

CLASIFICACIÓN DE NUBES DE PUNTOS Y MODELIZACIÓN 3D DE EDIFICACIONES HISTÓRICAS MEDIANTE SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA.

LA MURALLA DE LOS JARDINES DEL VALLE (SEVILLA).

Alumno: David Rubia Caba.

Tutor: Dr. Emilio J. Mascort Albea.

Grupo B: Área de Ingeniería del terreno – Curso 21/22

E.T.S.A. Universidad de Sevilla



Agradecimientos:

Me gustaría expresar mi más sincera gratitud a mi tutor Emilio Mascort y a Francisco Hidalgo, por estar siempre dispuestos a ayudar sea cual sea el momento, por la gran dedicación, esfuerzo y la confianza que me han brindado para tener la motivación necesaria para seguir adelante, incluso en las peores situaciones.

Gracias a Margarita y a Concepción, por ofrecerme la oportunidad de realizar este trabajo partiendo de su proyecto de investigación docente.

A mis amigos, por su apoyo incondicional y por acompañarme en este largo camino que es la universidad.

A mi pareja, por prestarme su ayuda en todo momento y por ser siempre mi apoyo constante en las peores circunstancias.

Y por último, y más importante, a toda mi familia, especialmente a mis padres, por su apoyo incondicional, la confianza plena que siempre han tenido en mí y por ser mis grandes referentes.

A todos vosotros, gracias.

RESUMEN Y PALABRAS CLAVE

Resumen:

Este trabajo reflexiona sobre las ventajas que proporcionan los Sistemas de Información Geográfica (SIG) en la construcción semi-automática de modelos tridimensionales destinados a la gestión de la información del patrimonio arquitectónico.

Para ello se ha desarrollado una metodología que permite la generación de modelos 3D-SIG a partir de una nube de puntos de alta densidad obtenida mediante la técnica LIDAR (*Light Detection And Ranging*). Los procedimientos aplicados se han basado en un conjunto de fases de trabajo que han permitido la clasificación, modelización y publicación de la información procesada.

Esta investigación ha seleccionado como caso de estudio un segmento representativo de la muralla medieval de Sevilla, perteneciente al sector de los Jardines del Valle. Este elemento patrimonial forma parte de los edificios pertenecientes al Plan Director de Patrimonio Histórico inmueble de Sevilla (PD-PHiM), y se caracteriza por ser un bien arqueológico de gran extensión y elevada complejidad.

Los resultados obtenidos han generado un modelo que incrementa muy significativamente el nivel de detalle (*Level of Detail*, LOD) del caso de estudio respecto a trabajos precedentes realizados en el marco del PD-PHiM. Del mismo modo, las tablas de datos relativas a dicho bien han sido vinculadas al modelo 3D generado. Todo ello ha contribuido a poner en valor el gran potencial que poseen las estrategias desarrolladas en aquellas tareas relacionadas con la gestión de datos de edificios patrimoniales.

Palabras clave:

Fotogrametría; Clasificación de puntos LIDAR (*Light Detection And Ranging*); Patrimonio Arquitectónico; Modelización 3D; Nubes de puntos; Nivel de detalle (*Level of Detail*, LOD); Muralla medieval de Sevilla; Plan Director de Patrimonio Inmueble de Sevilla (PD-PHiM).

RESUMEN Y PALABRAS CLAVE.....	3
1. INTRODUCCIÓN.....	5
1.1. Motivación.....	5
1.2. Hipótesis de partida. Relevancia y oportunidad.....	6
1.3. Selección del caso de estudio.....	7
1.4. Objetivos.....	9
1.5. Metodología.....	10
2. ANÁLISIS PRELIMINARES.....	12
2.1. Características del caso de estudio.....	12
2.2. Datos de partida.....	14
2.3. Comparación entre fuentes de datos.....	15
3. CLASIFICACIÓN DE PUNTOS LIDAR.....	19
3.1. Criterios para la clasificación de puntos LIDAR.....	19
3.1.1. Códigos de clasificación para modelos SIG-3D.....	19
3.1.2. Algoritmos de filtrado de puntos LIDAR.....	21
3.2. Categorización de los puntos del caso de estudio.....	23
3.2.1. Clasificación de puntos automatizada.....	23
3.2.2. Clasificación de puntos manual.....	28
4. MODELIZACIÓN DE NUBES DE PUNTOS.....	31
4.1. Principios básicos para el modelado SIG-3D.....	31
4.1.1. Niveles de detalle (Levels of detail, LOD).....	31
4.1.2. Principales procedimientos de modelización.....	32
4.2. Modelización del caso del estudio.....	32
4.2.1. Procedimiento manual: LOD ₁	32
4.2.2. Procedimiento automático: LOD ₂	33
4.2.3. Procedimiento semiautomático: LOD ₃	40
4.3. Integración de información de contexto.....	43
4.3.1. Topografía.....	43
4.3.2. Bienes arquitectónicos.....	47
5. GESTIÓN DE LA INFORMACIÓN.....	48
5.1. Vínculo con la información temática.....	48
5.1.2. Datos generales del bien.....	48
5.1.3. Datos específicos de los sectores.....	51
5.2. Publicación de resultados.....	52
6. CONCLUSIONES.....	54
7. REFERENCIAS.....	55
8. ABREVIATURAS Y GLOSARIO.....	57
9. ANEXO I: TABLAS DE DATOS DE LAS MURALLAS DEL VALLE.....	58

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Motivación

El siguiente trabajo de investigación, se centra en uno de los elementos pertenecientes al patrimonio histórico arquitectónico de la ciudad de Sevilla, la Muralla de los Jardines del Valle.

Los distintos fragmentos de muralla aún conservados de la ciudad de Sevilla, se encuentran catalogados como Bien de Interés Cultural (BIC) y Patrimonio Histórico de nuestro país. Cabe destacar que, aun tratándose de un BIC, en la actualidad esta parte de la muralla se encuentra en un estado de abandono y de cierto deterioro de sus paramentos principales. Por estos motivos, las líneas de investigación de este trabajo, parten de la utilización de nuevas tecnologías como los SIG (Sistemas de Información Geográfica), para analizar y categorizar los diferentes elementos de la muralla, que ayuden a mejorar su estado de conservación.

Este trabajo es una continuación añadida al proyecto desarrollado en el marco del Plan Director de Patrimonio Histórico inmueble (PD-PHiM) realizado por el ayuntamiento de Sevilla (España) para la utilización de modelos tridimensionales SIG para la gestión y conservación del patrimonio histórico arquitectónico (Hidalgo-Sánchez et al., 2022).

El punto de partida es el proyecto de innovación docente realizado por Margarita Infante Perea y Concepción Cantillana Merchante, correspondiente al análisis interdisciplinar del patrimonio arquitectónico mediante la digitalización de estos elementos (Fig. 1). Esta tarea, parte como eje vertebrador para el trabajo entre diferentes asignaturas y disciplinas, este TFG formará parte de este proceso.

Las diferentes líneas de investigación de este trabajo, se centrarán en el desarrollo de modelizaciones tridimensionales a partir de trabajos de campo, como es el caso del Proyecto de Innovación Docente, los trabajos fotogramétricos. Se generará una nube de puntos a partir de estos trabajos, que permitan la modelización en SIG para la posterior caracterización de sus elementos.

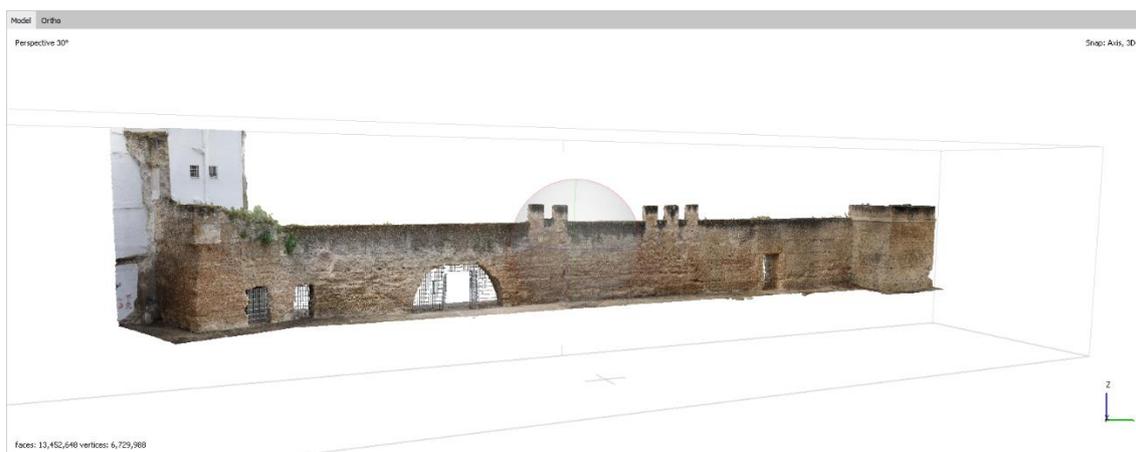


Fig.1. Digitalización fragmento de la muralla. Elaborado por Margarita Infante, Concepción Cantillana y el alumno Lorenzo Rodríguez.

1.2. Hipótesis de partida. Relevancia y oportunidad

Este trabajo pretende reflexionar sobre la utilidad de las nubes de puntos generadas por trabajos fotogramétricos para contribuir a la generación de modelos digitales 3D para la gestión del conocimiento patrimonial mediante el uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG).

El desarrollo de esta investigación, es una gran oportunidad de demostrar el potencial de estas tecnologías a la hora de caracterizar y analizar elementos pertenecientes al patrimonio arquitectónico.

1.3. Selección del caso de estudio

Para el desarrollo de este trabajo de investigación, el caso de estudio elegido ha sido la muralla de los Jardines del Valle, que resulta un elemento pertinente y representativo para la investigación aplicada que plantea este trabajo.

Los principales motivos son los siguientes:

- Existencia actual de un convenio vigente, firmado en el año 2019 y titulado “Convenio específico de colaboración entre la Universidad de Sevilla y la Gerencia de Urbanismo, del Ayuntamiento de Sevilla, para el desarrollo de estrategias encaminadas a la restauración y su posterior conservación preventiva de la muralla medieval de Sevilla”. En este sentido, cabe destacar que uno de los miembros del equipo de trabajo de la US es el Dr. Emilio J. Mascort Albea, tutor de la presente investigación. Del mismo modo, el sector de los Jardines del Valle forma parte del conjunto de la muralla medieval urbana y constituye uno de las áreas de trabajo afectadas por dicho convenio. En el marco de este convenio ya se han generado nubes de puntos LIDAR de otros segmentos de la muralla medieval de Sevilla, como es el caso de la muralla de la Macarena (Cabrera-Revuelta et al., 2021).
- Durante el presente curso 2021-22 se ha desarrollado el proyecto de innovación docente titulado: “Análisis interdisciplinar del patrimonio arquitectónico, la virtualización como eje vertebrador del trabajo colaborativo entre asignaturas”, dirigido por las profesoras de la ETSIE, las Dras. Margarita Infante y Concepción Cantillana. A través del mismo, se ha propuesto una visión transversal y multidisciplinar de un mismo bien patrimonial en diferentes asignaturas cursadas en la ETSIE y en la ETSA, permitiendo la generación mediante técnicas fotogramétricas de la nube de puntos que constituye el origen de esta investigación.
- Adicionalmente, el caso de estudio forma parte de uno de los 115 inmuebles originalmente incluidos en el Plan Director de Patrimonio Histórico inmueble de Sevilla (PD-PHiM). A través de la acción número 3 del PD-PHiM se han establecido estrategias para la modelización 3D de los bienes indicados. Un primer trabajo basado en procedimientos semiautomáticos permitió incrementar significativamente el nivel de detalle (*Level of Detail*, LOD) de las entidades analizadas. Sin embargo, un representativo grupo de edificios de carácter arqueológico no pudieron ser modelizados debido a las características de la información de partida (Hidalgo-Sánchez et al., 2022). La muralla de los Jardines del Valle formaba parte de ese grupo de inmuebles y las estrategias aportadas en el presente trabajo pretenden dar respuesta a la problemática indicada (Fig. 2).

