántica y técnica de partida.

El siguiente nivel fue el análisis de las condiciones del sitio, reflejado en la Figura 47; este análisis se contempla dentro de la planificación y sirve como transición hacia el trabajo de campo. El proceso se inicia con la investigación in situ de la edificación; esto es fundamental para entender el contexto y las características específicas del lugar. A partir de esta investigación, se realiza un análisis detallado de las capacidades del escáner Leica BLK 360, evaluando su idoneidad para las condiciones del sitio.

Posteriormente, se analiza las condiciones y necesidades del lugar; este análisis determina si es viable realizar el escaneo adecuadamente, teniendo en cuenta factores como accesibilidad, vegetación y otros elementos que puedan afectar la precisión de los datos capturados. Si el análisis concluye que es posible proceder, se pasa a la etapa de escaneo. Durante los escaneos, se presta especial atención a la alineación de las tomas, ya sea de forma manual o automática, para garantizar coherencia y precisión de los datos; una vez completados los escaneos, los datos se procesan utilizando el software Cyclone 3DR de Leica para generar una visualización tridimensional preliminar del conjunto de escaneos. El resultado de este procesamiento inicial se evalúa para determinar si contiene la información suficiente y precisa; si es así, el proceso se considera completo; de lo contrario, se identifican las áreas que requieren un re-escaneo y se repite el procedimiento. Esta metodología asegura que los datos obtenidos sean de alta calidad, proporcionando una base sólida para el posterior modelado y análisis de las edificaciones patrimoniales.

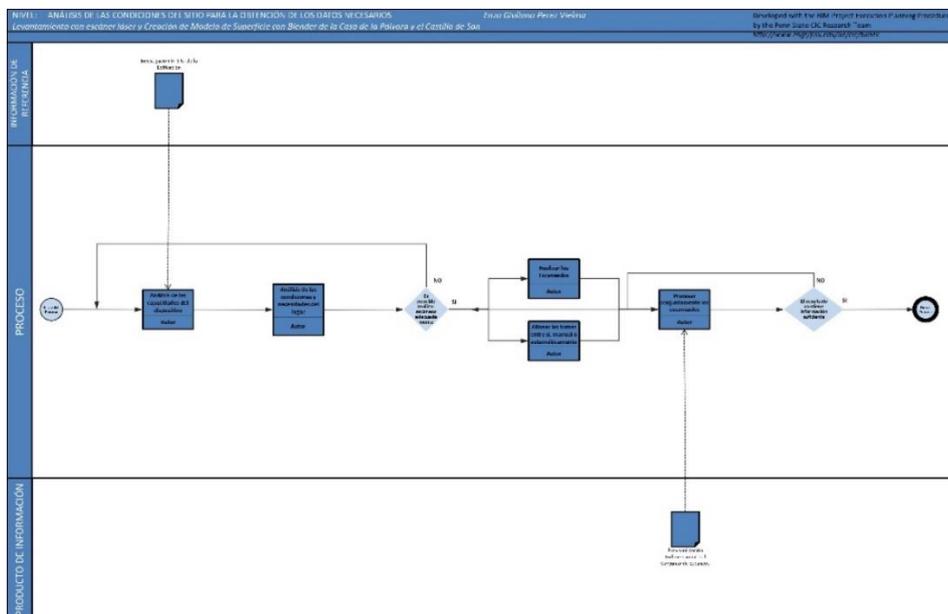


Figura 47: Nivel de análisis de las condiciones del sitio

Con respecto al nivel que contempla el diseño del proceso de modelado, reflejado en la Figura 48, se requiere una planificación que contemple y se reajuste a medida que se obtienen resultados. Este proceso comienza con la identificación de las necesidades del modelo, llevada a cabo por el tutor y el alumno; en esta fase, se determina qué elementos clave deben ser representados y preservados en el modelo final. Seguidamente, se identifica el contenido a representar y su prioridad; esto ayuda a enfocar los esfuerzos en los aspectos más relevantes de las edificaciones.

Una vez definido el contenido, se procede a la importación de la malla de información escaneada al software Blender; esta malla, previamente procesada y exportada desde Cyclone 3DR en formato .obj, garantiza la compatibilidad y la preservación de los detalles geométricos.

En Blender, se realiza la creación de sólidos tridimensionales basados en la malla importada; estos sólidos representan las principales estructuras y elementos arquitectónicos de las edificaciones; esta funcionalidad permite ajustar los detalles geométricos, eliminando elementos innecesarios y afinando la precisión del modelo. Se replican detalles arquitectónicos, asegurando que cada elemento sea representado con fidelidad; se generan superficies continuas y geometrías precisas que reflejan la realidad observada en el sitio.

Tras la creación de los sólidos, se evalúa si el modelo cumple con las expectativas establecidas; si es necesario, se ajustan detalles adicionales para mejorar la precisión y calidad del modelo. Este proceso iterativo garantiza que el modelo final sea una representación fiel y detallada de las edificaciones. La obtención de texturas se realiza a partir de fotografías de alta resolución; estas texturas son integradas en los modelos tridimensionales, mejorando significativamente su realismo visual.

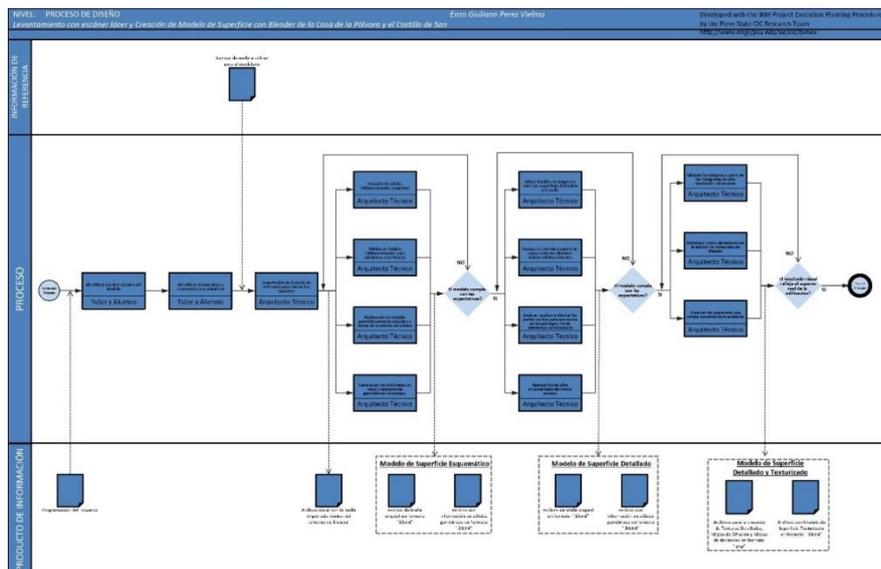


Figura 48: Fase del proceso de Modelado.

De igual forma, el proceso de revisión de resultados y tratamiento de datos, reflejado en la Figura 49, requiere una planificación detallada que se reajuste a medida que se obtienen resultados. Este proceso comenzó con la creación de imágenes renderizadas a partir de los modelos digitales obtenidos previamente; a continuación, se extrajo la planimetría inicial a partir de los modelos, proporcionando una base visual y técnica que facilitó la evaluación.

Una vez obtenida la planimetría, se realizó una reunión con el tutor y el alumno para evaluar los resultados; durante esta reunión, se discutieron los detalles de los modelos y se identificaron posibles áreas de mejora. El siguiente paso fue recibir retroalimentación y sugerencias del tutor; ambos revisaron los modelos y discutieron posibles ajustes. Este proceso iterativo permitió asegurar que los modelos cumplieran con las expectativas y requerimientos del proyecto.

Si los resultados eran aceptables, se consideraba finalizado el proceso; de lo contrario, se procedía a realizar los ajustes necesarios en base a las sugerencias recibidas..

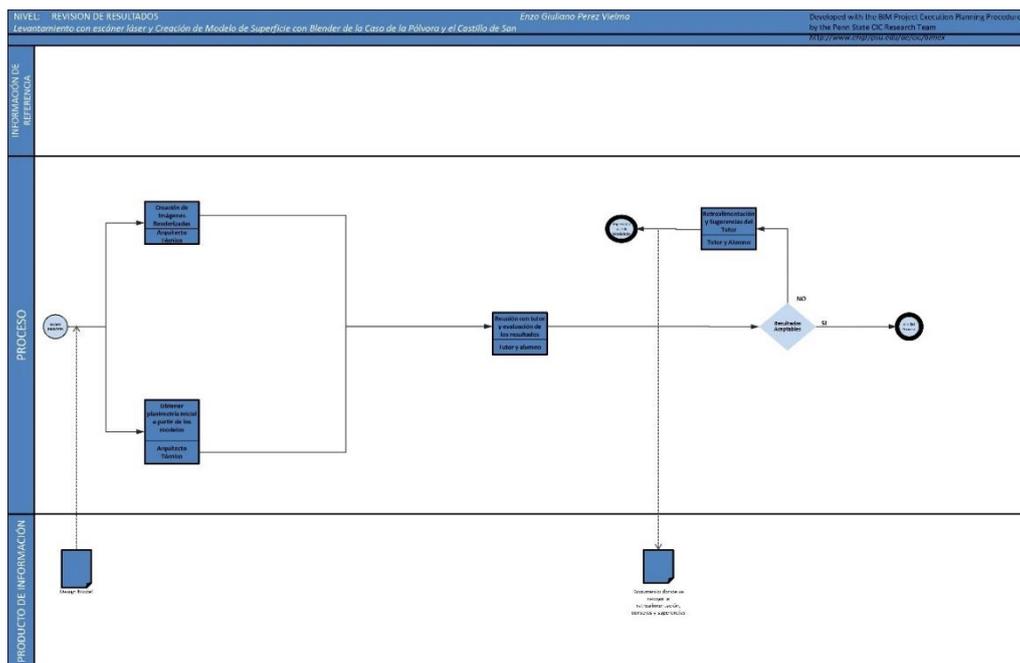


Figura 49: Revisión de Resultados

Conclusiones del trabajo experimental desarrollado

La metodología empleada en el proyecto de levantamiento y modelado de la Casa de la Pólvara y el Castillo de San Juan Bautista, a través de escaneo láser y modelado en Blender, demostró ser suficiente para conseguir los objetivos planteados y confirmar la hipótesis inicial sobre su viabilidad.

Una de las principales ventajas de estos flujos de trabajo es la precisión y fidelidad de los modelos digitales obtenidos; el uso del escáner Leica BLK 360 y el software

Cyclone 3DR permitió capturar detalles complejos de las edificaciones, mientras que Blender facilitó la creación y refinamiento de sólidos tridimensionales. La inclusión de texturas obtenidas de fotografías de alta resolución añadió un nivel de realismo significativo a los modelos, haciendo que estos sean útiles tanto para estudios técnicos como para la conservación visual del patrimonio.

Sin embargo, el proceso también presentó desafíos y limitaciones. La necesidad de ajustes iterativos y revisiones constantes implicó un consumo significativo de tiempo y recursos; además, la complejidad de las edificaciones y las condiciones del sitio en relación a la capacidad del equipo en los entornos exteriores requirieron una planificación y flexibilidad en la ejecución del trabajo de campo.

5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los modelos de superficie generados (Figura 50 y Figura 51) representan tanto las características geométricas visibles de ambas edificaciones, capturadas a través del escáner laser que produjo la nube de puntos, como también la apariencia de estas. Se considera que el modelo satisface los usos y aplicaciones que se enumeran a continuación:

1. **Documentación:** el modelo documenta la estructura, incluyendo elementos ornamentales de pequeñas dimensiones (molduras, rebordes, garitas y vigas).
Aporta información real de la apariencia actual de ambos inmuebles, permitiendo la identificación de los principales materiales e incluso, cuando la información fotográfica disponible lo permitió, evidencia patologías existentes en los elementos constructivos principales (muros, pilares, cubiertas).
También permite la obtención de planimetría del mismo a través de secciones horizontales y verticales realizadas sobre el modelo.
2. **Herramienta para facilitar la conservación y mantenimiento:** Su visualización por parte de equipos encargadas de la conservación y mantenimiento de estas edificaciones, puede facilitar sus tareas, mediante una interfaz de visualización con herramientas que permita la adición de notas, llamadas o comentarios en lugares a tratar, lo cual puede ser aprovechado para la planificación de las labores de intervención, prever la introducción y disposición de equipos o maquinaria.
3. **Creación de material audiovisual:** el modelo puede aprovecharse para generar, a través de métodos más avanzadas de animación 3D, material audiovisual con fines lúdicos, publicitarios o educativos.

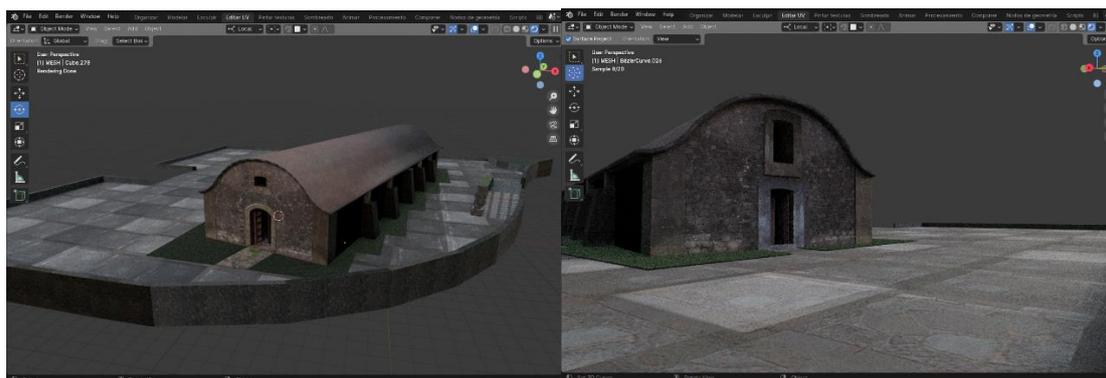


Figura 50: Captura de pantalla de Blender del modelo de superficie de la Casa de la Pólvara. (elaboración propia)

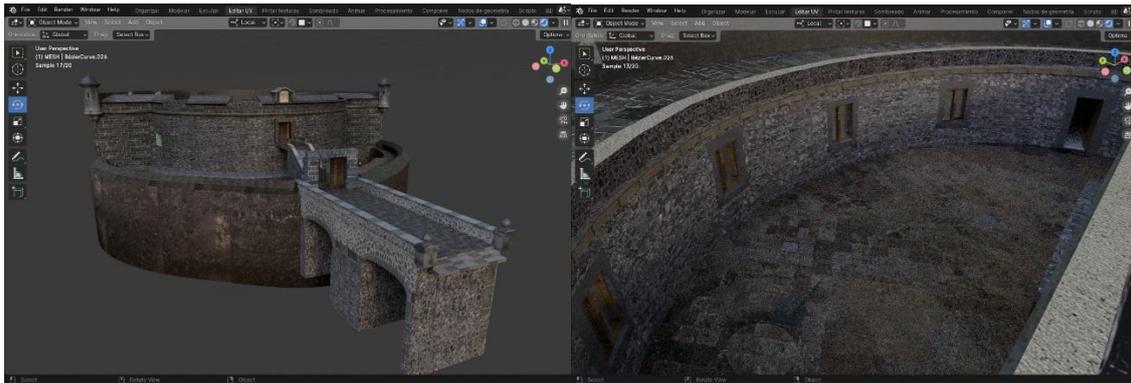


Figura 51: Captura de pantalla de Blender del modelo de superficie del Castillo de San Juan Bautista. (elaboración propia)

Resulta relevante destacar que este proceso requirió la adquisición de conocimientos de forma autodidacta sobre el uso de la interfaz y herramientas a utilizar, tanto de Cyclone 3DRR, como de Blender y Photoshop; esto se realizó de forma simultánea a la elaboración misma del modelo y atendía a las necesidades de modelado que surgían; Siendo posible a través de la lectura de documentación oficial, el visionado de videotutoriales y la investigación y búsqueda de experiencias compartidas por otros usuarios en la red. En cuanto al tiempo empleado para todo el proceso, incluyendo pruebas y rectificaciones, fue de aproximadamente nueve (9) semanas, con sesiones de alrededor de cuatro a seis horas diarias.