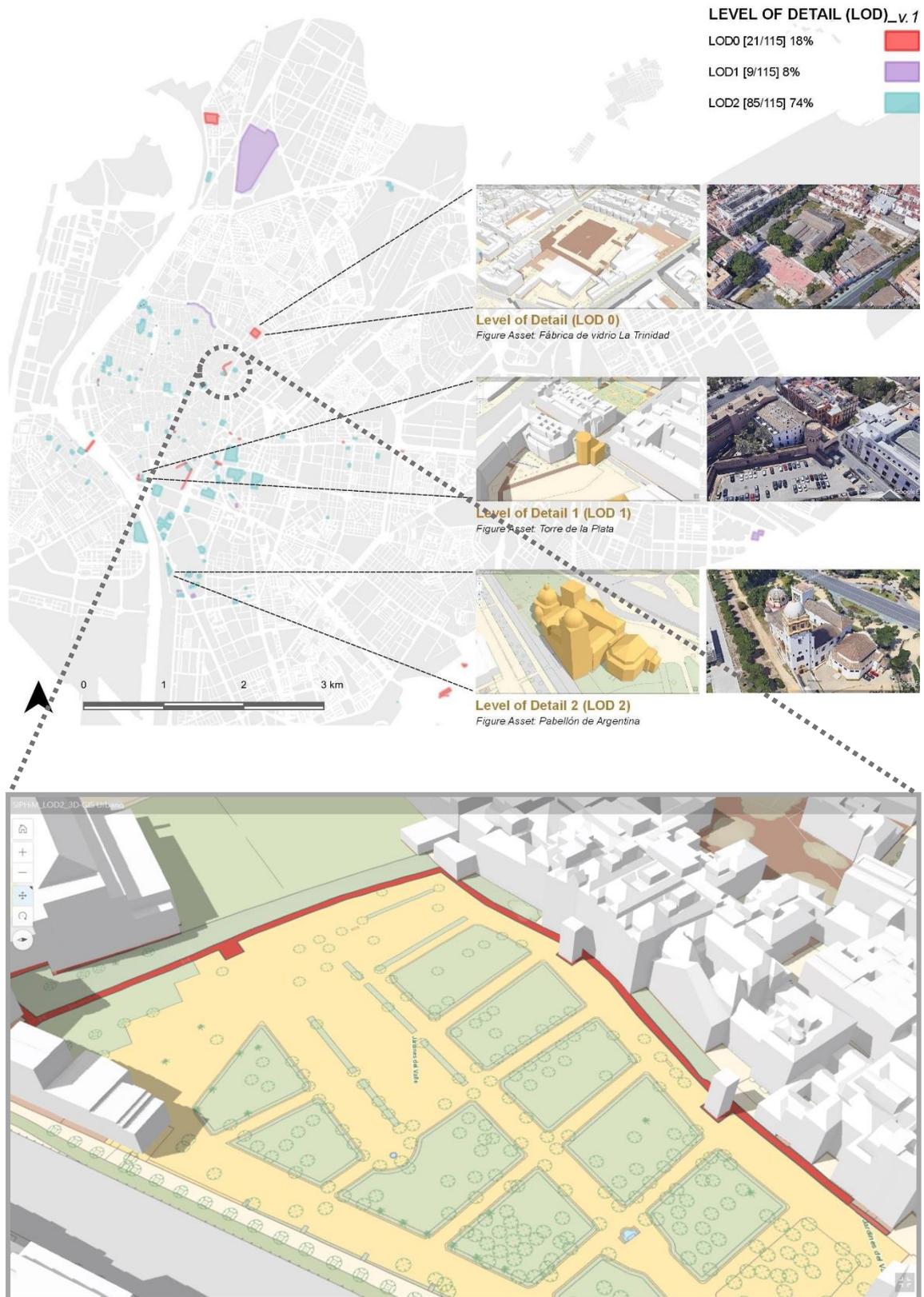


Fig. 2. Identificación de la muralla de los Jardines del Valle dentro de los elementos modelizados con nulo nivel de detalle (LOD0) en la acción 3 del PD-PHiM. Elaboración propia a partir del artículo (Hidalgo-Sánchez et al., 2022).

1.4. Objetivos

La finalidad de este trabajo de investigación realizado, es la de aplicar tecnología SIG para la creación de un método que permita clasificar y modelar nubes de puntos de manera automática para la posterior caracterización de sus unidades particulares. A continuación, se describen los **Objetivos Generales** y sus respectivos **Objetivos Específicos** asociados que se abordarán en el trabajo de investigación:

- Objetivos Generales:
 - **OG1.** Evaluación de procesos de automatización para la generación de modelos SIG-3D a partir de nubes de puntos.
 - **OG2.** Verificación de la tecnología SIG para la gestión de la información patrimonial de la arquitectura histórica.

- Objetivos Específicos:
 - **OE1.1.** Estudio de nubes de puntos obtenidas de fuentes abiertas y trabajos de campo.
 - **OE1.2.** Estudio de algoritmos de filtrado de puntos.
 - **OE1.3.** Clasificación de nubes de puntos mediante procedimientos automáticos y manuales.
 - **OE1.4.** Modelado tridimensional de nubes de puntos.
 - **OE2.1.** Segmentación y caracterización de las unidades particulares del caso de estudio.
 - **OE2.2.** Vinculación de información temática a los elementos sectorizados.
 - **OE2.3.** Publicación de resultados online.

1.5. Metodología

Esta investigación se llevará a cabo mediante cuatro fases de trabajo diferenciadas.

La primera fase se centra en desarrollar un análisis y comparación de los puntos de partida de la investigación, la nube de puntos fotogramétrica obtenida mediante trabajos de campo y la nube de puntos LIDAR obtenida mediante una fuente de datos abierta accesible a cualquier usuario, como es la del Plan Nacional de Ortografía Aérea (PNOA).

La segunda fase de la investigación, la componen dos tareas relacionadas entre sí, la primera, centrada en un trabajo de investigación teórico sobre el estudio de los algoritmos de filtrado de puntos que utilizan los softwares comerciales utilizados para este trabajo: Metasahape y ArcGIS PRO. Para la utilización de estos programas, se obtuvo una licencia de estudiante dada por la Universidad de Sevilla. La segunda tarea perteneciente a esta fase, se centra en la clasificación de las nubes de puntos mediante las herramientas proporcionadas por los softwares ya mencionados, siguiendo dos métodos de clasificación: Automáticos y manuales.

La tercera fase del trabajo, más práctica, trata sobre la modelización tridimensional de estas nubes de puntos, mediante tres procesos diferentes: Manual, automático y semiautomático, utilizando el software AutoCAD 3D para el desarrollo del modelado manual y ArcGIS PRO para el desarrollo de los métodos automático y semiautomático.

Por último, la fase final de la investigación se centra en la segmentación y caracterización de las unidades particulares de la muralla, vinculando a estas, información de trabajos desarrollados en el marco del Plan Director de Patrimonio Histórico inmueble de Sevilla.

Tras el desarrollo de estas fases, los resultados obtenidos se publican online mediante la plataforma ArcGIS Online y así, llevar la información a cualquier usuario que desee consultarla.

Las diferentes fuentes y recursos empleados son principalmente la nube de puntos del fragmento de la muralla procedente de trabajos fotogramétricos realizada por Margarita Infante y Concepción Cantillana, el trabajo desarrollado en el marco del PD-PHiM (Hidalgo-Sánchez et al., 2022), la Sede Electrónica del Catastro, el Plan Nacional de Ortografía Aérea, el software fotogramétrico Metasahape, ArcGIS y AutoCAD.

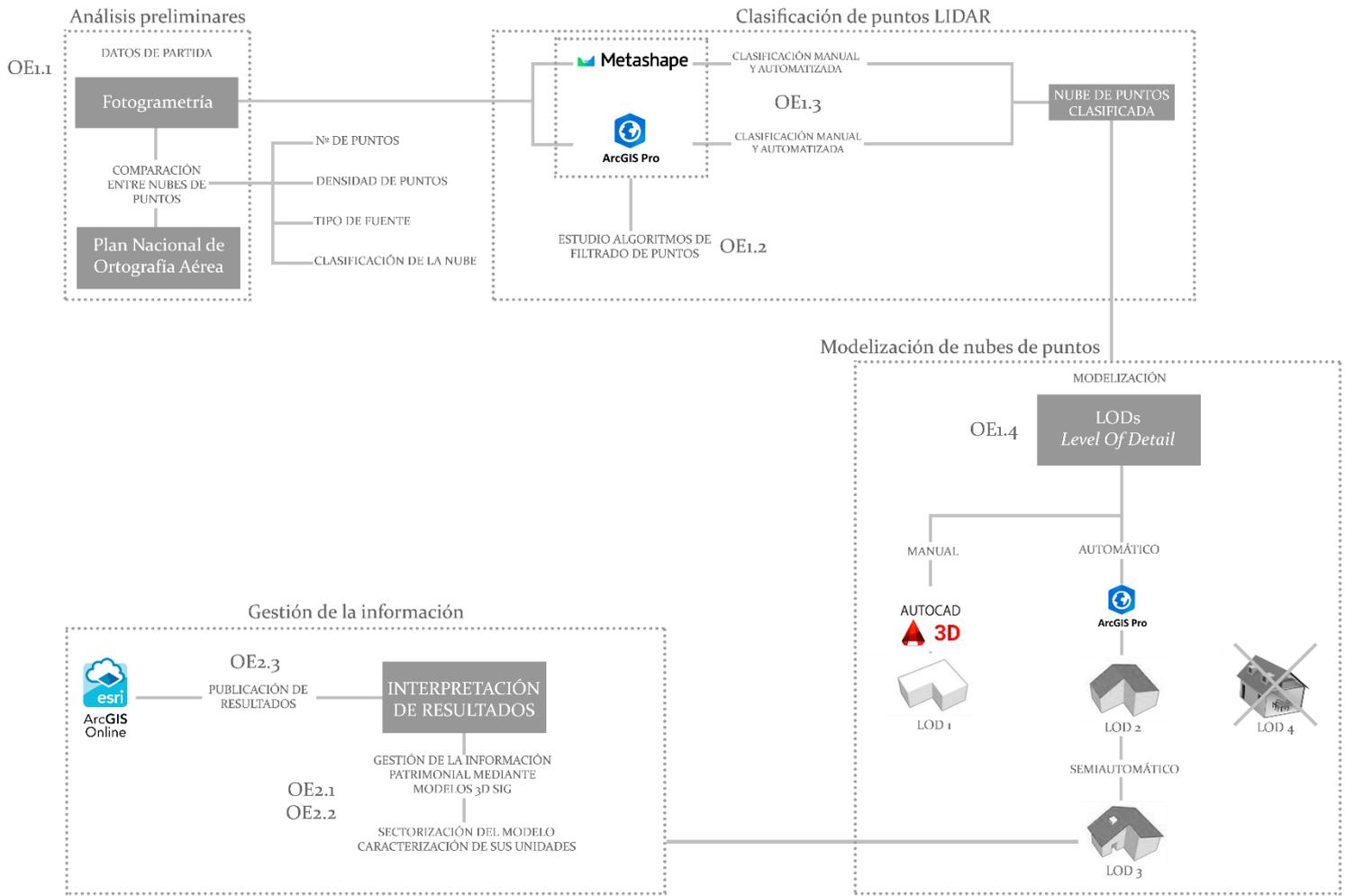


Fig.3. Esquema metodológico de la investigación. Elaboración propia

2. ANÁLISIS PRELIMINARES

En este capítulo, se desarrolla un análisis y comparación previas de los datos de partida del trabajo de investigación, estos son la nube de puntos fotogramétrica y la nube de puntos LIDAR obtenida de una fuente abierta (PNOA).

2.1. Características del caso de estudio

La muralla perteneciente a la zona de los Jardines del Valle, corresponde a la época de la ocupación musulmana en la península ibérica, comenzando a partir del año 711 d.C. Debido a la importancia estratégica de la ciudad, se mandó construir y mejorar las posiciones defensivas, incluyendo todas las murallas de la ciudad. Durante el periodo Califal con el mandato de Abd al-Rahman II, se ordenó la edificación de nuevas construcciones defensivas, añadiendo nuevas murallas a la ciudad mediante la utilización de diferentes materiales como la piedra y la tierra, esta última colocada en obra mediante la técnica del tapial.

Tras independizarse la ciudad de Sevilla de Córdoba, se convierte en un reino independiente, como resultado, la ciudad sufrió una expansión de sus territorios, incluyendo todos sus espacios urbanos. Esta expansión, provocó el sobrepaso de los límites de la ciudad dando como resultado la creación de barrios a las afueras de las murallas. Al inicio del siglo XII, debido a la expansión de la ciudad, se erigieron nuevas fortificaciones y murallas.

Existen varias hipótesis de cuál es el auténtico origen de la muralla, algunos autores sitúan el origen de la muralla como almorávide, esta dio comienzo en su construcción en el año 1125 con la utilización de materiales más económicos que la piedra, como es la tierra. Otros autores, sitúan su origen y trazado como almohade debido a la evolución que tuvo el río Guadalquivir.

No es hasta el siglo XIX con la llegada de la industrialización a la ciudad de Sevilla que, debido a la construcción de nuevas infraestructuras e industrias generan un crecimiento desordenado en la ciudad, afectando a la muralla que rodeaba a Sevilla. Debido a esta expansión, se demolieron varios fragmentos de la muralla y varias de sus puertas que impedían el crecimiento de la trama urbana de la ciudad.

En la actualidad se pueden encontrar unos 1500 m de perímetro de muralla, frente a los más de 6000 que existían, siendo el tramo que mejor se conserva y que a día de hoy está sufriendo numerosos trabajos de conservación, el tramo de la muralla del barrio de la Macarena.

En la actualidad, el tramo de muralla perteneciente a los Jardines del Valle, se encuentra en estado de deterioro y abandono.

El fragmento perteneciente a este tramo de la muralla donde nos vamos a centrar en esta investigación, es el resultante del trabajo de campo fotogramétrico, obtenido mediante el uso de cámaras fotogramétricas colocadas en distintos ángulos y alturas. Este fragmento, se encuentra situado en el lado Sur-Oeste de los Jardines del Valle, siendo el tramo de muralla más cercano a la Iglesia de los Gitanos.



Fig.4. Situación de la muralla de los Jardines del Valle, fragmento del caso de estudio enmarcado en negro.
Elaboración propia

Este fragmento de la muralla, contiene dos torres y tres puertas (una principal y dos secundarias) que crean accesos peatonales que conectan el interior de los jardines con la iglesia y el aparcamiento colindante a esta.

Las características de este tramo de muralla se definen a continuación:

- Longitud: **52,40 m**
- Altura de los muros: **4 m**
- Altura de las torres: **5 m**

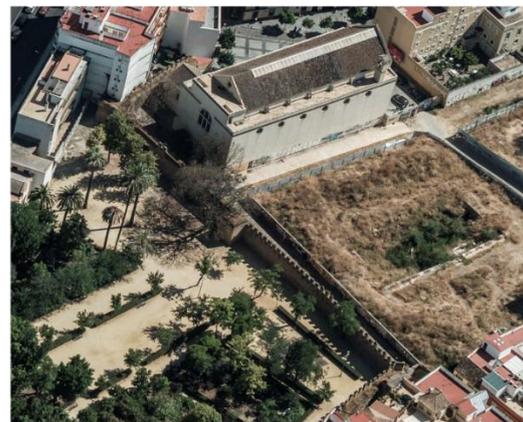


Fig.5 y Fig. 6. Fotografías aéreas del tramo de la muralla medieval de los Jardines del Valle. Elaboración propia.

2.2. Datos de partida

El punto de partida de esta investigación, parte del trabajo fotogramétrico fruto del proyecto de investigación docente realizado por Margarita Infante y Concepción Cantillana, profesoras de la ETSIE. Esta fotogrametría fue obtenida mediante la toma de datos in situ con la utilización de cámaras fotogramétricas, obteniendo un modelo digitalizado del fragmento de la muralla mediante la superposición de imágenes.

Como primera fase de esta investigación, se compararon los datos obtenidos de este trabajo fotogramétrico con una fuente de datos abiertas, como es la del Plan Nacional de Ortografía Aérea (PNOA).

Como paso previo a la comparación entre estas dos fuentes, fue necesario crear una nube densa de puntos mediante el software fotogramétrico Agisoft Metashape, programa que se utilizó para la realización de la fotogrametría.

En primer lugar, se procedió a crear una nube densa de puntos de la fotogrametría original (Fig. 7), con ella se consiguen un mayor número de puntos fotogramétricos dando lugar a una nube de puntos de alta densidad, por lo que se obtiene más detalle de la muralla y el entorno colindante.



Fig.7. Puntos de paso, *Tie Points*, puntos originales de la fotogrametría, elaborada por Margarita Infante Perea y Concepción Cantillana Merchante.

La nube de puntos densa creada contiene **53.688.735 puntos** (Fig. 8), ejecutada en una calidad media para agilizar el proceso y que no demore demasiado tiempo, ya que realizar esta tarea en calidades altas podría tardar varias horas debido al nivel de detalle de la muralla.

Tras obtener esta nube de puntos, se decidió optimizarla aún más reduciendo la distancia entre sus puntos para mantener la mayor calidad posible, originalmente se encontraban con una separación entre ellos de **0,005 m** y se modificó a **0,01 m**, consiguiendo una nueva nube de puntos densa de **16.202.043 puntos** (Fig.9).



Fig. 8. Nube de puntos densa, calidad media, número de puntos: 53.688.735. Elaboración propia.



Fig. 9. Nube de puntos densa reducida, número de puntos: 16.202.043. Elaboración propia.

Una vez se obtuvo la nube de puntos optimizada, se procedió a su comparación con la obtenida del Plan Nacional de Ortografía Aérea (PNOA).

2.3. Comparación entre fuentes de datos

La nube de puntos del PNOA del sector donde se encuentran los Jardines del Valle, se ha obtenido del centro de descargas del Organismo Autónomo Centro Nacional de Información Geográfica, se trata de un archivo LAZ que contiene información LIDAR 1ª Cobertura del año 2014.

En primer lugar, se ha descomprimido el archivo LAZ descargado en un archivo LAS, mediante la utilización del software de uso libre **Laszip** (Fig.10). Esta tarea es necesaria puesto que los softwares de tratamiento de datos LIDAR no pueden trabajar directamente con archivos en formato LAZ.

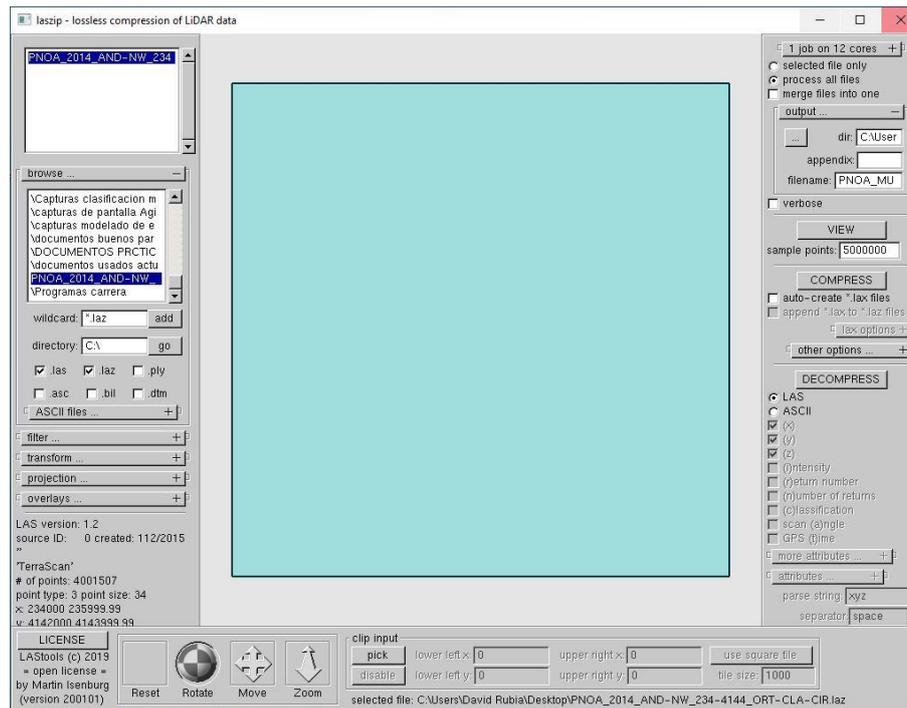
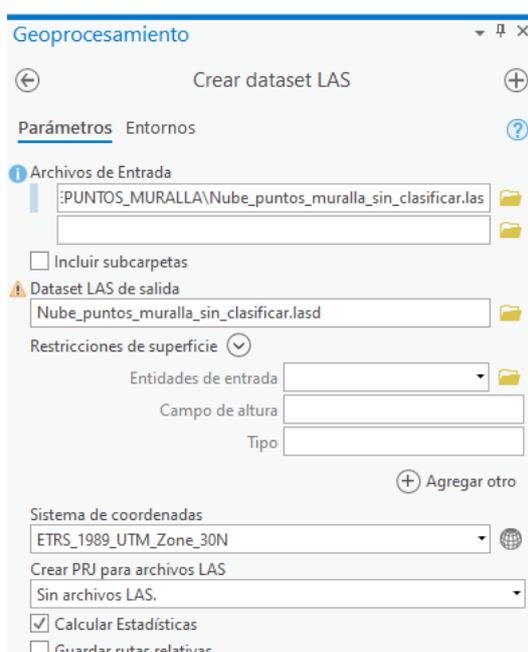


Fig. 10. Descompresión de archivo LAZ del PNOA para la obtención del archivo LAS. Elaboración propia.

Una vez obtenidas las dos nubes de puntos (Fotogrametría y PNOA), se procedió a exportar ambos archivos de nubes de puntos en formato LAS a ArcGIS Pro, creando previamente una escena local (Fig.12 y Fig.13).

Para poder trabajar con archivos LAS en ArcGIS, es necesario utilizar la herramienta de geoprocésamiento **Crear dataset LAS** (Fig. 11), que permite añadir el archivo LAS exportado desde Metashape y crear un Dataset para su visualización.



A la hora de definir los parámetros en el panel de la herramienta, es importante añadir de forma correcta el sistema de coordenadas con el que se trabaja para que la nube de puntos se sitúe en la escena de forma correcta, este es el **ETRS_1989_UTM_Zone_30N**, que es el sistema de coordenadas utilizado en la obtención de la fotogrametría.