En cuanto a la información semántica del modelo podrían discutirse algunas consideraciones.

Entender la historia, uso y propósito de estas edificaciones permite discernir el nivel de detalle y enfocar las labores de digitalización hacia las partes que aportaban singularidad arquitectónica, como ornamentos y elementos constructivos únicos, de modo que los elementos más simples se gestionen de forma proporcional al impacto que tienen sobre la identidad que constituyen de ese bien, contando con la información suficiente para su modelado, mientras las más complejas serán más detalladas.

Por otro lado, tener conocimiento de trabajos de preservación y conservación realizadas anteriormente permite valorar y prestar especial atención a aquellas zonas en las cuales históricamente ha surgido la necesidad de intervención, lo cual podría estar asociado a la recurrencia de patologías sobre las cuales se lleva a cabo un plan de inspección y control periódico, para lo cual el modelo sería ideal como referencia visual, a la hora de localizar la zona o elemento que se pretende intervenir y mostrarlo a los que realizarán dichos trabajos, como por ejemplo el mantenimiento de la superficie de la cubierta de la casa de la pólvora, así como las carpinterías metálicas y de madera.

Con respecto a la creación del modelo de superficie mediante el modelado tridimensional en Blender también pueden discutirse aspectos relevantes.

Es importante resaltar que la identificación de los elementos constructivos se realiza a partir de la información visual disponible, su disposición uno con respecto a otro no toma en cuenta la existencia de singularidades en sus uniones interiores que no son visibles en las imágenes capturadas por el dispositivo o la observación in situ de la edificación y debido a la ausencia de información sobre su forma de construcción y sus métodos, se idealiza la unión de todos estos elementos y se ajusta con el fin de que su aspecto externo se asemeje a lo que puede observarse, que a los efectos de éste trabajo cumple con los objetivos planteados, viéndose limitado en el caos de que se desee utilizar como referencia para la reconstrucción total o parcial del mismo según su diseño original, en cuyo caso sería necesario determinar esos detalles invisibles.

El hecho de capturar las texturas directamente de las fotografías capturadas por el aparato aporta una funcionalidad y utilidad adicional a estos archivos generados por el dispositivo, además de que guarda información visual de carácter afín a los objetivos del modelo, no solo permite la identificación superficial del material, sino que también evidencia patologías visibles en el mismo, que dependiendo de si se posiciona la textura en la posición exacta donde se encuentra la patología esto aporta información útil a la hora de visualizar el modelo e identificar áreas se requiere mantenimiento.

En cuanto a las limitaciones podría considerarse que la precisión de los modelos está directamente relacionada con la calidad de los datos de entrada y las habilidades técnicas de los operadores. Además, la integración de tecnologías adicionales y la mejora continua en la capacitación del personal pueden aumentar significativamente la eficacia y precisión de estos proyectos.

6 CONCLUSIONES

El flujo de trabajo ha permitido generar dos modelos de superficie, cuyas dimensiones, características geométricas y aspecto visual son adecuados y representativos de las estructuras reales, cumpliendo con el objetivo principal planteado inicialmente y los objetivos específicos asociados.

El flujo de trabajo optimizado ha garantizado la captura y modelado eficaz de características y formas arquitectónicas complejas. Los detalles críticos han sido gestionados sin simplificar o disminuir considerablemente su representatividad. Esto ha sido posible gracias a la implementación de técnicas avanzadas en Blender, permitiendo modelar con alta precisión e incluso editar y modificar vértices, la unidad más pequeña y editable que compone la superficie de un sólido en Blender.

Los datos semánticos y métricos además de integrarse en el modelo, resultaron necesarios para encajar los distintos elementos constructivos entre sí. Por ejemplo, documentos históricos sobre la construcción de bóvedas de cañón ayudaron a comprender la relación entre los arcos de la cubierta y los contrafuertes de la Casa de la Pólvora, permitiendo entender las intersecciones de bóvedas en el Castillo de San Juan Bautista.

Es viable e interesante compartir y publicar el modelo en archivos digitales, permitiendo su visualización y recorrido, lo cual puede interesar a profesionales de distintas disciplinas e incluso al público general.

Las futuras investigaciones podrían centrarse en métodos avanzados de mapeo no invasivo, como ultrasonido y rayos X que permitan definir información no visible y que por tanto no pueden ser documentadas por un escáner láser o una cámara fotográfica; Esta información comprende uniones de elementos, conductos o cavidades ocultas, entre otros.

En cuanto a recomendaciones teóricas, se podría establecer un manual para un flujo de trabajo similar, equilibrando los medios disponibles con un plazo de tiempo razonable, enfocándose en herramientas específicas de cada software para lograr los objetivos.

Un enfoque más cualitativo podría determinar a nivel estadístico el margen de error entre el modelo de superficie y la nube de puntos o malla generada; también, los recientes avances en Inteligencia Artificial podrían aplicarse a este proceso, respondiendo a la necesidad de resolver de forma lógica las uniones de elementos estructurales, basado en la distribución de cargas más probable y en cómo los elementos se apoyaban entre sí según las prácticas comunes de la época y el periodo histórico.

7 LÍNEAS DE TRABAJO FUTURO

Con el fin de enriquecer aún más las aplicaciones sobre conservación y mantenimiento que tiene un modelo de superficie de una edificación histórica, se podría integrar una mayor cantidad de información semántica al modelo relativa a sus propiedades físicas y mecánicas; a través de métodos más sofisticados y tecnológicos para aumentar la cantidad de información semántica en los modelos.

Esto podría incluir el uso de medidores de transmitancia térmica para evaluar la eficiencia energética, medidores de humedad interna para monitorear el estado de conservación, y dispositivos para medir la porosidad y la reacción frente a las vibraciones.

Incluso, generar una base de datos con estas propiedades físicas y mecánicas y analizarlas en conjunto con el resto de variables en un momento determinado permitiría encontrar patrones de coincidencia y con ello crear modelos predictivos de comportamiento estructural, que puedan ser puestos a prueba en simulaciones de condiciones extremas o excepcionales, con el fin de prever el comportamiento y tomar acciones localizadas en donde sea más probable que ocurra un daño crítico.

Con respecto a la etapa de modelado, para mejorar la precisión y reducir los márgenes de error en futuros trabajos, se podrían integrar herramientas estadísticas avanzadas como SPSS en el flujo de trabajo, que permitan comparar las coordenadas de la nube de puntos para cada superficie con respecto a las coordenadas de los vértices de cada sólido creado en el modelo; Además, el uso de software adicional como AutoCAD para validaciones arquitectónicas y MeshLab para la optimización de mallas podría complementar el proceso de validación y ajuste de modelos 3D.

También se podrían incorporar algoritmos de Inteligencia Artificial y Machine Learning para automatizar la detección y corrección de errores en el modelado 3D. Esto incluiría la identificación automática de elementos estructurales y su relación lógica según las prácticas arquitectónicas históricas.

Igualmente, la información visual obtenida del láser podría complementarse con técnicas avanzadas de mapeo que permitan determinar datos no visibles como uniones internas entre elementos estructurales, cavidades o conductos sellados, estos podrían conseguirse mediante métodos no invasivos como rayos X, tomografías y otras tecnologías no invasivas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Carlos A; León-Robles, Juan F; Reinoso-Gordo, & Juan J; Gonzáles-Quiñones; (2018). Heritage Building Information Modeling (H-BIM) Applied to A Stone Bridge.
- Castellano-Román, M., & Pinto-Puerto, F; (2019). Dimensions and Levels of Knowledge in Heritage Building Information Modelling, HBIM: The model of the Charterhouse of Jerez (Cádiz, Spain). *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*, 14; <https://doi.org/10.1016/j.daach.2019.e00110>
- Chelaru, B., Onuțu, C., Ungureanu, G., & Șerbănoiu, A; A; (2024). Integration of point cloud, historical records, and condition assessment data in HBIM. *Automation in Construction*, 161, 105347; <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2024.105347>
- Croce, V., Caroti, G., De Luca, L., Jacquot, K., Piemonte, A., Veron, P., Jacquot, K., & Véron, P. (2021). From the Semantic Point Cloud to Heritage-Building Information Modeling: A Semiautomatic Approach Exploiting Machine Learning. 13(3), 461; <https://doi.org/10.3390/rs13030461>
- Cruz-Ramírez, L; C., Uribe-Piedras, V., & Zárate-Martínez, J; F; (2023). Modelos de nubes de puntos con Escáner Láser Terrestre (TLS) aplicado en el registro del patrimonio construido: Implicaciones del Flujo de trabajo en la calidad de los resultados. *Revista Arquitectura +*, 8(15), 37–52; <https://doi.org/10.5377/ARQUITECTURA.V8I15.16230>
- Díaz Gómez, F., Jiménez Peiró, J., Benavent, A; B., Asensi Recuenco, B., & Hervás Jua, J; (2015). View of 3D modeling for the generation of virtual heritage. *Virtual Archaeology Review*; <https://polipapers.upv.es/index.php/var/article/view/4150/4278>
- Edl, M., Mizerák, M., & Trojan, J; (2018); 3D LASER SCANNERS: HISTORY AND APPLICATIONS; *Acta Simulatio*, 4(4), 1–5; <https://doi.org/10.22306/ASIM.V4I4.54>
- J.C; Torres, P; Cano, J; Melero, M; España, & J; Moreno; (2010); Aplicaciones de la digitalización 3D del patrimonio; *Virtual Archaeology Review*; <https://polipapers.upv.es/index.php/var/article/view/4768/4902>
- Karasaka, L., Wang, Q., Zhang, B., & Ulutas, N; (2023). Point Cloud-Based Historical Building Information Modeling (H-BIM) in Urban Heritage Documentation Studies. *Sustainability* 2023, Vol; 15, Page 10726, 15(13), 10726; <https://doi.org/10.3390/SU151310726>
- Khoshelham, K; (2018). Smart heritage: Challenges in digitisation and spatial information modelling of historical buildings. *CEUR Workshop Proceedings*, 2230, 7–12; <https://doi.org/10.4230/LIPIcs.COARCH.2018>
- Lercari, N; (2016); Terrestrial Laser Scanning in the Age of Sensing; 3–33; https://doi.org/10.1007/978-3-319-40658-9_1
- M., B; D., W., D; R., & Mills, J; (2006); Laser Scanning; Barber, D; M., Dallas, R; W., & J Mills, o; P; (2006).

- Moyano, J., Gil-Arizón, I., Nieto-Julián, J; E., & Marín-García, D; (2022). Analysis and management of structural deformations through parametric models and HBIM workflow in architectural heritage. *Journal of Building Engineering*, 45; <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103274>
- Murphy, M., McGovern, E., & Pavia, S; (2013). Historic Building Information Modelling - Adding intelligence to laser and image based surveys of European classical architecture. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 76, 89–102; <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2012.11.006>
- Prado Costa, A., Regina, A., Cuperschmid, M., & Oliveira Neves, L. (2024); HBIM and BEM association: Systematic literature review; *Journal of Cultural Heritage*, 66, 551–561; <https://doi.org/10.1016/j.culher.2024.01.008>
- Xu, Y., & Stilla, U; (2021). Toward Building and Civil Infrastructure Reconstruction from Point Clouds: A Review on Data and Key Techniques. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 14, 2857–2885.
- Díaz Rodríguez, C., Ramos Acosta, P., y Hernández Martínez, F. (2019). Refuncionalización de edificaciones históricas en las áreas centrales de La Habana y Quito. *REDALYC*, 6(58), 130-145; <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=376858947008>
- García, J., Martín, E., y Hernández, L; (2019); Historia y evolución de las fortificaciones costeras en Tenerife; *Revista de Arquitectura Militar*, 10(2), 45-63.
- Ortiz García, C; (2004). La evolución de las defensas en Canarias: El caso de la Casa de la Pólvora. *Boletín del Museo Militar de Canarias*, 5(1), 22-34.
- Pérez, M., Gómez, A., y García, R; (2019); Islas, migración y criollización: Canarias desde un enfoque descolonial; *REDALYC*, 7(33), 210-225;
- Anaya Hernández, L.A (1982) Repercusiones del curso berberisco en Canarias durante el siglo XVII: Cautivos y renegados canarios, *Coloquio de historia Canario-Americana*, volumen 2, pag 123-178.
- Camarero Bullón, C. (1998) Descripción geográfica de las Islas Canarias de Antonio Riviere. *Estudios Geográficos*, 59 (231), 345-354, recuperado de: La descripción geográfica de las Islas Canarias de Antonio Riviere | *Estudios Geográficos* (csic.es)
- Díaz Lorenzo, J.C (2023) La casa de la Pólvora de Santa Cruz de Tenerife (1758). Puente de mando, *La Casa de la Pólvora de Santa Cruz de Tenerife (1758) | Puente de Mando* - Juan Carlos Díaz, Consultado el 19 de marzo de 2024.
- Díaz Villanueva, F. (2021) Piratas en Canarias [Video], https://www.youtube.com/watch?v=Ag_y-wdAj4U, consultado el 10 de marzo de 2024
- Ferreiro, M.A (2017) Cuando Nelso perdió un brazo en Tenerife y la Royal Navy fue derrotada, *El reto Histórico Cuando Nelson perdió un brazo en Tenerife y la Royal Navy fue derrotada* (elretohistorico.com) consultado el 11 de marzo de 2024.

- Fortera Pérez, J.I et al (2021). Monarquías en conflicto, Linajes y noblezas en la articulación de la monarquía Hispánica. Fundación Española de Historia Moderna, Universidad de Cantabria, 39, (1), 9-34. <http://hdl.handle.net/10261/197999>
- García Barba, F; (2012). Orígenes Urbanos de Santa Cruz de Tenerife, recuperado de ORÍGENES URBANOS DE SANTA CRUZ DE TENERIFE | García Barba - Islas Territorio (garciabarba.com), el 05 de marzo de 2024.
- García Montes de Oca, A., & Rodríguez Illescas, J; M; (2022). Transcripción de un conjunto documental relativo a la fortificación del lugar y puerto de Santa Cruz de Tenerife entre 1655 y 1657, y relación de la batalla de Santa Cruz de 30 de abril de 1657, por Alonso Dávila y Guzmán. Revista de Historia Canaria, 204.
- Gayubas. A (2024), España en el siglo XVII, Enciclopedia Humanidades, España en el siglo XVII: acontecimientos y características (humanidades.com), consultado: 4 marzo 2024.
- Gerencia de Urbanismo, Ayuntamiento de Santa Cruz de Tenerife (2020) Santa Cruz deTenerife en el Siglo XVIII, Santa Cruz de Tenerife en el siglo XVIII | Gerencia de Urbanismo de Santa Cruz de Tenerife (urbanismosantacruz.es)
- Gobierno de Canarias, (s.f) Castillo de San Juan de Bautista, Castillo de San Juan Bautista - CanariWiki (gobiernodecanarias.org), consultado: 4 de marzo de 2024
- Noriega Agüero, M. A (2014) Tertulia Amigos del 25 de Julio, 6 de noviembre de 1706: El ataque de John Jennings a Tenerife (amigos25julio.com) consultado: 11 de marzo de 2024
- Suárez, J.H (2018), La colonialidad en la historia de Canarias, ¡Alegando! ¡Magazine, La colonialidad en la Historia de Canarias - Alegando! Magazine

ANEXOS

ANEXO I: ARCHIVOS NATIVOS

https://drive.google.com/drive/folders/1BboRbFyEGIG_YLWu8EuMJmAC-gp_Wz4n?usp=sharing



ANEXO II: FLUJO DE TRABAJO

NIVEL: PLANIFICACIÓN DEL PROCESO O FLUJO DE TRABAJO

Enzo Giuliano Perez Vielma

Developed with the BIM Project Execution Planning Procedure by the Penn State CIC Research Team

Levantamiento con escáner láser y Creación de Modelo de Superficie con Blender de la Casa de la Pólvara y el Castillo de San

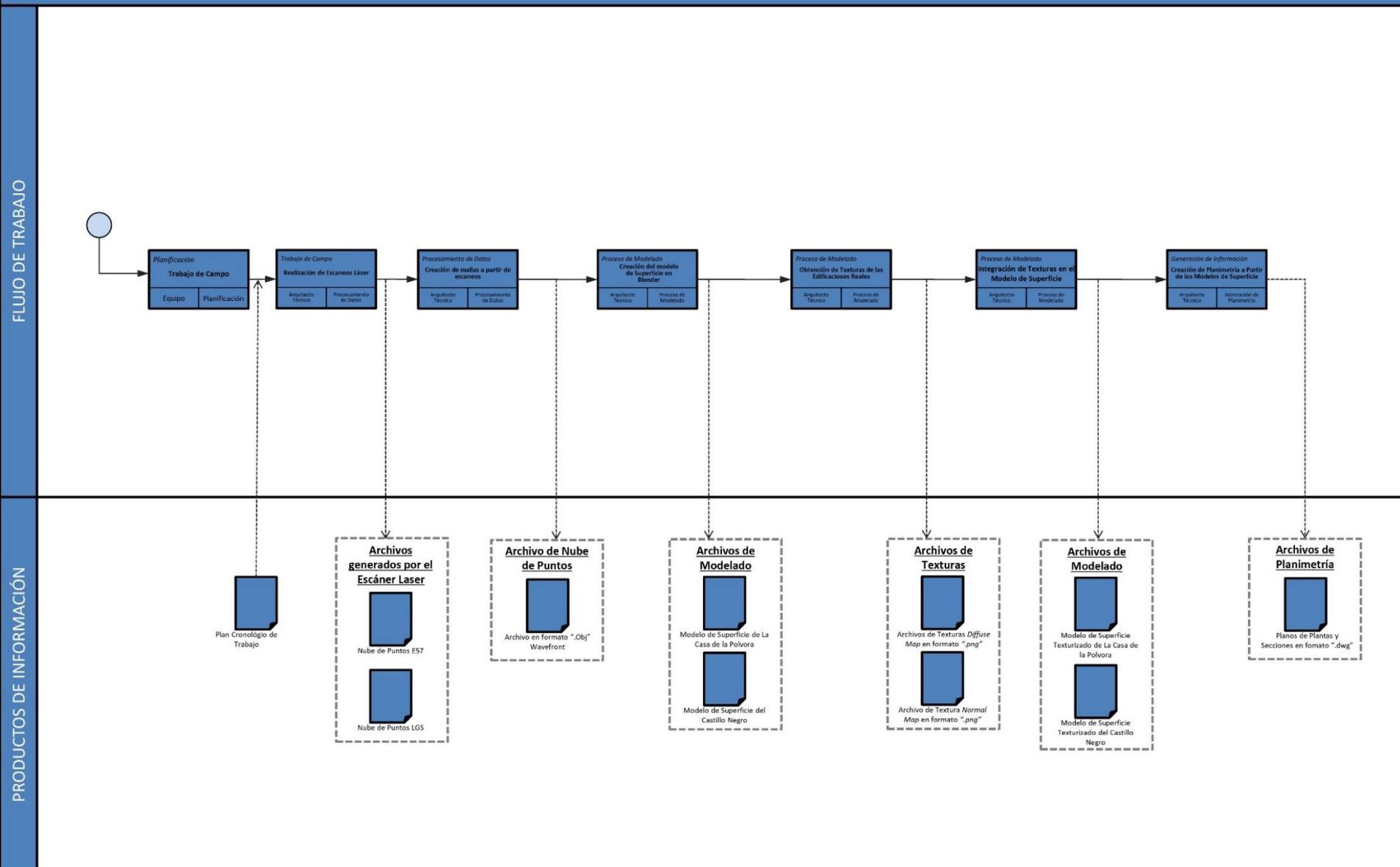


Figura 45: Flujo de Trabajo general

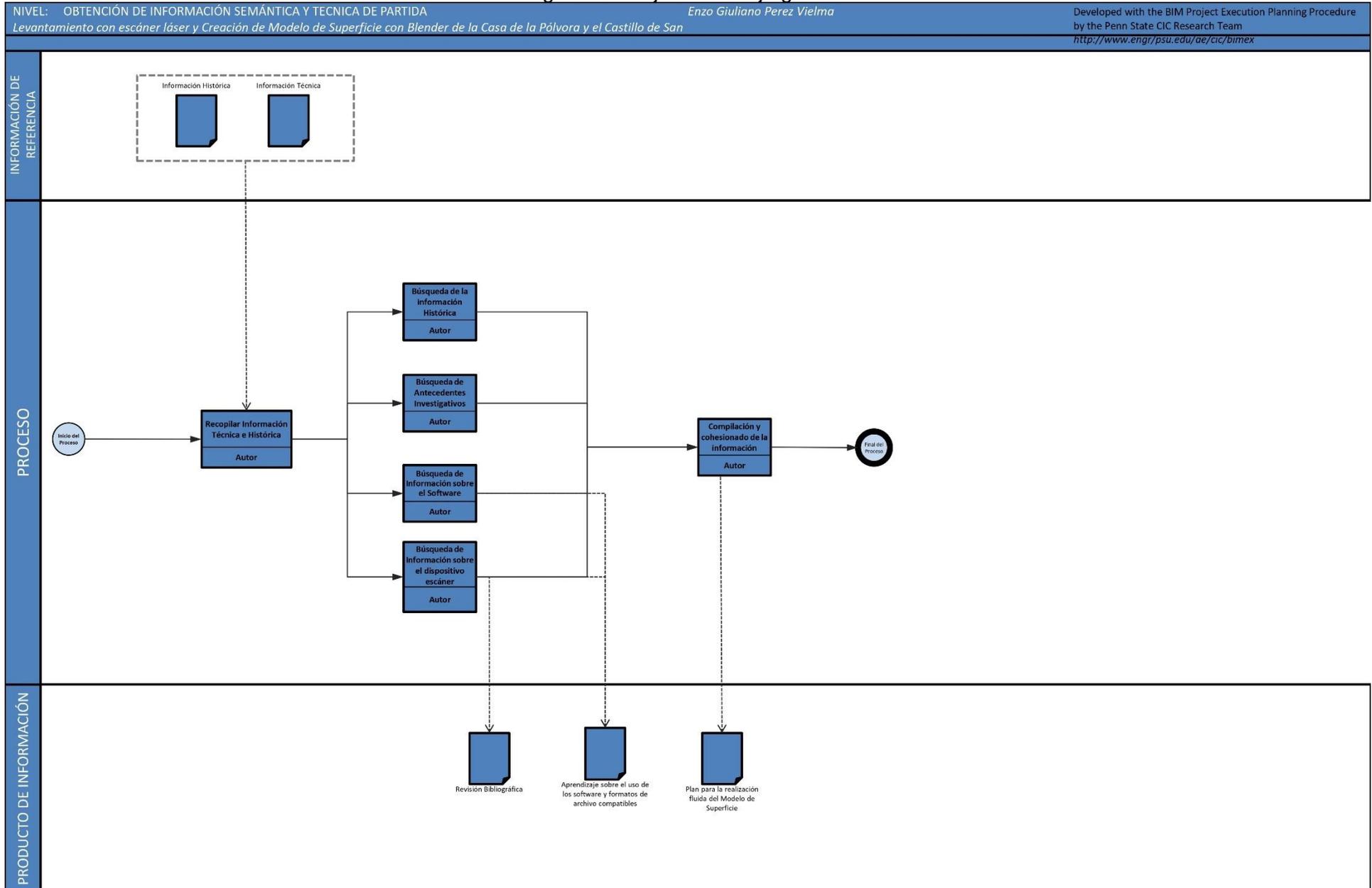


Figura 46: Nivel de obtención de la información semántica y técnica de partida.

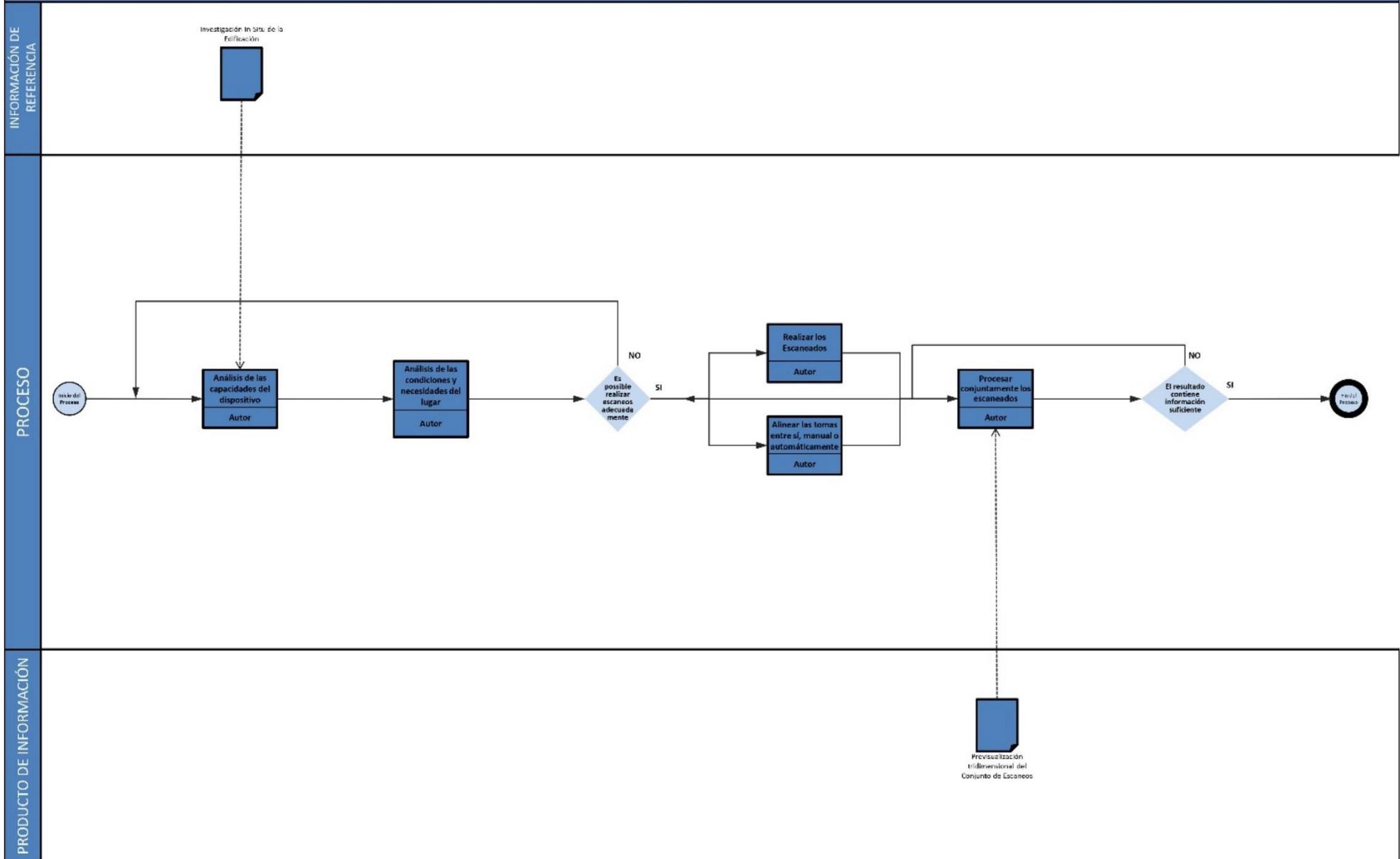
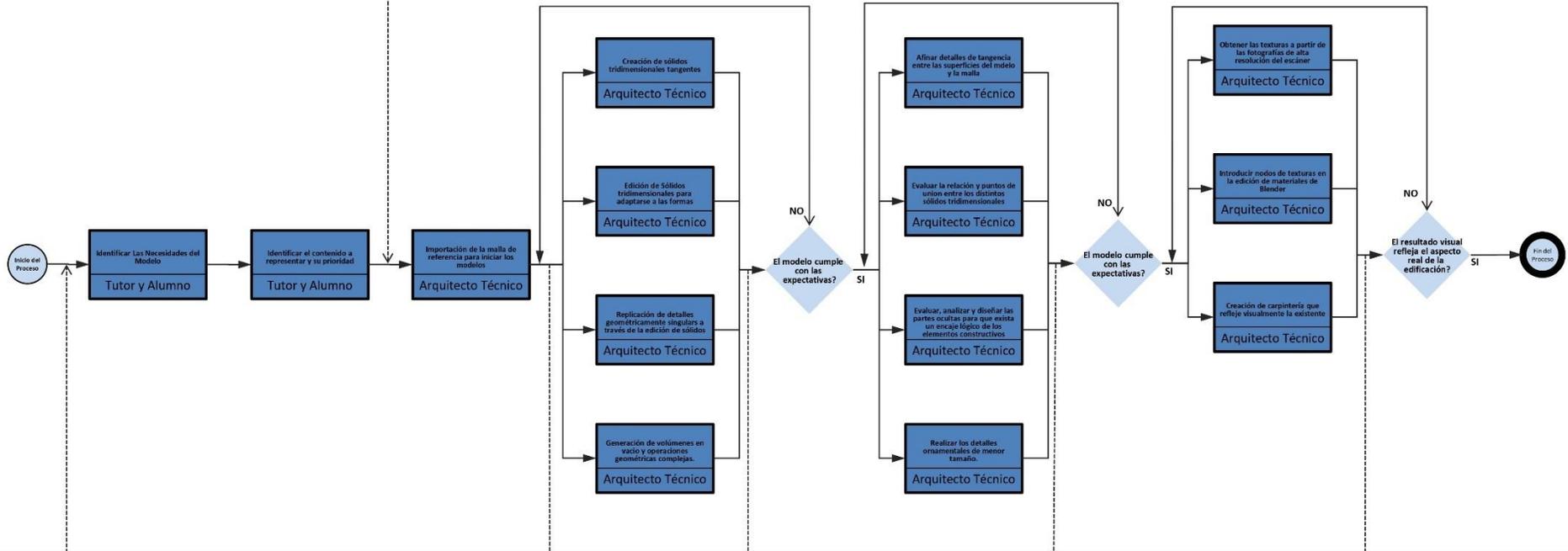