Fig. 11. Herramienta de geoprocésamiento Crear dataset LAS. Elaboración propia.

La comparación entre estas fuentes de datos, se basa en los siguientes criterios: **número de puntos LIDAR** que contiene la nube de puntos, **fuentes de los datos**, **clasificación** de sus puntos LIDAR y la **densidad de puntos por m²**.

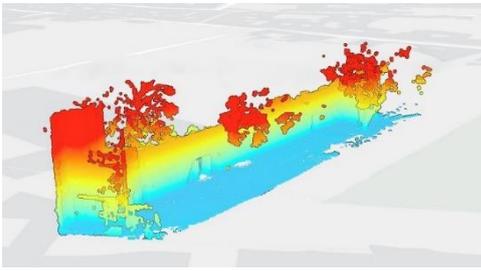


Fig. 12. Nube puntos muralla, fotogrametría, exportada a ArcGIS Pro. Elaboración propia.

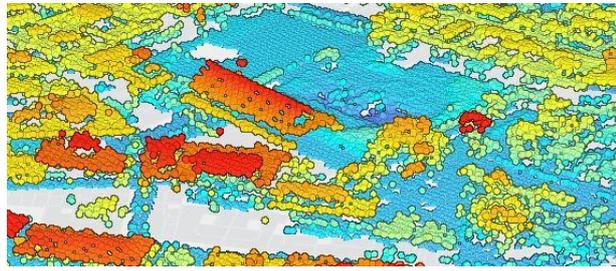


Fig. 13. Nube puntos sector, PNOA, exportada a ArcGIS Pro. Elaboración propia.

La nube de puntos del PNOA, al tratarse de un sector de la ciudad de Sevilla completo, se ha localizado la zona de los Jardines del Valle para comprobar el estado de los puntos LIDAR correspondientes a la muralla.

Se puede observar que los puntos correspondientes a la muralla (Fig. 14) son difícilmente distinguibles del resto de elementos de su entorno como pueden ser árboles, terreno o edificios. La nube de puntos del PNOA contiene una clasificación LIDAR, al comprobar esta clasificación, podemos comprobar que los puntos que corresponden a la muralla son confundidos con el código de clasificación de vegetación (Fig. 15).

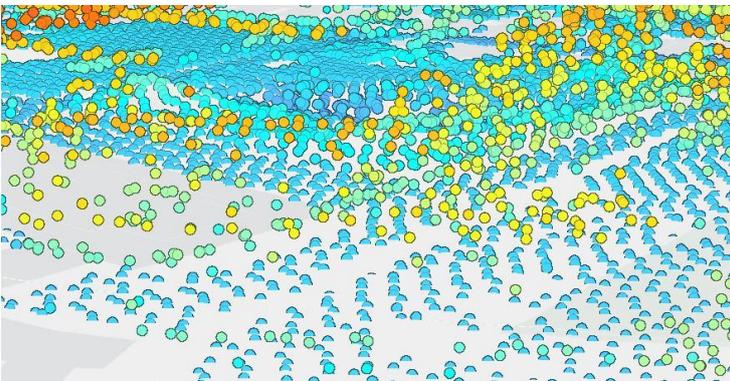


Fig. 14. Entorno muralla de los Jardines del Valle. Elaboración propia.



Fig. 15. Puntos LIDAR correspondientes a la clasificación de vegetación. Elaboración propia.

Una vez creadas las escenas de nube de puntos en ArcGIS, se obtuvieron los siguientes datos de ambas nubes de puntos en función de los criterios expuestos a continuación:

Nube de puntos obtenida de la fotogrametría:

- Nº de puntos LIDAR: 16.202.043
- Fuente: Proyecto de investigación docente.
- Clasificación LIDAR: Ninguna.
- Densidad de puntos LIDAR: 127.505 p/m²

Nube de puntos del PNOA:

- Nº de puntos LIDAR: 4.001.507 (todo el sector).
- Fuente: Abierta.
- Clasificación LIDAR: Clasificada.
- Densidad de puntos LIDAR: 0,5 p/m²

Tras la realización de la comparación, se observó que la baja densidad de puntos de la nube del PNOA y sus errores de clasificación, provocaron que no fuese una nube de puntos válida ni eficiente para la realización de modelados 3D con altas exigencias de detalle.

3. CLASIFICACIÓN DE PUNTOS LIDAR

En este capítulo, se aborda la clasificación de la nube de puntos LIDAR, tarea necesaria para realizar modelados tridimensionales en softwares SIG. En primer lugar, se analizaron los diferentes criterios y códigos de clasificación de puntos. Seguidamente, se realiza el estudio de los algoritmos utilizados por los diferentes métodos de filtrado automático de puntos y, por último, la realización de la clasificación de la nube mediante dos métodos diferentes de trabajo: **Automatizado y manual**.

3.1. Criterios para la clasificación de puntos LIDAR

En este primer apartado, se introducen los principios teóricos de códigos de clasificación de puntos LIDAR, necesarios para la clasificación de nubes de puntos y su posterior modelización.

3.1.1. Códigos de clasificación para modelos SIG-3D

Para la realización de modelados 3D a partir de nubes de puntos, es necesario que dicha nube contenga una clasificación de sus puntos LIDAR, siguiendo un código de clasificación. Esto es debido a que, para la correcta modelización de elementos obtenidos a partir de nubes de puntos, los softwares de tratamientos de puntos LIDAR necesitan diferenciar a que categoría pertenece cada uno de sus puntos y así, no modelizar elementos que no interesen, como puede ser la vegetación colindante.

Por esta cuestión, es de vital importancia una correcta clasificación de datos LIDAR para desarrollar los modelos tridimensionales. Para esta fase de la investigación, se utilizará el software **ArcGIS Pro** perteneciente a la empresa **ESRI**. Los códigos de clasificación que utiliza ArcGIS para sus puntos LIDAR es la clasificación dada por la *American Society for Photogrammetry and Remote Sensing* (ASPRS), también utilizada por el Instituto Geográfico Nacional (IGN). Según las especificaciones dadas por la ASPRS, la clasificación de los datos LIDAR vienen dados por las especificaciones LAS (*LAS Specification 1.4-R14 Release Information*, 2002), en este caso su versión más reciente, **LAS 1.4** (Tabla. 1).

Como se ha partido de un trabajo fotogramétrico realizado con el software Agisoft Metashape, dicho programa también contiene un código de clasificación de puntos. Este código de clasificación es similar al utilizado por ESRI, pero con algunas variaciones. A continuación, se detalla una tabla en función de los datos obtenidos del propio programa, asignando unos valores de clasificación similares para clarificar su comparación (Tabla. 2).

VALOR DE CLASIFICACIÓN	SIGNIFICADO
0	Nunca clasificado
1	No asignado
2	Base
3	Vegetación baja
4	Vegetación media
5	Vegetación alta
6	Edificio
7	Ruido bajo
8	Reservado
9	Agua
10	Ferrocarril
11	Superficie de la carretera
12	Reservado
13	Protector de cable (fase)
14	Conductor de cable (fase)
15	Torre de transmisión
16	Conector de la estructura de cables (aislante)
17	Plataforma del puente
18	Ruido alto
19-63	Reservado
64-255	Definido por el usuario

Tabla.1 Elaboración propia, a partir de la información sobre la clasificación de puntos de ESRI y la *American Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ASPRS)*.

VALOR DE CLASIFICACIÓN	SIGNIFICADO
0	Creado (nunca clasificado)
1	No asignado
2	Terreno
3	Vegetación baja
4	Vegetación media
5	Vegetación alta
6	Edificio
7	Punto bajo (ruido)
8	Punto clave del modelo (centro de masas)
9	Agua
10	Ferrocarril
11	Superficie de carretera
12	Puntos superpuestos
13	Protector de cable (Protección)
14	Conductor de cable (Fase)
15	Torre de transmisión
16	Conector de la estructura de cables
17	Plataforma de puente
18	Ruido alto
19	Coche
20	Objeto hecho por el hombre

Tabla.2 Elaboración propia, a partir de la información sobre la clasificación de puntos de Agisoft y el software Metashape.

Se puede observar cómo al revisar las dos tablas de clasificación, contienen un código similar, compartiendo algunos de sus códigos y su mismo orden, pero existiendo algunas diferencias como las encontradas en las clasificaciones **punto clave de modelo**, **puntos superpuestos**, **coche** u **objetos hechos por el hombre**. Estas clasificaciones no aparecen en la dada por la ASPRS en LAS 1.4, sin embargo, aunque tengan algunas diferencias, sus clasificaciones son totalmente compatibles para la exportación de archivos clasificados de un software a otro.

Los códigos de clasificación que han sido necesarios para la realización de esta fase se exponen a continuación:

- 2 - Base.
- 3 - Vegetación baja.
- 4 - Vegetación media.
- 5 - Vegetación alta.
- 6 - Edificio.
- 7 - Ruido bajo.
- 18 - Ruido alto.

3.1.2. Algoritmos de filtrado de puntos LIDAR

En el siguiente apartado, se realiza el análisis de los distintos algoritmos de filtrado de puntos LIDAR (Parra Artero, 2015) (W. B. Barragán Zaque et al., 2017) (Martínez Blanco, 2016) usados por los softwares Metashape y ArcGIS y así, entender su funcionamiento y criterios para el clasificado de puntos. En primer lugar, con el software fotogramétrico **Metashape**, se han utilizado para este trabajo dos de sus algoritmos de filtrado: **Clasificación de puntos del terreno** y **Selección de puntos mediante color**. A continuación, se exponen los algoritmos:

Clasificación de puntos del terreno:

Para este proceso, el software utiliza un algoritmo basado en tres criterios: **ángulo máximo, distancia máxima y tamaño de celda**, este algoritmo de filtrado de datos LIDAR está basado en el filtrado de **Elevación con ventana expansiva (ETEW)** (Zhang & Whitman, 2005). Dicho algoritmo, se basa en identificar y eliminar los puntos que no pertenecen al suelo. Su funcionamiento se detalla a continuación:

- En primer lugar, los datos LIDAR se dividen en una matriz de celdas cuadradas donde se añade un valor de elevación mínima, todos los puntos que no se encuentren en ese valor de elevación son descartados.
- Seguidamente, las celdas aumentan de tamaño y se determina la elevación mínima de cada celda, provocando que todos los puntos con una elevación mayor a la mínima obtenida sean descartados.
- Por último, este proceso se repite aumentando el tamaño de las celdas y de los umbrales de elevación hasta que el algoritmo no descarte ningún punto del proceso o iteración anterior.

El algoritmo utiliza las siguientes ecuaciones para el filtrado de datos:

Para la iteración I^{th} , un punto $P_{i,j}$ se elimina si:

$$Z_{i,j} - Z_{i, \min} > h_{i,T}$$

Donde $(Z_{i,j})$ representan la elevación del punto (J^{th}) $(P_{i,j})$ en una celda para la iteración (I^{th}) , siendo $(Z_{i, \min})$ la elevación mínima de la celda y $(h_{i,T})$ el umbral de altura. El valor $(h_{i,T})$ esta relacionado con el tamaño de las celdas, es definido por:

$$h_{i,T} = SC_i$$

Donde (S) es una pendiente máxima predefinida para el terreno y (C) es el tamaño de la celda para la iteración (I^{th}) .

En una implementación de la celda, su tamaño (C_i) se duplica en cada iteración de manera que:

$$C_i = 2C_{i-1} \quad i = 2, 3, \dots, M$$

Siendo (M) el número de iteraciones.