Figura 47: Nivel de análisis de las condiciones del sitio

INFORMACIÓN DE REFERENCIA



PROCESO



PRODUCTO DE INFORMACIÓN



Programación del Proyecto



Archivo inicial con la malla importada dentro del entorno de Blender

Modelo de Superficie Esquemático



Archivo de Malla original en formato ".blend"
 Archivo con información de sólidos geométricos en formato ".blend"

Modelo de Superficie Detallado



Archivo de Malla original en formato ".blend"
 Archivo con información de sólidos geométricos en formato ".blend"

Modelo de Superficie Detallado y Texturizado



Archivos para la creación de Texturas Detalladas, Mapas de Difusión y Mapas de Normales en formato ".png"
 Archivo con Modelo de Superficie Texturizado en formato ".blend"

Figura 48: Fase del proceso de Modelado.

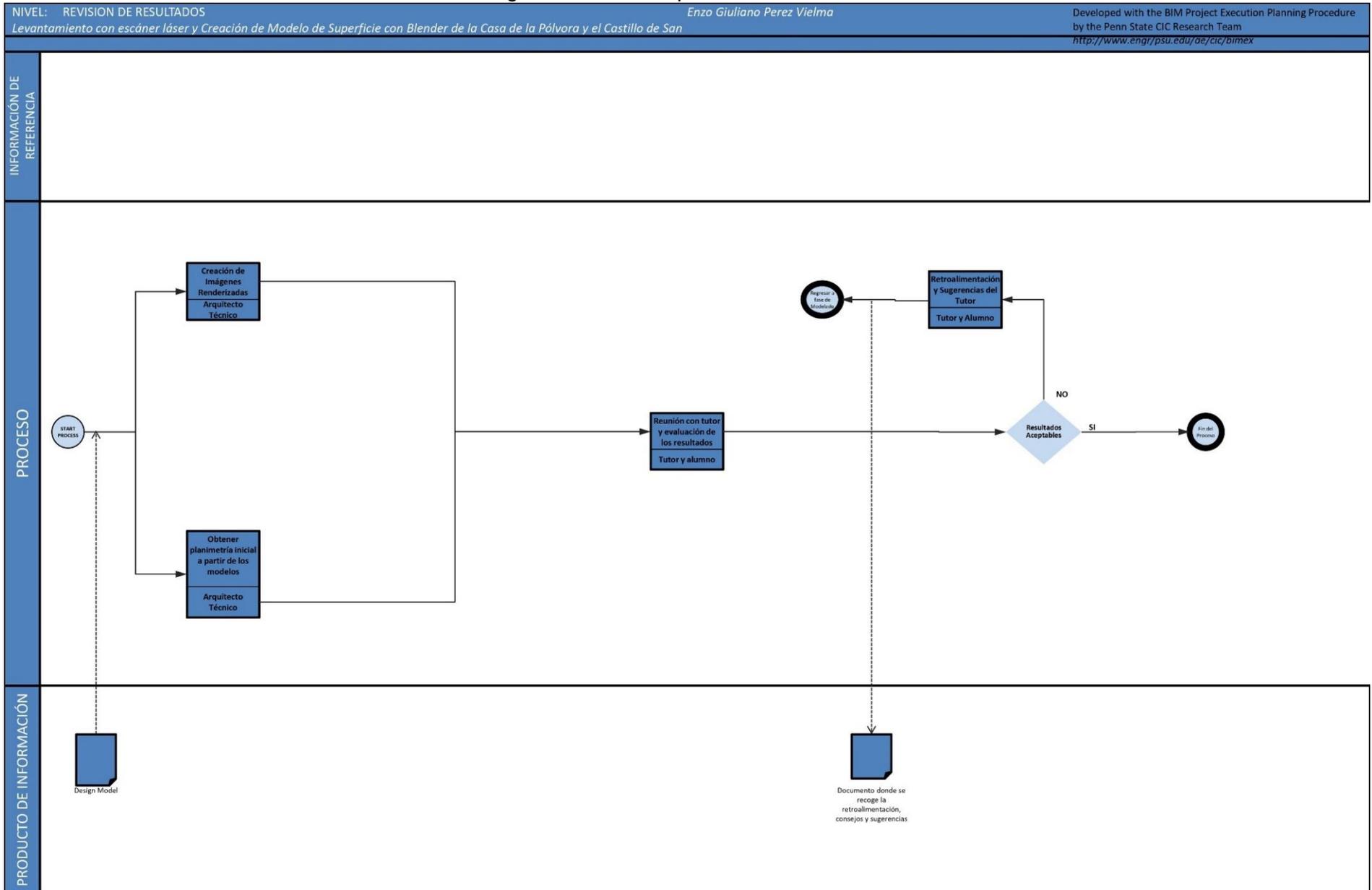
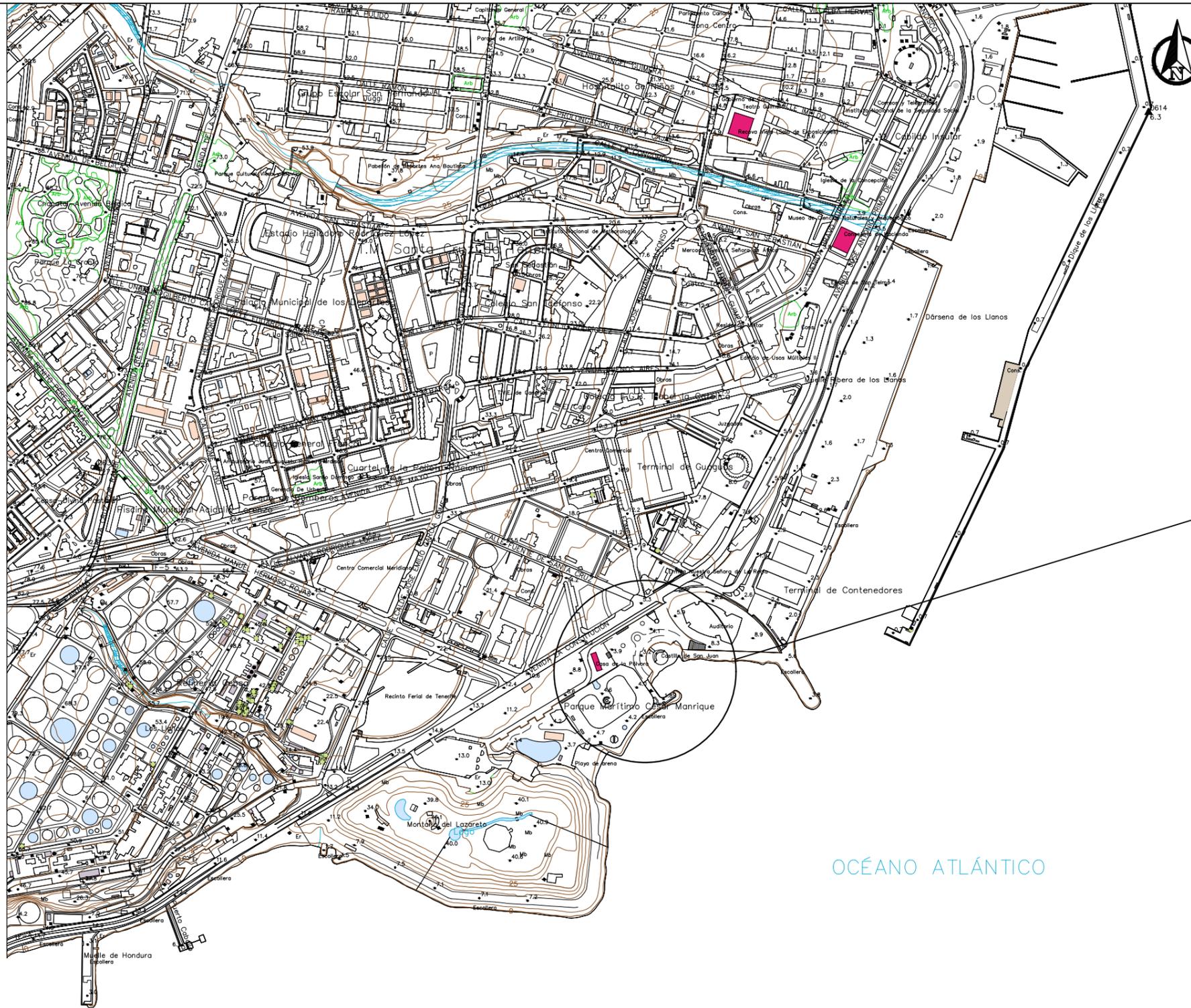


Figura 49: Revisión de Resultados

ANEXO III: PLANOS

1. Situación
2. Emplazamiento
3. Castillo de San Juan Bautista – Planta
4. Castillo de San Juan Bautista – Secciones Longitudinales
5. Castillo de San Juan Bautista - Secciones Transversales
6. Castillo de San Juan Bautista - Fachada Norte
7. Castillo de San Juan Bautista - Fachada Este, Oeste y Sur
8. Castillo de San Juan Bautista - Cubierta
9. Casa de La Pólvora - Cubierta y Secciones
10. Casa de La Pólvora - Sección Longitudinal y Transversal
11. Casa de La Pólvora – Alzados
12. Casa de La Pólvora – Cubiertas
13. Castillo de San Juan Bautista – Isometría y Perspectiva
14. Casa de la Pólvora – Isometría y Perspectiva

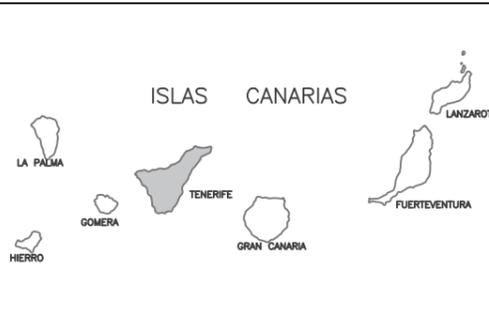


Zona Cabo Llanos
Santa Cruz de Tenerife

COORDENADAS

377.377,99m
3.148.294,05m
1,48m
(28.455354,-16.252351)
(28°27'19,58'')
(16°15'08,61'')

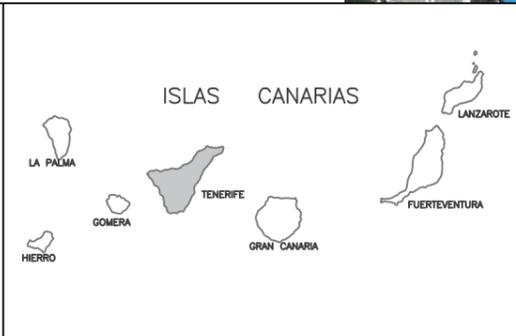
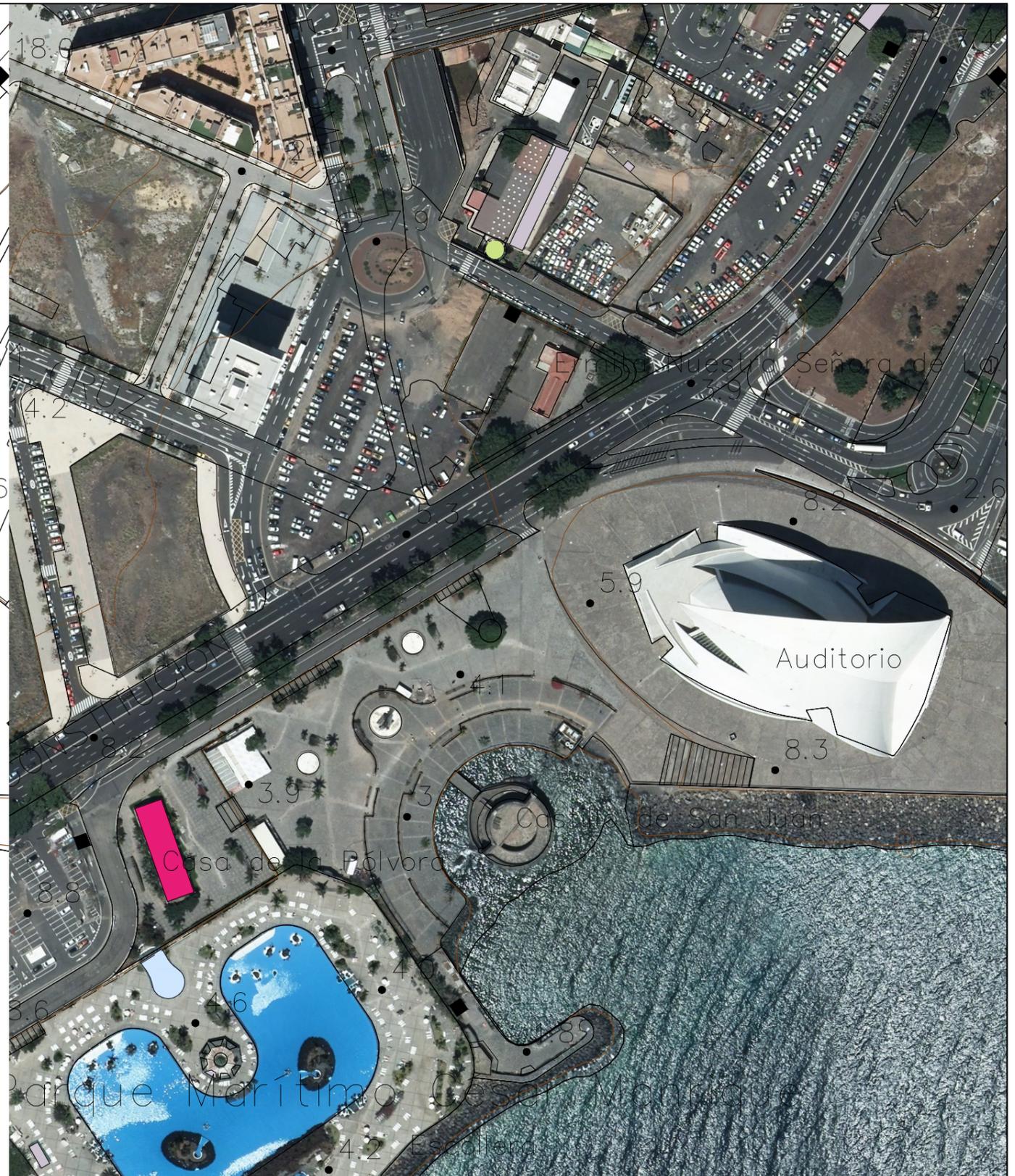
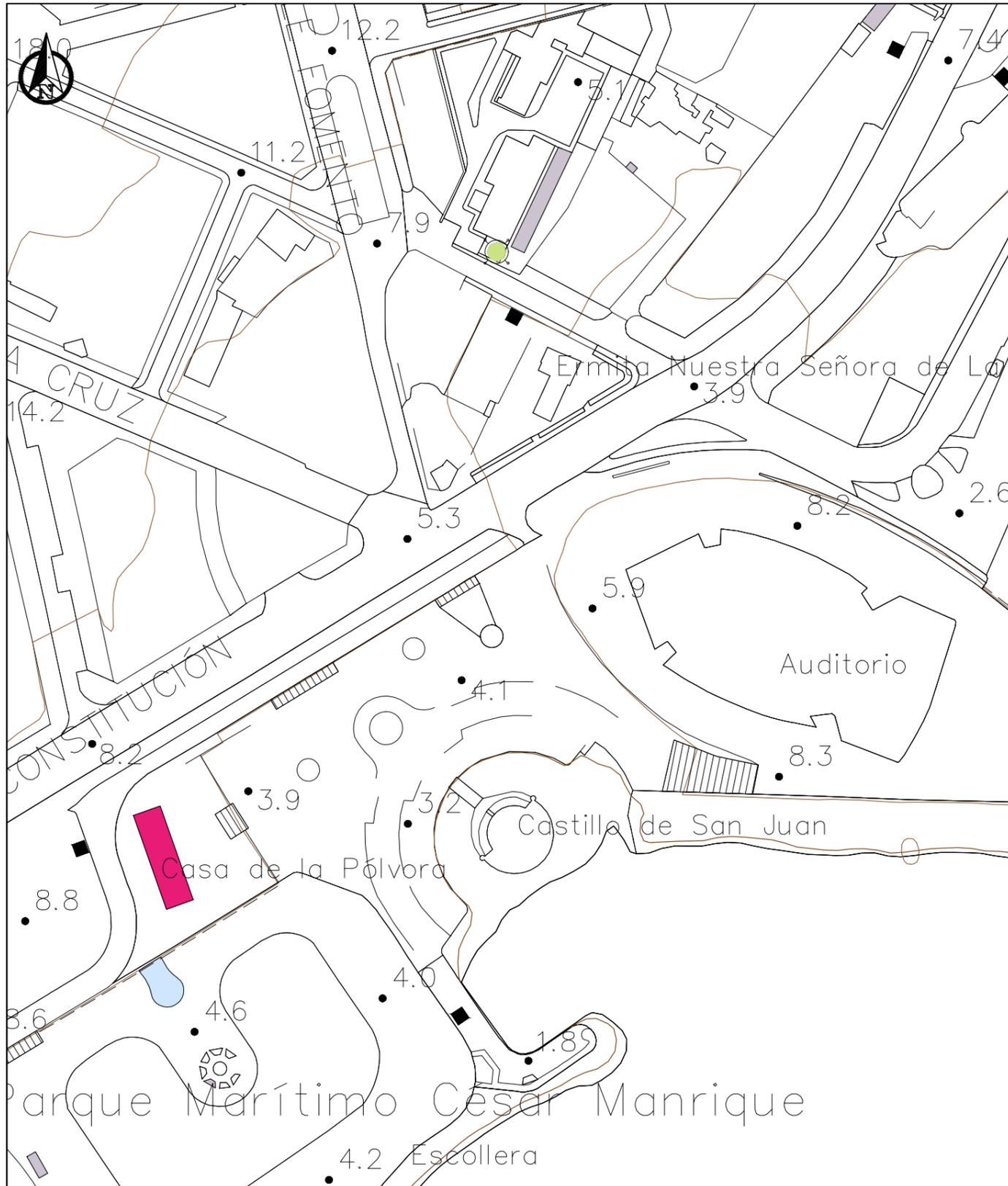
OCEANO ATLANTICO



MÁSTER EN GESTIÓN E INNOVACIÓN TECNOLÓGICA EN LA CONSTRUCCIÓN

Dibujado	Fecha	Autor	ESCUELA DE DOCTORADO Y ESTUDIOS DE POSGRADO TRABAJO FIN DE MÁSTER Universidad de La Laguna
Comprobado	JUL-2024	Enzo Giuliano Perez Vielma	
Id. s. normas	JUL-2024	UNE-EN-DIN	

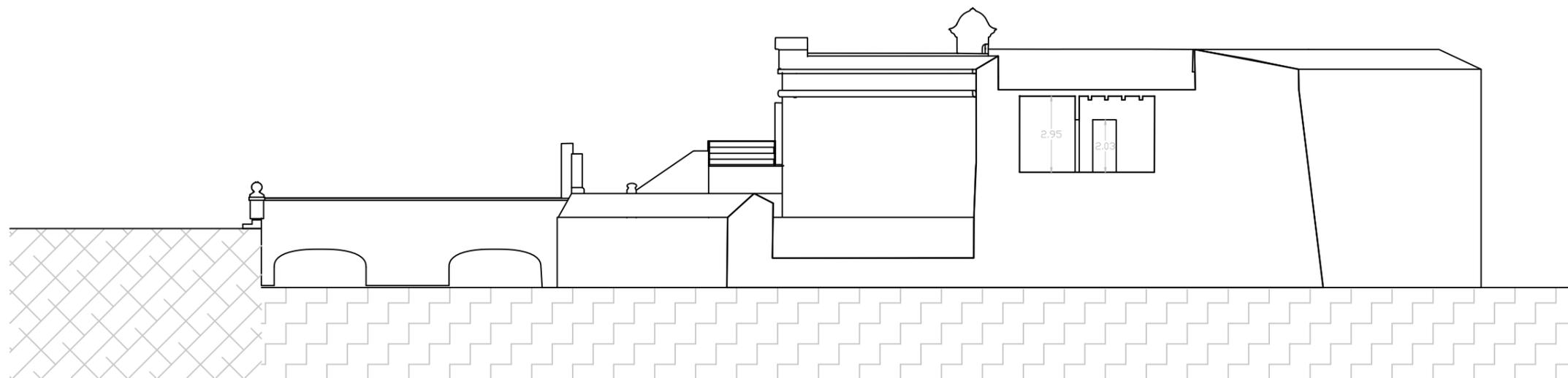
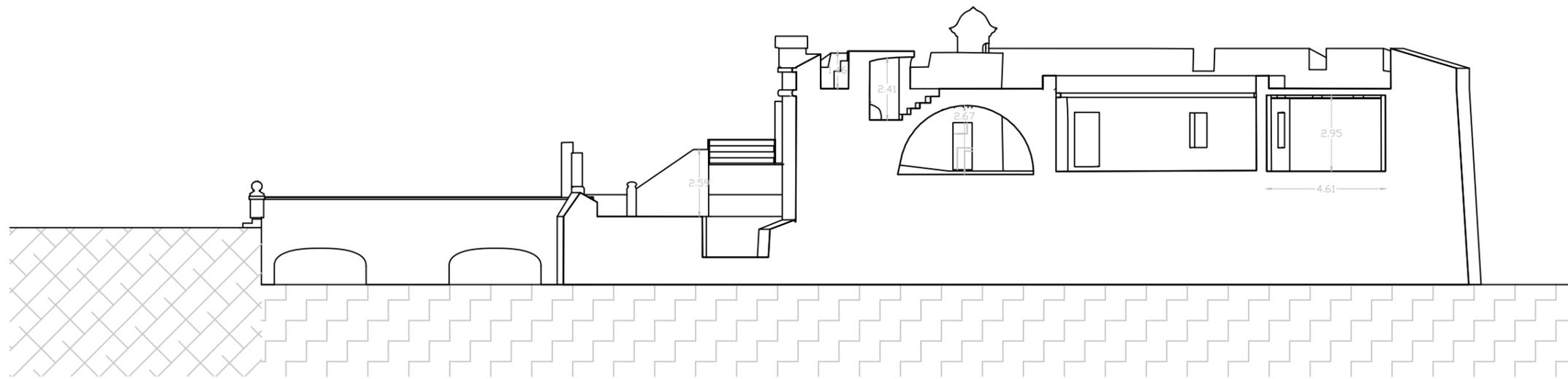
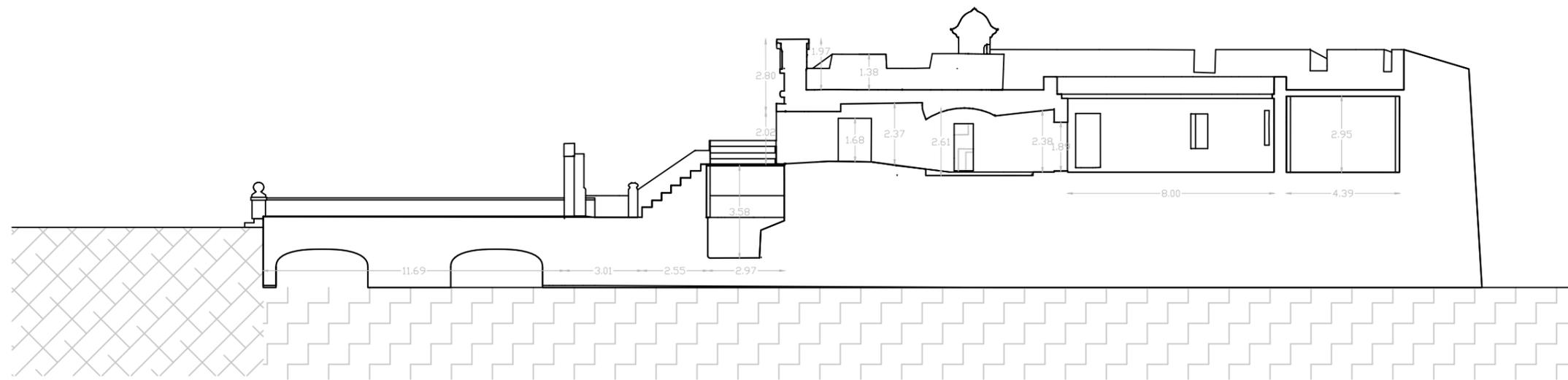
ESCALA: 1:10000	PLANO DE SITUACIÓN	Nº P. : 1 Nom.Arch: .dwg
--------------------	--------------------	-----------------------------

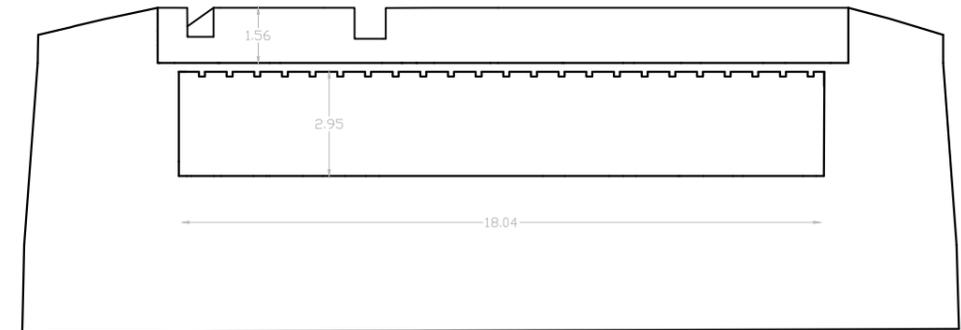
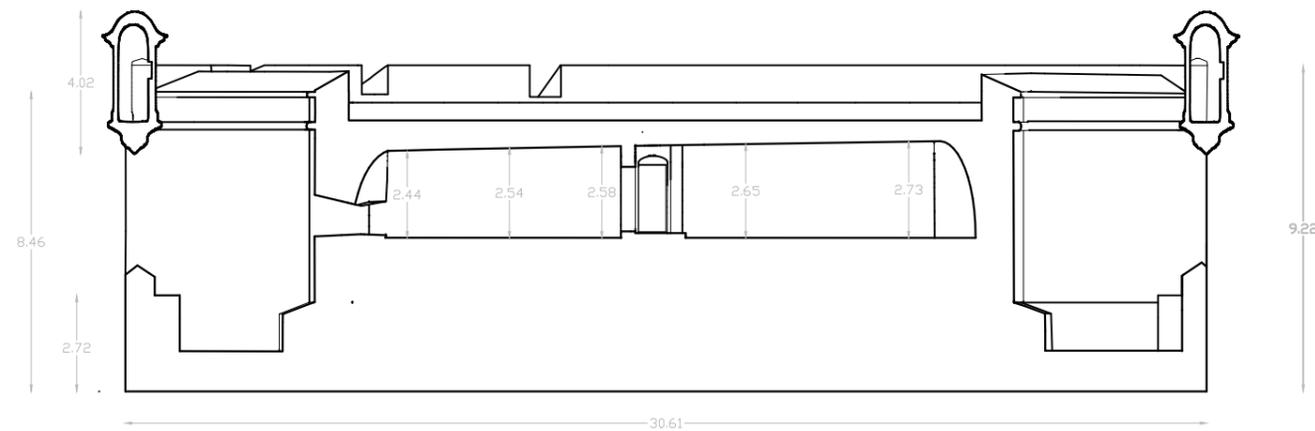
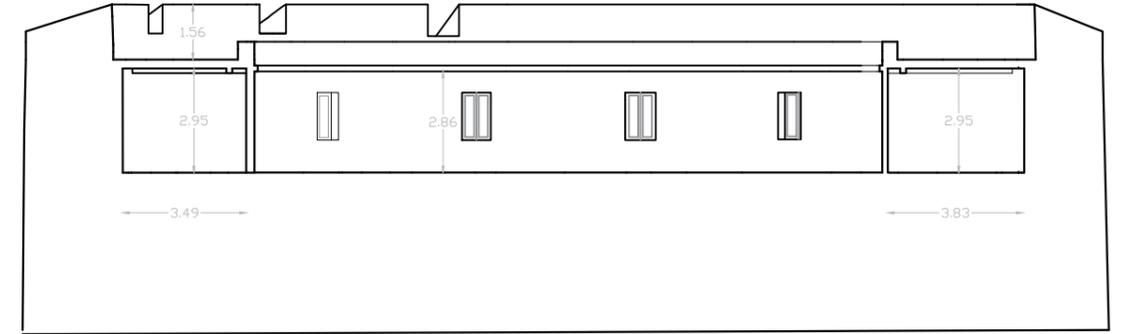
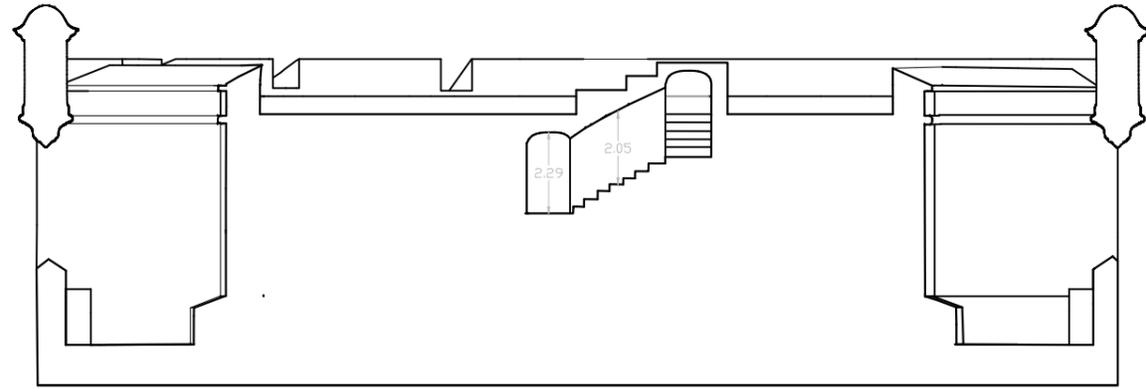