Selección de puntos mediante color:

El siguiente algoritmo de filtrado, se basa en la selección de puntos mediante su clasificación de color, utilizando dos canales o modelos de color distintos, estos son: **RGB** (*Red, Green, Blue*) y **HSV** (*Hue, Saturation, Value*). Este algoritmo, se encarga de agrupar los puntos que coincidan en su clasificación de color para posteriormente asignar de manera manual el código de clasificación que el usuario estime.

En segundo lugar, una vez detallados los algoritmos de filtrado utilizados por Metashape, se detallan los utilizados por el **software ArcGIS**. Para el desarrollo de investigación, se usarán principalmente los algoritmos utilizados por dos de las herramientas de geoprocetamiento incluidas en la extensión **3D Analyst** del software. Siendo estas herramientas **Clasificar el terreno LAS** y **Clasificar edificio de LAS**. A continuación, se exponen dichos algoritmos:

Clasificación de puntos del terreno:

El algoritmo usado por la herramienta Clasificar el terreno LAS, se basa en la selección de tres métodos distintos para el filtrado de los puntos pertenecientes al terreno, dichos métodos se definen a continuación:

- **Método de clasificación conservadora:** este método de clasificación, utiliza una variación de pendiente muy restrictiva, pensada para terrenos con poca curvaturas o topografías poco pronunciadas, permitiendo diferenciar el código de clasificación vegetación baja como puede ser la hierba, arbustos o matorrales.
- **Método de clasificación estándar:** Se trata de la opción predeterminada usada por la herramienta. Este método es más permisivo con la variación de pendiente, permite captar ondulaciones graduales en la topografía del terreno.
- **Método de clasificación agresiva:** Se encarga de detectar terrenos muy pronunciados como colinas o crestas, este método no es recomendable usarlo en zonas urbanas o terrenos con topografías poco pronunciadas puesto que, puede confundir elementos pequeños que no forman parte del suelo como tal, como pueden ser algunas partes de edificios.

Principalmente, el algoritmo se basa en la variación de pendientes o diferencia de alturas entre dos puntos, por lo que este algoritmo está basado en el **Filtrado de máxima pendiente local (MLS)** (Zhang & Whitman, 2005). A su vez, este algoritmo se trata de una variación del filtro de identificación de medidas del suelo que compara las pendientes entre un punto LIDAR y el resto de puntos vecinos (Vosselman, 2000). El funcionamiento del algoritmo de filtrado se detalla a continuación:

- Un punto LIDAR, **P₀ (X₀, Y₀, Z₀)**, es considerado como suelo si el valor máximo (**S_{0, máx}**) de las diferentes pendientes entre este punto y cualquier otro punto (**p_j**) dentro de un radio determinado es inferior al umbral preestablecido (**S**). Se define por la siguiente ecuación:

$$S_{0,j} = \frac{Z_0 - Z_j}{\sqrt{(X_0 - X_j)^2 + (Y_0 - Y_j)^2}}$$

Donde (S_{oj}) es la pendiente entre po y pj , Xj e Yj representan las coordenadas horizontales de pj y Zj su elevación.

Clasificar edificio de LAS:

Para esta herramienta, el software utiliza un algoritmo basado en dos criterios principales: **Altura mínima de tejado** y **Área mínima**, este algoritmo de filtrado está basado en el **Filtrado de datos adaptable TIN** (Axelsson, 1999) para la clasificación de puntos de edificio y para la obtención del modelado tridimensional de sus cubiertas. A continuación, se detalla el funcionamiento del algoritmo:

- Un TIN, es un medio digital para representar la morfología de una superficie, en este caso de las cubiertas de los edificios, se trata de una capa de red irregular triangular. El filtrado TIN, se construye basándose en el algoritmo de triangulación de Delaunay.
- Las aristas que contienen las TIN, forman facetas triangulares continuas, que capturan la posición de entidades lineales que forman parte de una superficie.
- En primer lugar, este algoritmo se basa en las segundas derivadas de las diferencias de elevación, plantea que los edificios se encuentran formados por superficies planas conectadas.
- Las fases TIN vecinas en el mismo plano, tendrán la misma orientación.
- Todos los puntos vecinos encontrados en la misma línea de escaneo, se sitúan en una línea recta con las segundas derivadas de las diferencias de altitud con valor cero.

3.2. Categorización de los puntos del caso de estudio

3.2.1. Clasificación de puntos automatizada

Una vez detallados los algoritmos de filtrado de datos, se comienza la clasificación de nube de puntos. En primer lugar, se comenzó con la clasificación mediante el software Metashape utilizando los dos algoritmos de clasificación mencionados en el apartado anterior. A continuación, se detallan estos procesos:

Clasificación de puntos del terreno:

Para la utilización de la herramienta que usa este algoritmo (Fig.16), es necesario definir una serie de parámetros en función de los criterios mencionados en el apartado anterior (ángulo máximo, distancia máxima y tamaño de celda). A continuación, se detallan estos parámetros:

- **Ángulo máximo:** expresado en grados sexagesimales, establece un ángulo límite. Establece una recta que une distintos puntos, si dicha recta, el ángulo que forma no es superior al definido con anterioridad, el software lo tomará como punto del terreno. En este caso al tratarse de un terreno con poca pendiente, se establece como **ángulo máx. 1,5**.
- **Distancia máxima:** se trata de una limitación de distancia entre el terreno y un punto, si el punto no sobrepasa la distancia definida previamente, lo tomará como punto del terreno. Para este caso, al existir numerosos elementos no

pertenecientes al suelo como la vegetación de baja altura, se define una distancia de **0,05 m**.

- **Tamaño de celda:** entendiendo esto como una la media máxima de algún elemento que no forme parte del suelo, para este caso se ha utilizado el ancho de uno de los torreones, **5 m** aproximadamente.

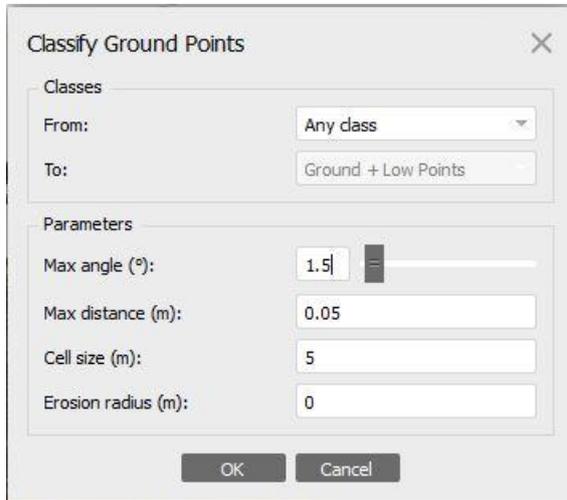


Fig. 16. Herramienta de clasificación de puntos del terreno, Metashape. Elaboración propia.

Tras aplicar estos parámetros en el panel de la herramienta, podemos observar que el programa no ha conseguido clasificar todos los puntos pertenecientes al terreno. Tras varios intentos de prueba y error, el software solo clasifica el terreno parcialmente (Fig.17), debido a la cantidad de elementos que aparecen en el terreno por el alto de detalle que posee la nube de puntos.

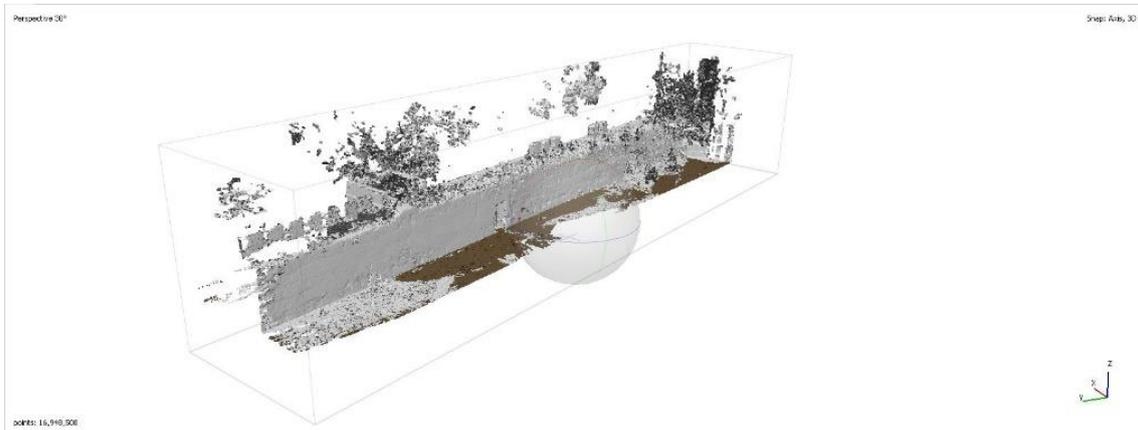


Fig.17. Clasificación parcial del terreno, puntos clasificados como suelo marcados en color marrón. Elaboración propia.

Al no conseguir la clasificación usando este método de filtrado, se utiliza el segundo algoritmo de filtrado de puntos usado para esta investigación: **Selección de puntos mediante color**.

Selección de puntos mediante color:

Para la utilización de esta herramienta, es necesario definir una serie de parámetros en su panel (Fig.18). Se definen a continuación:

- El primer parámetro a definir es el color, este se puede seleccionar mediante una paleta de colores que combina el RGB y el HSV o mediante la selección de un color en pantalla, este último es más eficaz puesto que se puede seleccionar el color directamente de la fotogrametría.
- Seguidamente se selecciona la **Tolerancia** del color, en este caso se mantiene en **10**.
- Por último, se marcan las casillas en función del canal de color que se vaya a utilizar para la selección, en este caso se marcan las pertenecientes al canal de color RGB.

Tras ejecutar la herramienta, el programa mezcla los puntos de todos los códigos de clasificación (Fig.19), puesto que, la gama de colores de la fotogrametría es muy similar entre sí, confundiendo puntos de la muralla con puntos del terreno o de vegetación.

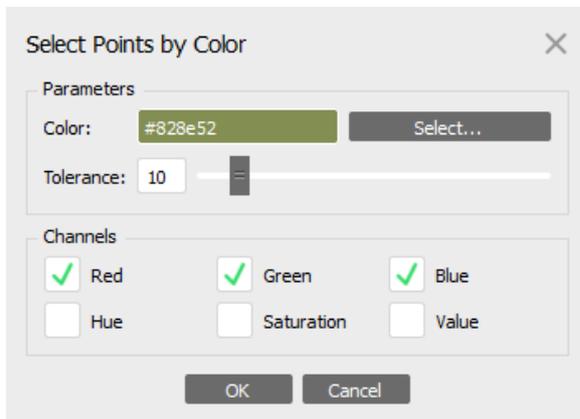


Fig.18. Herramienta de selección de puntos por color. Elaboración propia.