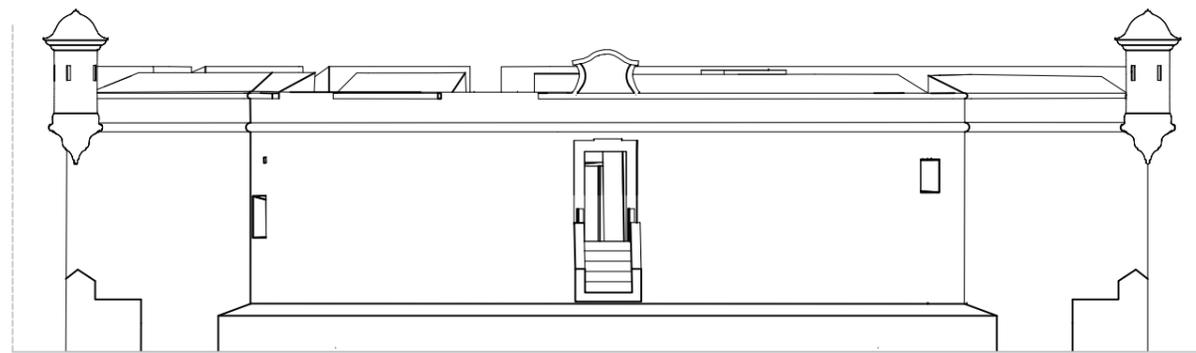
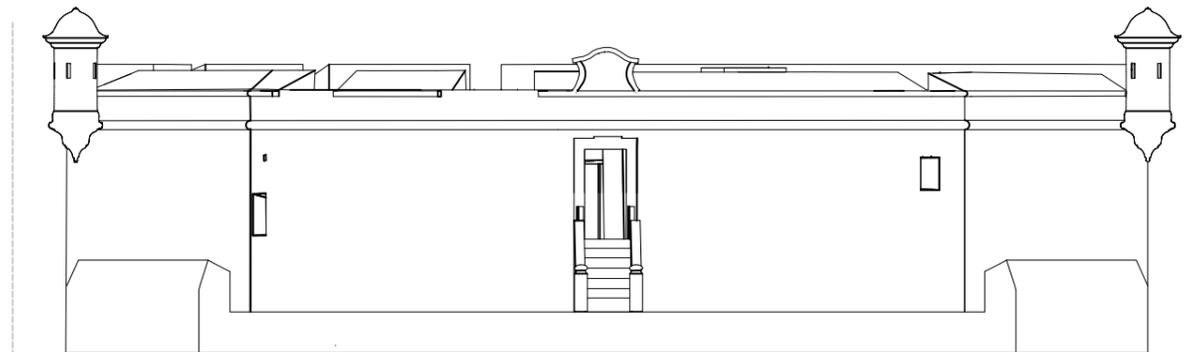
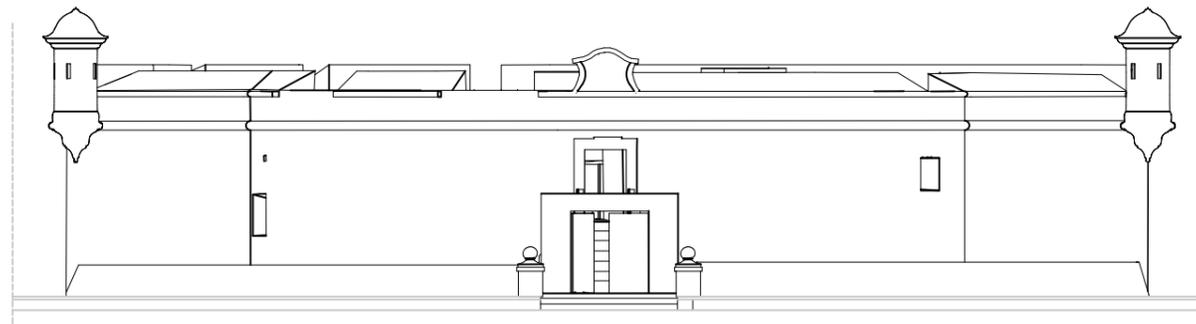
MÁSTER EN GESTIÓN E INNOVACIÓN TECNOLÓGICA EN LA CONSTRUCCIÓN

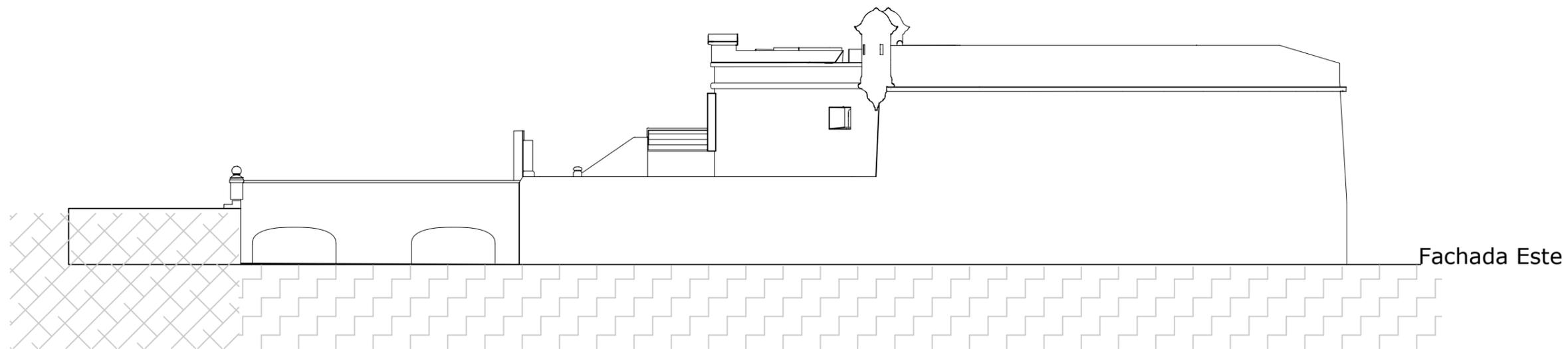
	Fecha	Autor	ESCUELA DE DOCTORADO Y ESTUDIOS DE POSGRADO TRABAJO FIN DE MÁSTER Universidad de La Laguna
Dibujado	JUL-2024	Enzo Giuliano Perez Vielma	
Comprobado	JUL-2024		
Id. s. normas	UNE-EN-DIN		

ESCALA: 1:2000	PLANO DE EMPLAZAMIENTO	Nº P. : 2 Nom.Arch: .dwg
-------------------	------------------------	-----------------------------

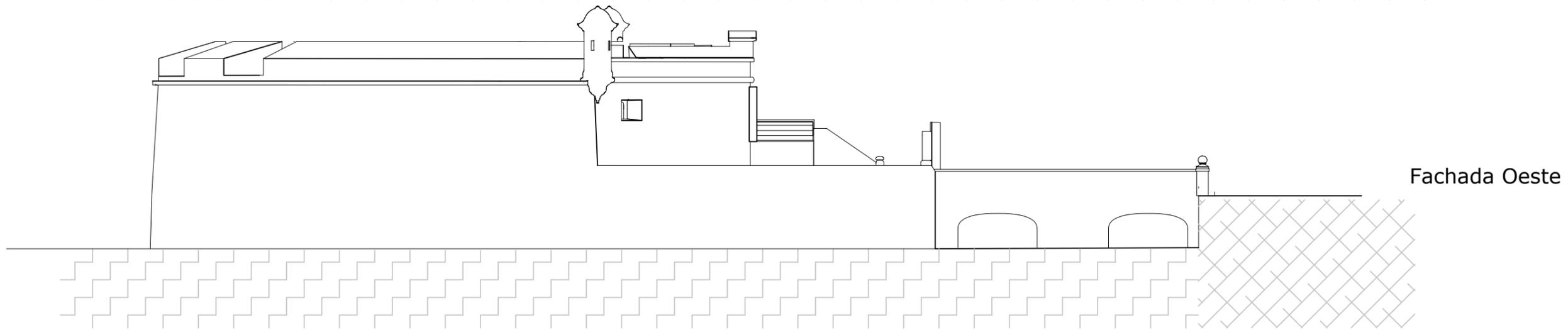




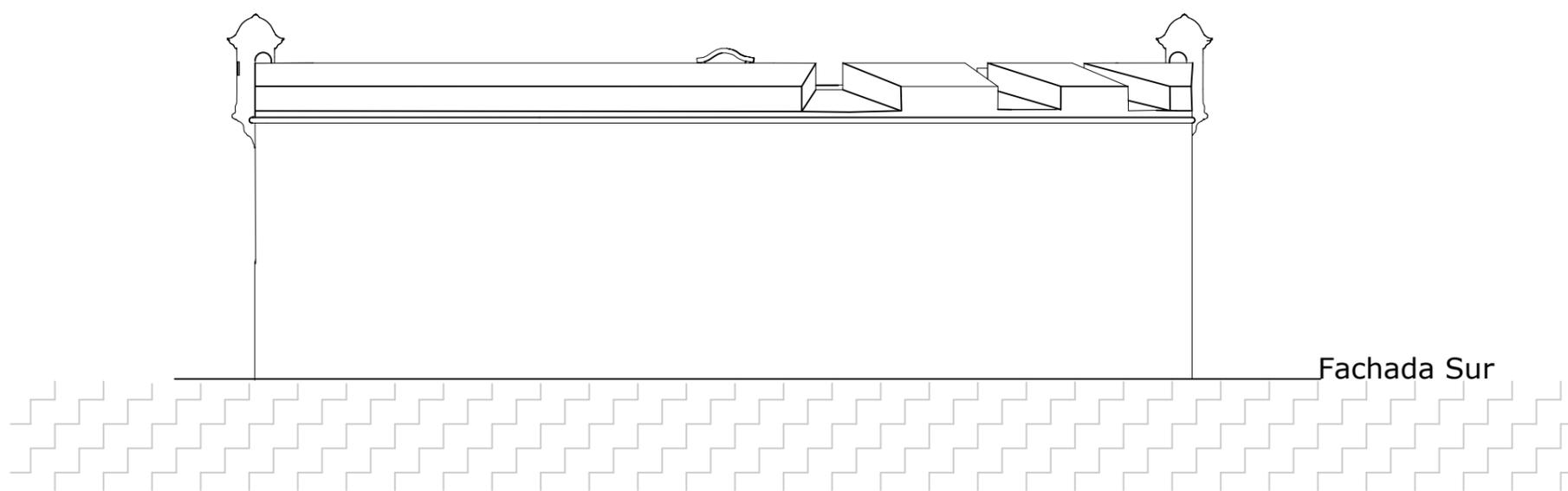




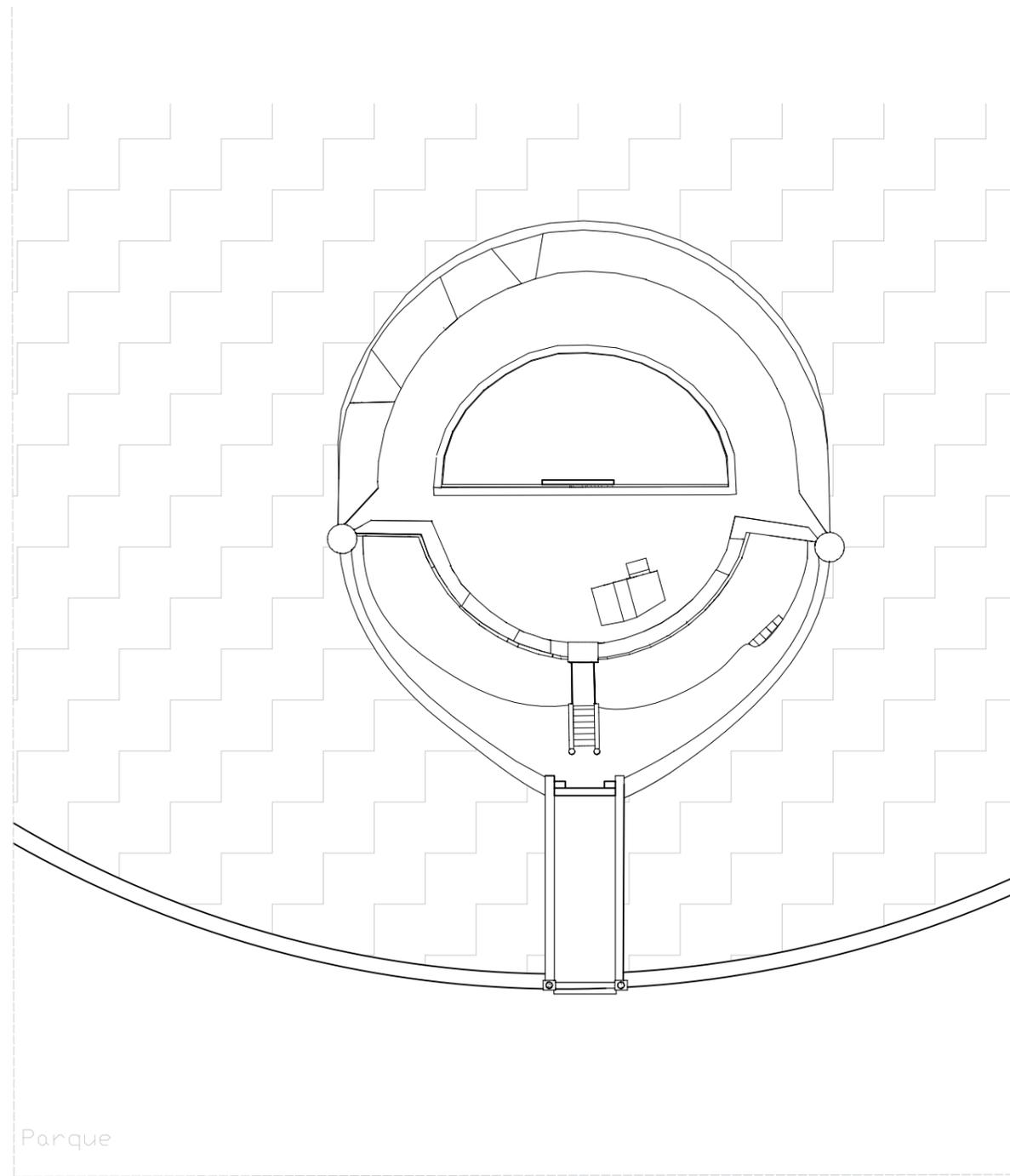
Fachada Este

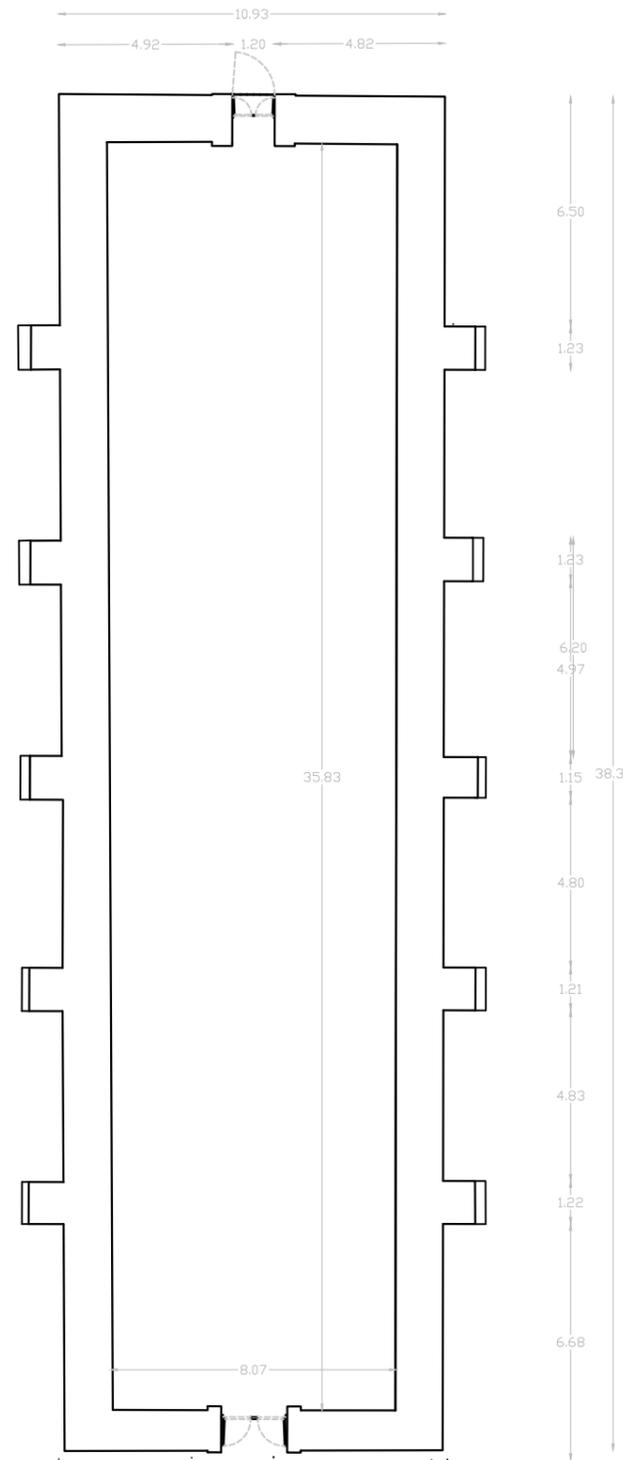
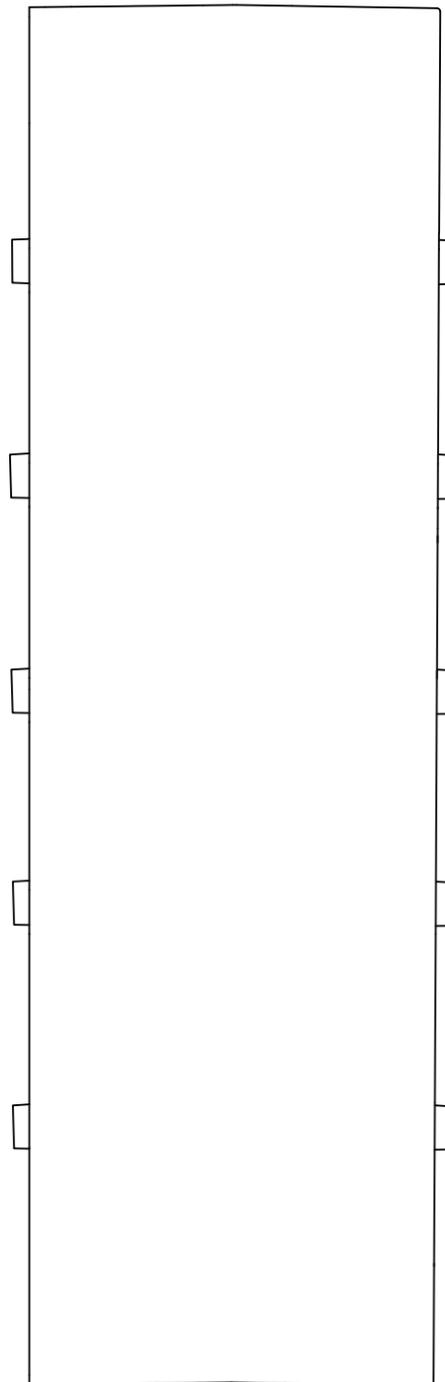


Fachada Oeste

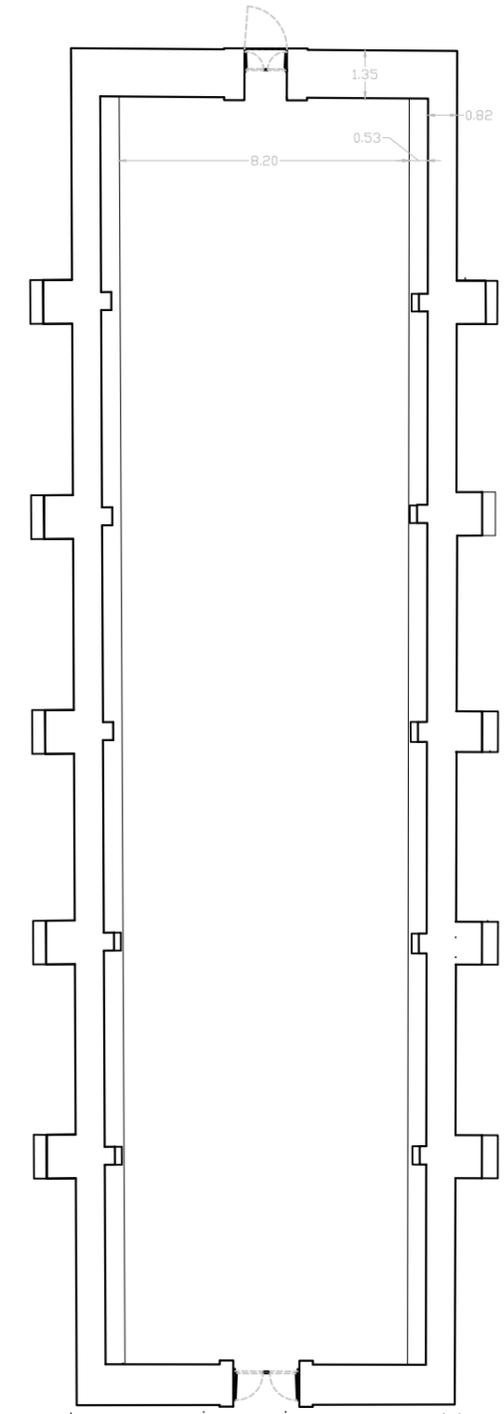


Fachada Sur

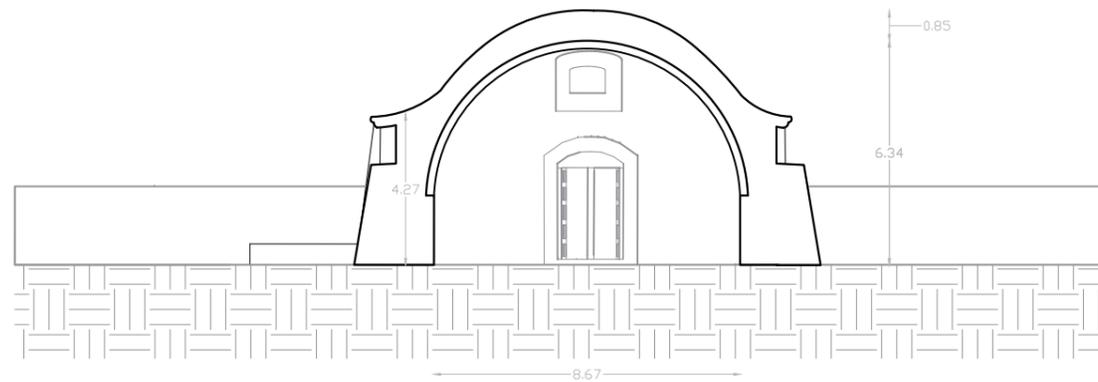
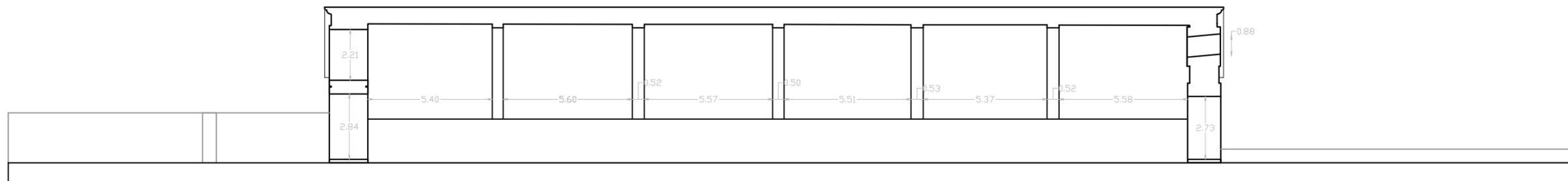