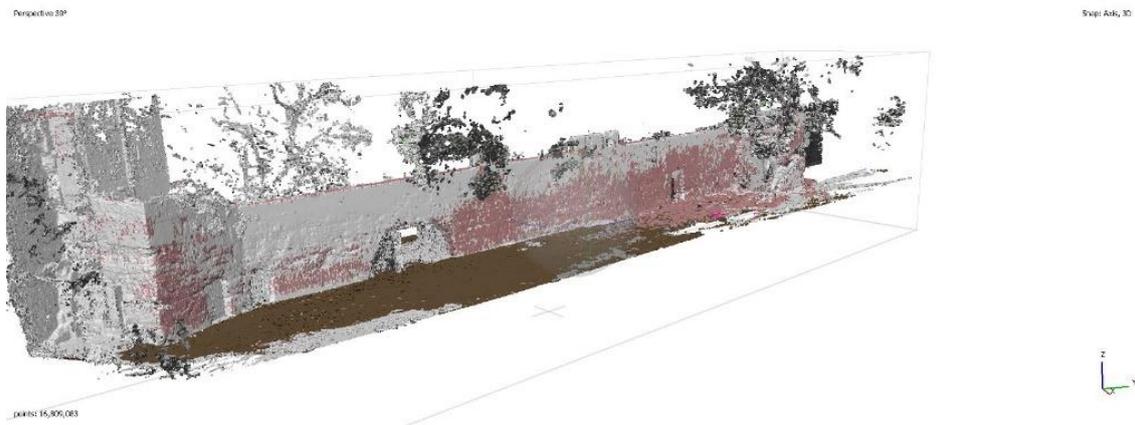


Fig.19. Clasificación mediante color, elementos seleccionados marcados en rosa. Elaboración propia.

Tras la realización de las clasificaciones con Metashape, se procedió a clasificar la nube mediante las herramientas proporcionadas por **ArcGIS Pro**, comenzando por la clasificación de sus puntos del terreno.

Clasificación de puntos del terreno:

Para la clasificación del terreno, ArcGIS utiliza una serie de herramientas de geoprocésamiento pertenecientes a su extensión 3D Analyst, basadas en los algoritmos del filtrado mencionados en el apartado anterior. Como primer paso se comienza con la clasificación de sus puntos del terreno, mediante la herramienta **Clasificar el terreno LAS** (Fig. 20). En el panel de la herramienta se definen los siguientes parámetros:

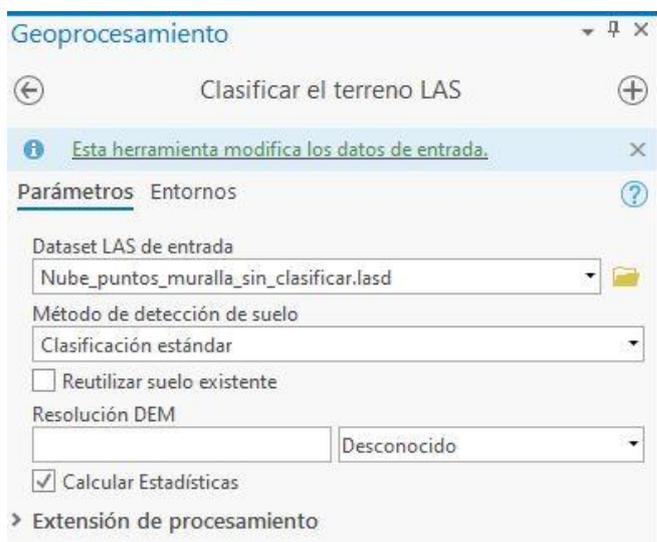


Fig. 20. Herramienta de geoprocésamiento Clasificar el terreno LAS. Elaboración propia.

Tras aplicar esta herramienta con el valor de **Clasificación estándar**, como se puede comprobar no se realiza una clasificación eficiente (Fig. 21), puesto que hay puntos del terreno que se han quedado fuera de la clasificación. Esto es debido al alto nivel de detalle y complejidad del terreno donde se encuentra la muralla, es decir, el programa de manera automática no es capaz de captar todos los puntos pertenecientes al terreno debido a que confunde estos puntos con puntos pertenecientes a la clasificación de vegetación baja y ruido bajo.

De esta manera, se procedió a ejecutar la herramienta con el valor de **Clasificación conservadora** para intentar diferenciar el terreno de los demás elementos de baja altura como la vegetación. Tras finalizar el proceso, se obtienen resultados similares, por lo que no es posible una clasificación eficiente de los puntos pertenecientes al terreno.

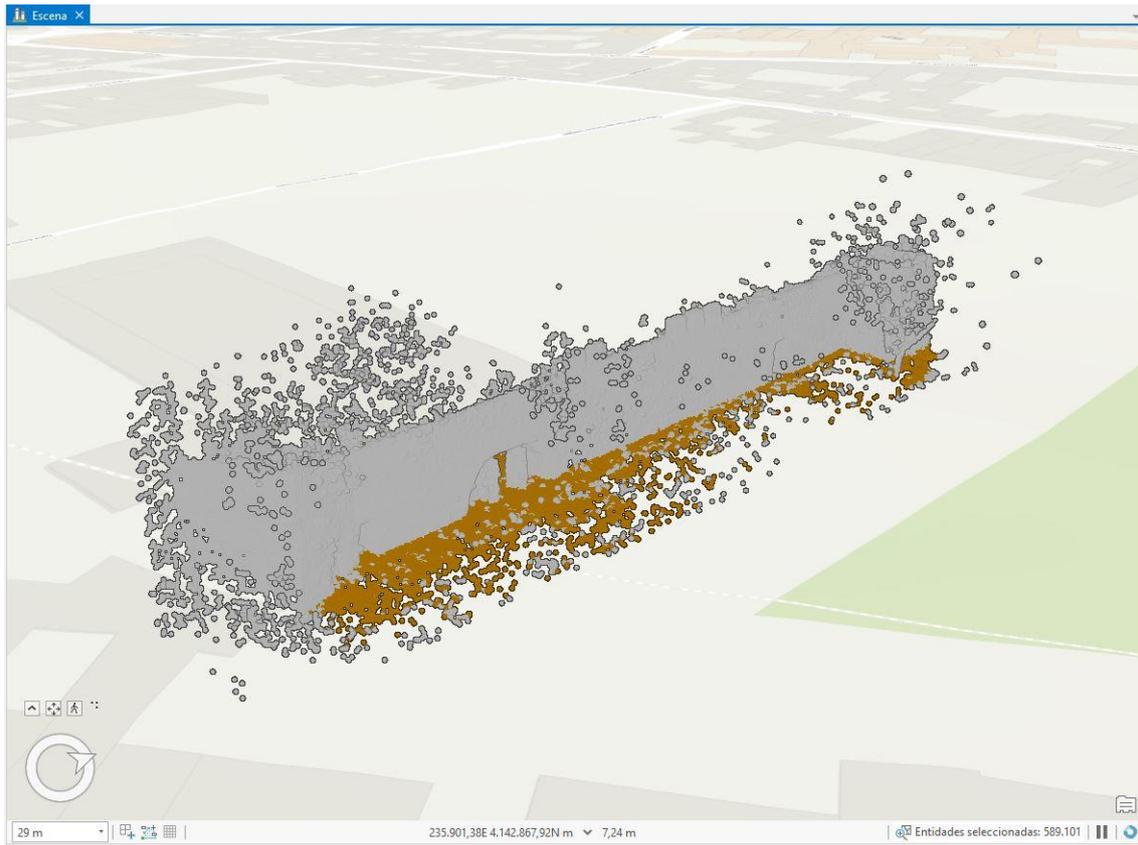


Fig. 21. Nube de puntos con suelo parcialmente clasificado, marcado en color marrón. Elaboración propia.

Seguidamente, se procedió a utilizar la segunda herramienta de clasificación de puntos mencionada con anterioridad, **Clasificar edificio de LAS**.

Clasificar edificio de LAS:

Para la utilización de esta herramienta, es necesario definir una serie de parámetros en su panel (Fig.22), se detallan a continuación:

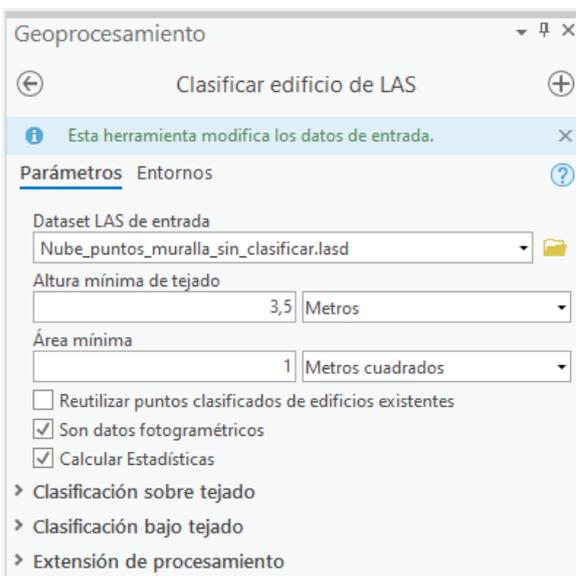


Fig. 22. Herramienta de geoprocesamiento Clasificar edificio de LAS. Elaboración propia.

- Como en la clasificación de puntos del terreno, hay que seleccionar la nube de puntos sin clasificar **Nube_puntosmuralla_sin_clasificar.lasd** como Dataset LAS de entrada.
- En **Altura mínima de tejado**, se define el punto más bajo desde el que el programa empieza a contar los puntos pertenecientes al edificio, se le da un valor de **3,5 metros**.
- En el **Área mínima**, se define la superficie en m² mínima que tenga el tejado del edificio, se le da un valor de **1 m²**.
- Al tratarse de una nube resultante de un trabajo fotogramétrico, se marca la casilla de **Son datos fotogramétricos**.

Una vez definidos estos valores, se ejecuta la herramienta, dando como resultado una clasificación errónea, el software no es capaz de diferenciar los elementos correspondientes al edificio de la muralla, confundiéndolos con puntos de otros códigos de clasificación como la vegetación alta y el ruido alto. Tras varios intentos de prueba y error añadiendo otros valores, no se consiguió una clasificación eficiente.

3.2.2. Clasificación de puntos manual

Tras realizar las clasificaciones automatizadas mediante el uso de herramientas que incluían los algoritmos de filtrado, no se llegó a conseguir una nube de puntos clasificada válida para su posterior modelización 3D, por lo tanto, es necesario una clasificación manual de la nube. ArcGIS Pro y Metashape permiten el filtrado de puntos de manera manual mediante herramientas de selección, sin embargo, para este trabajo se realizará mediante el software Metashape, puesto que solo se dispone licencia para las herramientas de 3D Analyst de ArcGIS en su versión 2.7 y para la clasificación manual son necesarias versiones posteriores como la 2.8 o 2.9. A continuación, se dispone a detallar el proceso de filtrado manual mediante el software Metashape:

Mediante la herramienta de **Selección manual libre**, es posible la selección de un conjunto de puntos de la fotogrametría y asignarles de manera manual un código de clasificación, mediante la herramienta **Asignar clase**. Para la realización de esta tarea de filtrado manual, se establecen una serie de criterios de selección definidos por el usuario. Dichos criterios se basan en la selección visual de los elementos, seleccionando el conjunto de puntos en función de la forma y el color. La fotogrametría al contar con texturas y una gama de colores realistas, facilita la tarea, puesto que es sencillo diferenciar los diferentes elementos que la componen como son los árboles, arbustos, hierba, la muralla, edificaciones colindantes y el suelo. En la Fig.23 se muestra el proceso de la selección manual de los puntos.