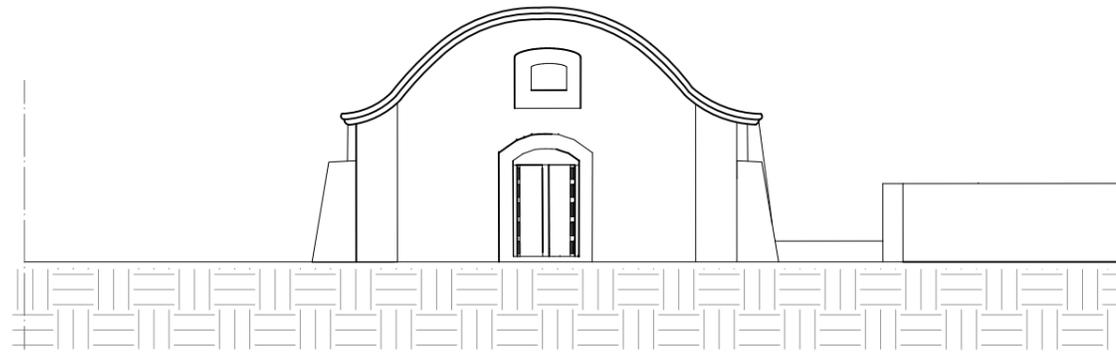


h=0.5 m

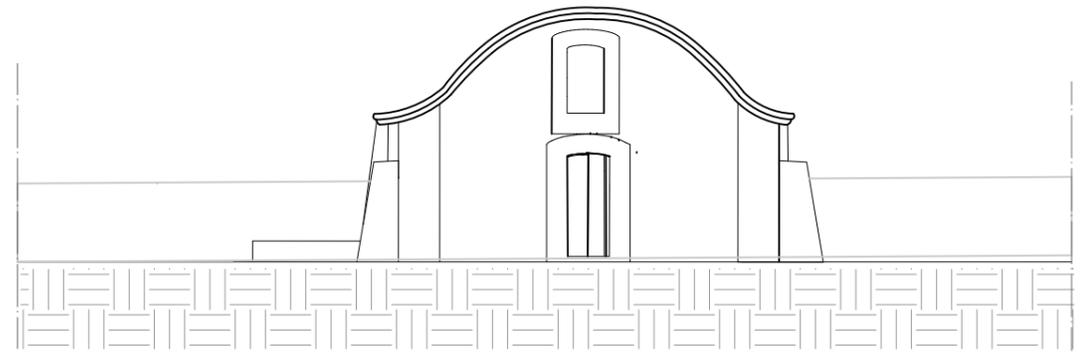


h=1.8 m

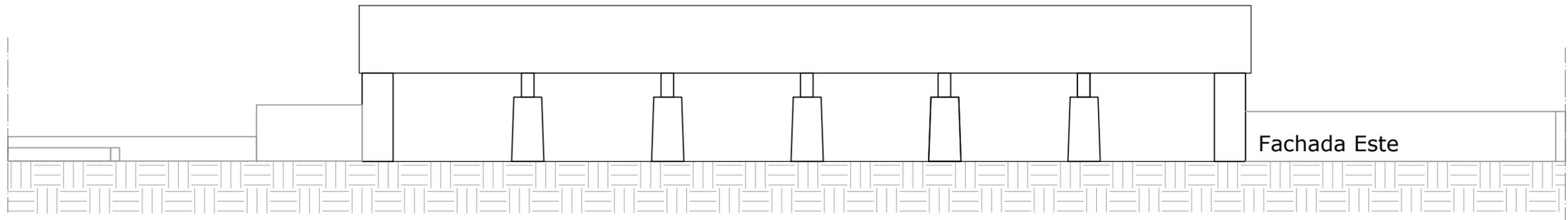




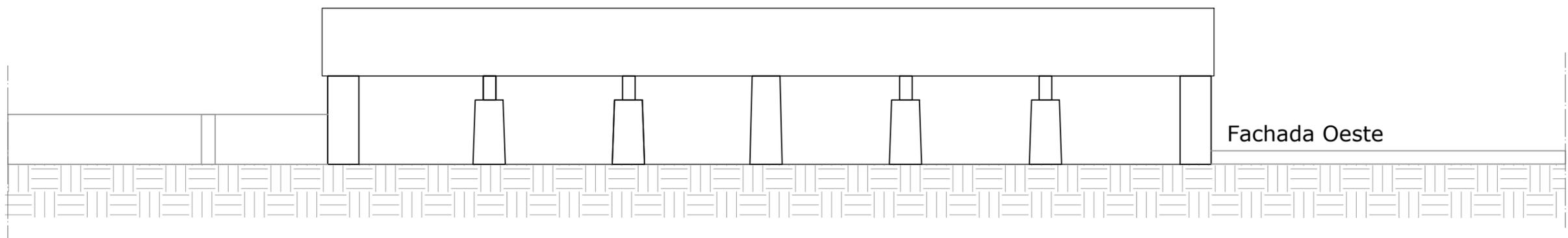
Fachada Norte



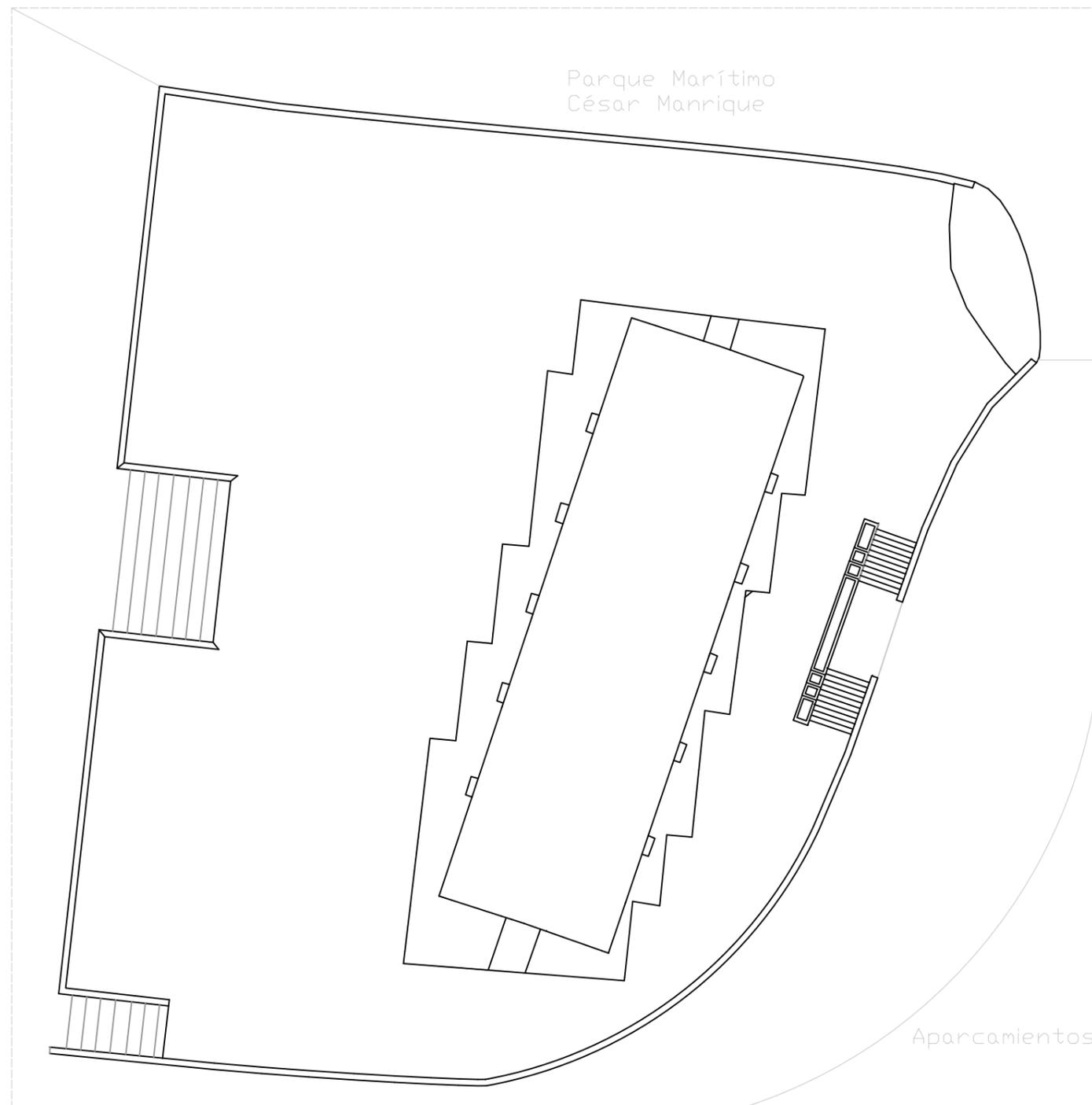
Fachada Sur

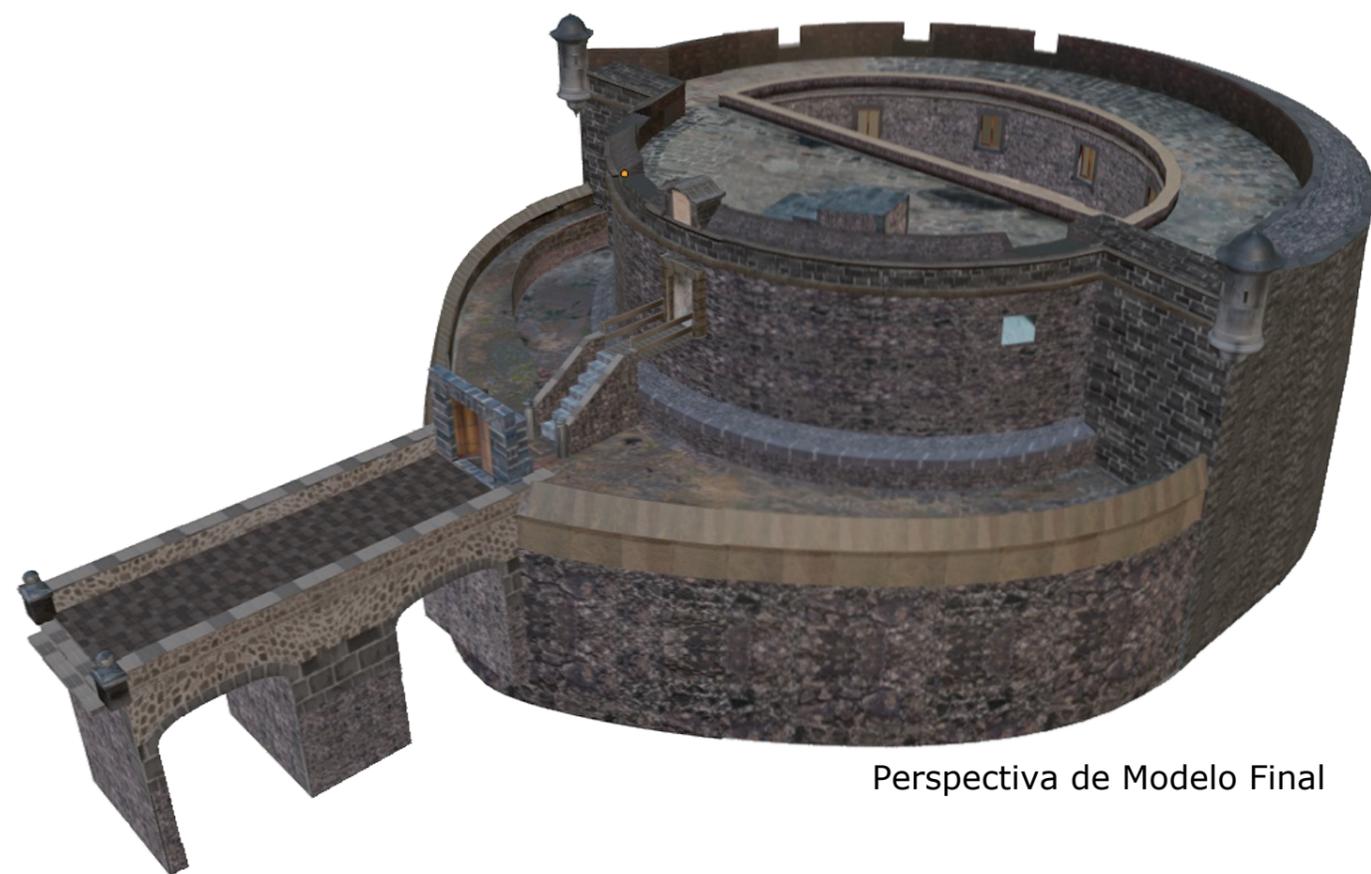
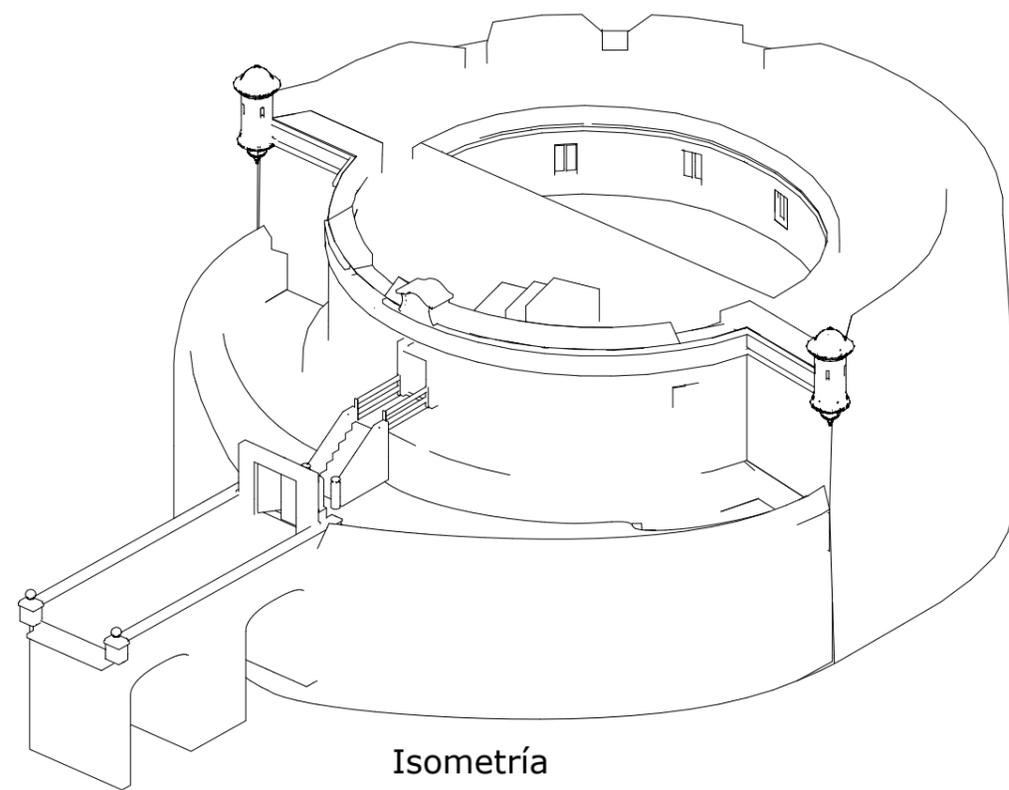


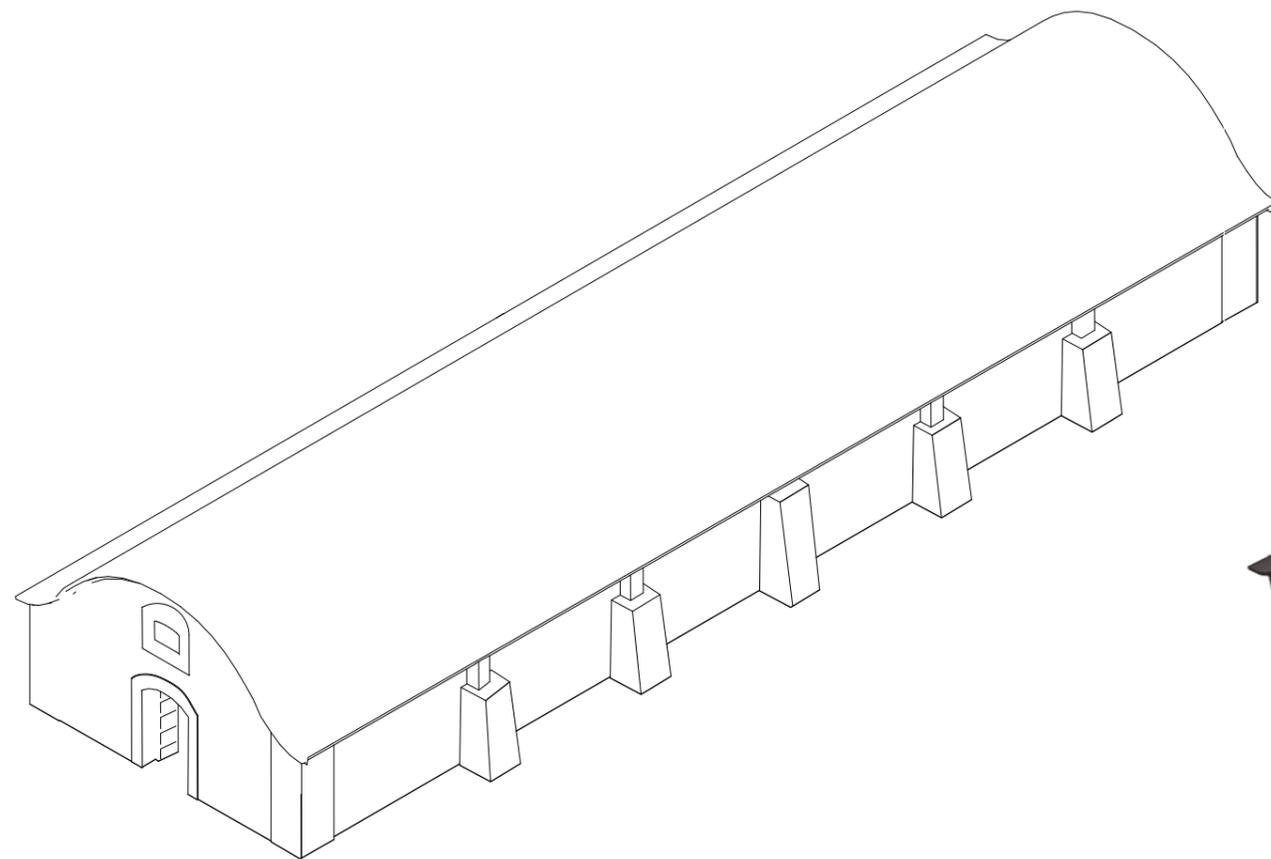
Fachada Este



Fachada Oeste







Isometría



Perspectiva de Modelo Final