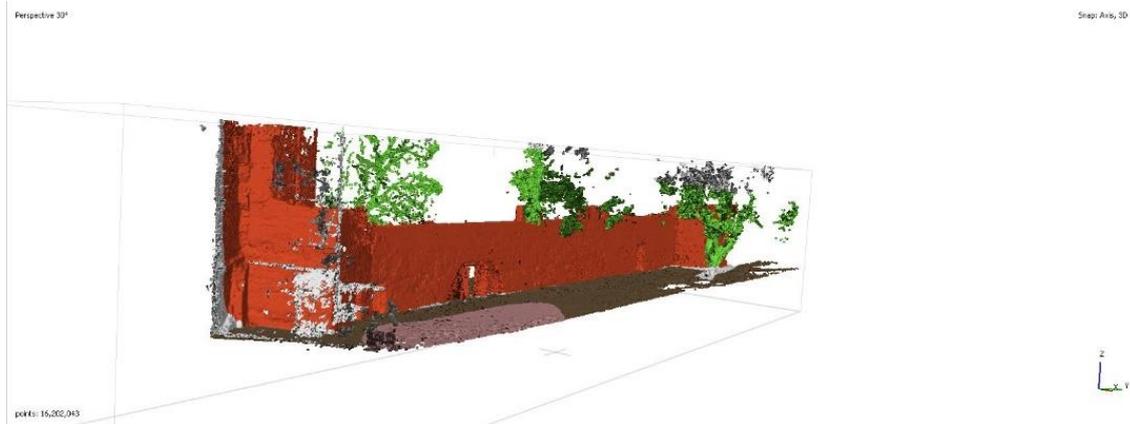


Fig.23. Clasificación manual, elementos seleccionados mediante la herramienta de selección marcados en rosa.
Elaboración propia.

Una vez finalizada esta tarea, se obtuvo la nube de puntos clasificada en su totalidad (Fig.24). Tras finalizar la clasificación, para este tipo de fotogrametrías tan detalladas con una alta densidad de puntos, podemos decir que es el método más eficiente, aunque es una tarea que puede llegar a demorar demasiado tiempo. Las distintas clasificaciones de puntos se muestran a continuación (Fig.25).

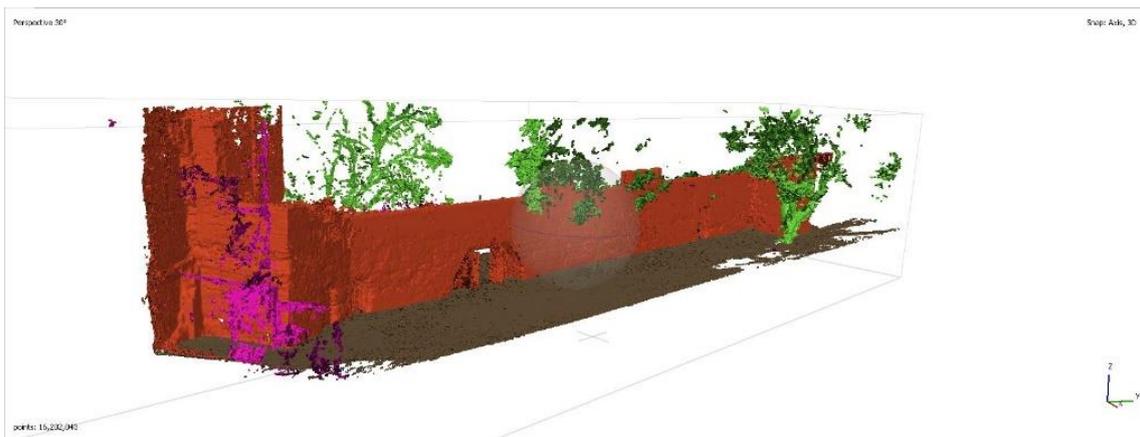


Fig.24. Nube de puntos clasificada. Elaboración propia.

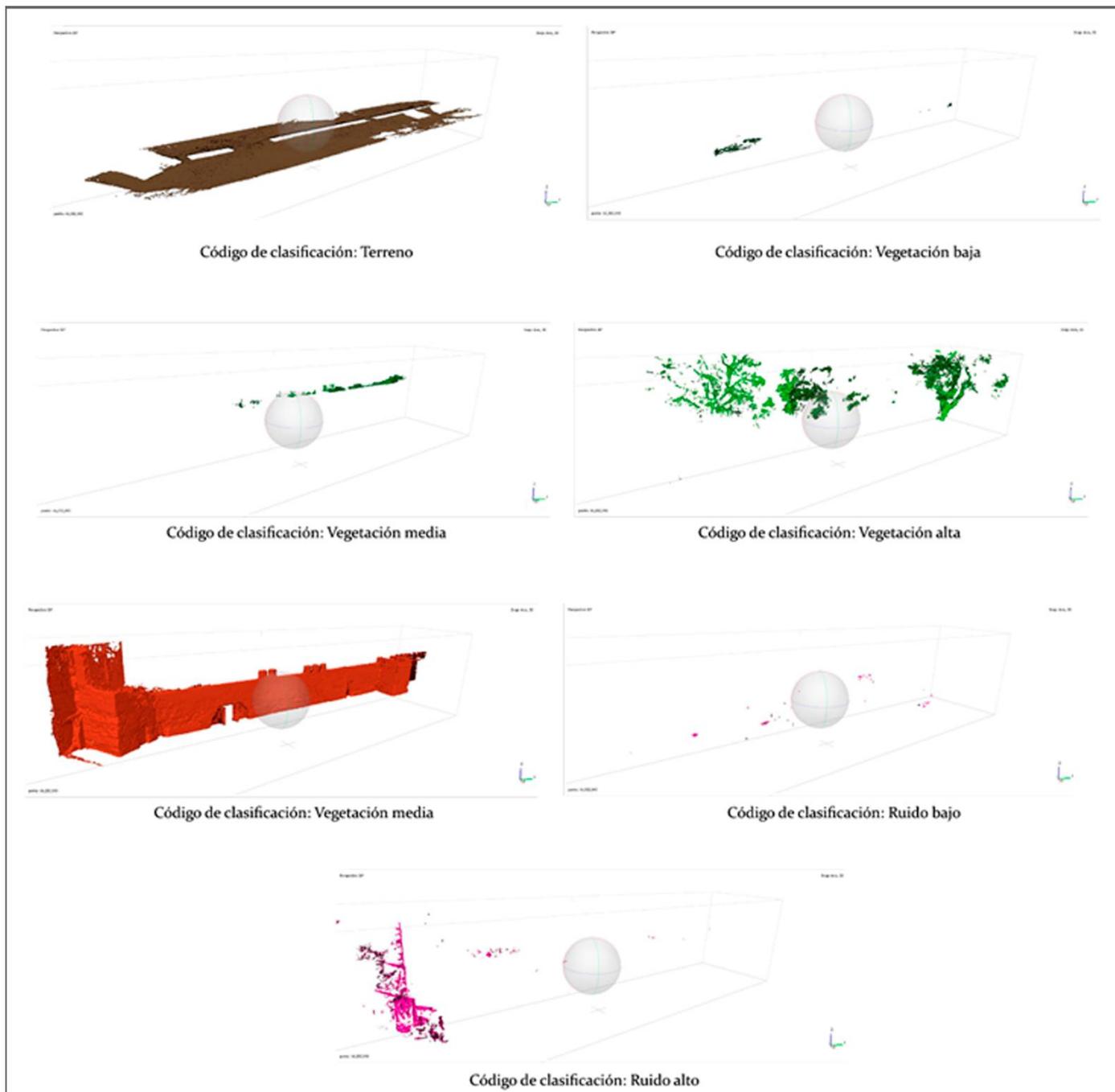


Fig.25. Códigos de clasificación de la nube de puntos.
Elaboración propia.

4. MODELIZACIÓN DE NUBES DE PUNTOS

En el siguiente capítulo, se detallan y explican los procedimientos para la obtención de los diferentes niveles de detalle de modelización tridimensional obtenidos en el proceso de la investigación, denominados LOD (*Level of detail*).

4.1. Principios básicos para el modelado SIG-3D

Una vez obtenida la nube de puntos con su respectiva clasificación o filtrado de puntos LIDAR, se ha procedido a la realización del modelado 3D. Para el desarrollo de esta fase, se plantea un modelado de nube de puntos mediante tres procedimientos diferentes: **manual**, **automático** y **semiautomático**. Tomando como referencia los LOD, se han conseguido diferentes modelos tridimensionales, estos se clasifican en cinco categorías diferentes, aunque para esta investigación se abordarán principalmente tres de ellos: **LOD₁**, **LOD₂** y **LOD₃**. En primer lugar, se desarrolla un LOD₁ mediante el modelado manual, consiguiendo una volumetría básica. Seguidamente, se obtendrá un modelado más detallado o LOD₂, siguiendo el procedimiento de modelado automático. Por último, se desarrolla un LOD₃ añadiendo detalle a sus paramentos verticales aplicando el procedimiento de modelado semiautomático.

4.1.1. Niveles de detalle (*Levels of detail, LOD*)

Los LOD, son una serie de representaciones en 3D con distintos niveles de detalle. Estos niveles de detalle son aplicados en tecnologías SIG siguiendo los criterios marcados por el CityGML (Gröger & Plümer, 2012), que es el estándar internacional para la realización de modelos de ciudades en 3D del *Open Geospatial Consistorum* (OGC). Estos LOD, se dividen en cinco categorías o niveles de detalle diferentes: LOD₀, LOD₁, LOD₂, LOD₃ y LOD₄ (Fig.26). A continuación, se detallan las distintas categorías:

- **LOD₀**: Se trata de una representación del edificio mediante polígonos en 2.5 D, contiene información sobre las alturas del elemento
- **LOD₁**: Los modelados se muestran en su volumetría más básica, mostrándose como prismas con sus alturas definidas.
- **LOD₂**: Los modelados se muestran con definición en sus cubiertas, mostrando las geometrías de las mismas.
- **LOD₃**: Los modelados contienen detalle en sus fachadas, mediante la incorporación elementos, como los huecos.
- **LOD₄**: Se trata del nivel más alto, se añaden interiores detallados a los modelados.



Fig.26. LOD (Level of detail) clasificación. Elaboración propia a partir de la información aportada por el CityGML.

4.1.2. Principales procedimientos de modelización

Para el desarrollo de esta fase, se realizó la modelización del caso de estudio en función de tres métodos o procedimientos distintos. El primero de ellos es el **manual**, realizado mediante herramientas manuales de dibujo en 3D. El segundo corresponde al modelado **automático**, siendo este realizado mediante herramientas de geoprocésamiento que generan directamente el modelo a partir de la nube de puntos. El último, el **semiautomático**, que se trata de un modelado automático donde posteriormente se modelan elementos mediante el uso de herramientas o métodos manuales (Gröger & Plümer, 2012).

4.2. Modelización del caso del estudio

En este apartado, se detallan los procedimientos por los cuales se obtuvieron los distintos LOD a partir de la modelización de la nube de puntos, obteniendo tres niveles de detalles distintos: LOD₁, LOD₂ y LOD₃.

4.2.1. Procedimiento manual: LOD₁

El procedimiento de modelización manual parte de las planimetrías obtenidas del catastro. Mediante la utilización del software AutoCAD, se realiza el modelado utilizando su función de dibujo en 3D. Este método nos permite obtener una volumetría básica del fragmento de la muralla o un LOD 1, donde se pueden apreciar las diferencias de altura entre las torres y el muro. El proceso de modelización se detalla a continuación:

- En primer lugar, se crea una nueva capa llamada **Levantamiento_3D_Muralla**, a la que se le asignará un color.
- Una vez creada la capa, se procede a trazar polilíneas sobre la planta de la muralla correspondientes al muro y a las torres.
- Por último, mediante la herramienta 3D **Extrusión**, se crean los prismas que conforman la muralla, definiendo sus alturas.

Tras completar este procedimiento, obtenemos el LOD₁ (Fig.27) del fragmento de muralla. Es importante resaltar que, gracias a la utilización del resto de herramientas que ofrece el software, se podrían obtener niveles de detalles más altos como LOD₂ o LOD₃. Sin embargo, sería necesario realizar un trabajo de campo exhaustivo de toma de datos para conseguir una precisión adecuada en el modelo, además, no sería posible su exportación a softwares SIG. Por tanto, no sería un modelo realmente eficiente para los objetivos de este trabajo.



Fig. 27. LOD1, muralla. Elaboración propia.

4.2.2. Procedimiento automático: LOD2

A continuación, se procede a realizar el modelado de la nube de puntos filtrada mediante un método automatizado, donde se utilizarán una serie de **herramientas de geoprocesamiento** incluidas en la extensión 3D Analyst de ArcGIS Pro.

Este tipo de tareas de modelado con nubes de puntos de alta densidad de puntos LIDAR, provoca que las tareas de modelado puedan llegar a demorarse demasiado, se requiere una gran cantidad de tiempo y un hardware potente. Para el desarrollo de esta tarea dentro del marco de tiempo del trabajo de investigación, es necesario reducir los puntos LIDAR de la nube para optimizarla aún más y agilizar el desarrollo de los diferentes procesos de modelización manteniendo la máxima calidad posible.

Esta tarea previa se realiza mediante la herramienta de geoprocesamiento **LAS fino** (Fig.28). Para este proceso, se realiza un duplicado del archivo **Nube_puntos_muralla_clasificada.lasd**, obtenido previamente de la exportación del archivo LAS de Metashape a ArcGIS Pro. El archivo duplicado se denominará **Nube_puntos_muralla_clasificada_reducir.lasd** y se incluirá en el Dataset LAS de entrada. A continuación, se seleccionará una dimensión de simplificación 3D y se le dará un valor de 0,05 a los valores de resolución X, Y, Z para simplificar el volumen de espacio a lo largo de sus ejes y así, conseguir una reducción de sus puntos LIDAR.

Como resultado de la aplicación de esta herramienta de geoprocesamiento, a partir de una nube de **16.201.845** puntos LIDAR se obtiene una nube de **919.873** puntos LIDAR (Fig.29). El nombre del archivo resultante será **Nube_reducida.lasd**.

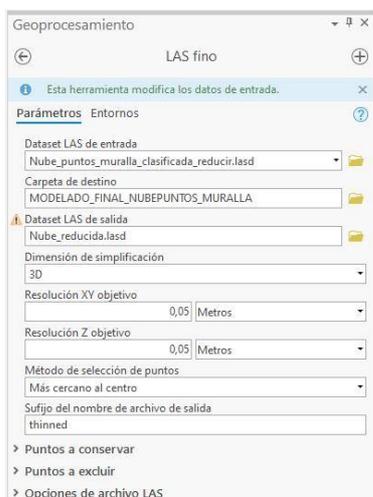


Fig. 28. Aplicación herramienta de geoprocusamiento LAS fino. Elaboración propia.

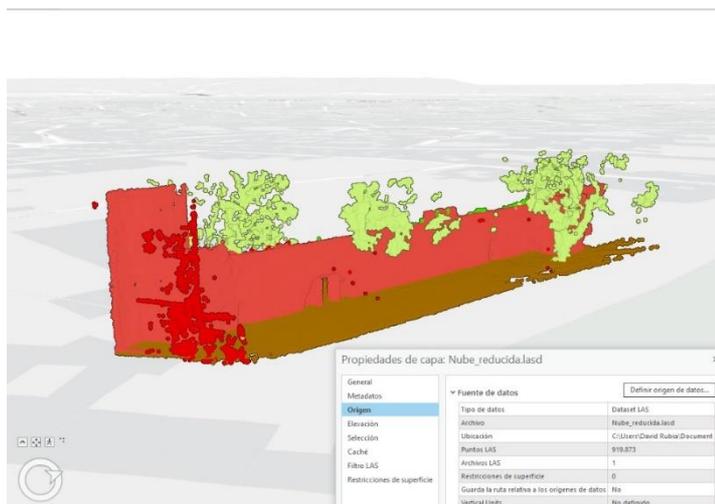


Fig. 29. Nube de puntos optimizada mediante la herramienta LAS fino. Elaboración propia.

Una vez obtenida la nueva nube de puntos optimizada, se procede a la creación de **rásters**, necesarios para la creación de modelos 3D, ya que se tratan de mapas de píxeles formados por una cuadrícula de celdas que contienen información sobre algún elemento. Para el modelado es necesario crear dos un **Modelo Digital de Terreno o DEM (Digital Elevation Model)**, que contiene información sobre la elevación del suelo, y un **Ráster del edificio** (muralla) para la extracción de su huella en 2D. A continuación, se expone el proceso de creación de los rásters:

- Creación de Modelo Digital del Terreno (DEM):

La creación del DEM, parte de la utilización de la herramienta de geoprocusamiento **De dataset LAS a ráster** (Fig.29). En el panel de esta herramienta se definen los siguientes parámetros:

- Como **Dataset LAS de entrada**, se selecciona **Nube_reducida.lasd** y como valor de **Ráster de salida**, **nube_reducida_DEM**, este último será el nombre del ráster resultante de la aplicación de la herramienta.
- En el **Campo de valor**, se debe seleccionar **Elevación**, para que seleccione la elevación de los datos LIDAR pertenecientes al terreno de la muralla.
- En el **Tipo de interpolación**, se define como valor **Triangulación**.
- En el **Método de interpolación**, se selecciona **Vecino natural**.
- En el **Tipo de simplificación**, se selecciona **Sin simplificar**.
- Respecto a los **Tipos de datos de salida**, se deja la opción que aparece por defecto: **Flotante**.
- Como últimos datos a introducir, en el **Tipo de muestra**, se selecciona **Tamaño de celda** y se le asigna un valor de **0,1 metros** para dotar al ráster de una mejor resolución y obtener más detalle.

Tras ejecutar la herramienta con estos parámetros, se obtiene el **Modelo Digital del Terreno (DEM)** (Fig.30), donde se puede apreciar, en una escala de grises, las diferentes alturas que contiene el terreno, siendo las zonas blancas las cotas más altas y las zonas negras las cotas más bajas.

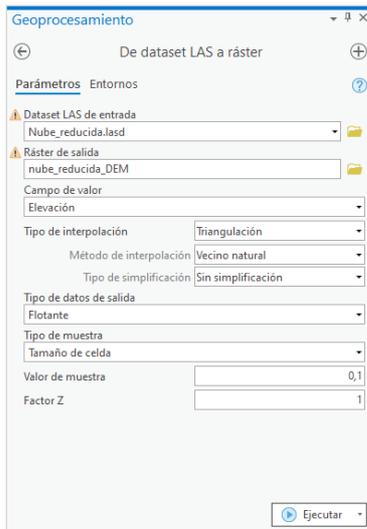


Fig. 29. Aplicación de herramienta de geoprocamiento De dataset LAS a ráster. Elaboración propia.



Fig. 30. Modelo Digital del Terreno DEM del terreno colindante a la muralla. Elaboración propia.

- **Creación ráster del edificio (muralla):**

Una vez creado el DEM, se procede a crear el ráster perteneciente al edificio, en este caso la muralla. Para esta tarea, se utiliza la herramienta **Estadísticas de puntos LAS como ráster** (Fig.31), que se encarga de buscar todos los puntos pertenecientes clasificación de edificio. En el panel de esta herramienta se definen los siguientes parámetros:

- Como **Dataset LAS de entrada**, se selecciona el archivo **Nube_reducida.lasd** y como valor de **Ráster de salida**, **nube_reducida_Raster_Muralla**, que será el archivo resultante de la aplicación de la herramienta.
- En el **Método**, se selecciona **Clase de código más frecuente**.
- En el **Tipo de muestra**, **Tamaño de celda**.
- En el **Valor de muestra**, tenemos que definir el tamaño de celda del ráster de salida, cuyo valor será de **0,1 metros** para así obtener una mejor calidad en el ráster resultante, al igual que con el ráster DEM.

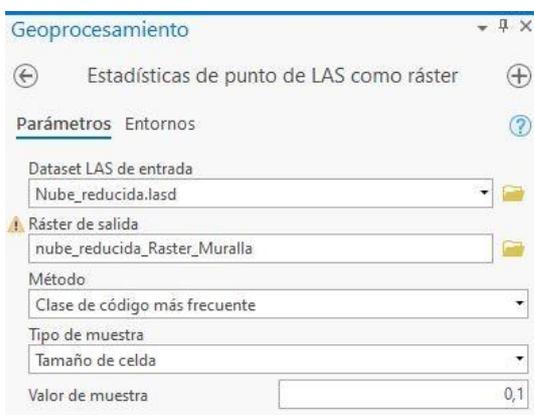


Fig. 31. Aplicación de herramienta de geoprocamiento Estadísticas de punto de LAS como ráster. Elaboración propia.



Fig. 32. Ráster del edificio, huella de la muralla. Elaboración propia.

Tras ejecutar la herramienta, se obtiene el **Ráster de edificios** (Fig.32), donde se puede apreciar la huella extraída en 2D de la muralla.

En la Fig. 33, se muestra la superposición de las dos capas ráster: el DEM en escala de grises y el Ráster de edificio en color naranja.



Fig. 33. Modelo Digital del Terreno (DEM) y Ráster del edificio superpuestos. Elaboración propia.

Una vez finalizada la tarea de creación de rásters, es necesario depurar la huella del edificio obtenida del **Ráster de edificios** para generar una capa vectorial definitiva de la huella del edificio. A continuación, se expone el proceso de depuración de la huella del edificio:

- Depuración de la huella del edificio:

Como paso previo a la depuración, es necesario convertir el ráster a un polígono mediante la herramienta de geoprocésamiento **De ráster a polígono** (Fig.34) y así, crear una nueva capa formada por polígonos que permita su modificación. En el panel de esta herramienta se definen los siguientes parámetros:

- En **Ráster de entrada**, se selecciona el ráster creado con anterioridad, **nube_reducida_Raster_Muralla**.
- En **Campo**, se selecciona el valor predeterminado, **Value**.
- En **Entidades de polígono de salida**, **Raster_Muralla_SinProcesar**, este será el archivo resultante de la aplicación de la herramienta.
- Es importante desmarcar la opción **simplificar polígonos**, ya que esta tarea se desarrollará de manera más sofisticada mediante otras herramientas de geoprocésamiento posteriormente.

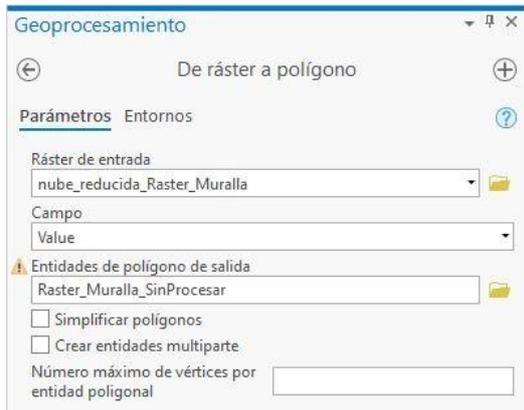


Fig. 34. Aplicación de herramienta de geoprocetamiento, De ráster a polígono. Elaboración propia.



Fig. 35. Polígono de la huella de la muralla. Elaboración propia.

Como se puede observar en la Fig.35, existen numerosas irregularidades en el polígono del edificio como **agujeros o huecos** existentes, **pequeños polígonos** que no pertenecen a la huella real del edificio y **bordes irregulares**. Es necesario corregir y depurar todos estos elementos para obtener un modelado lo más preciso posible.

Como primer paso de esta depuración, se utiliza la herramienta de geoprocetamiento **Seleccionar capa por atributo** (Fig.36), de la extensión **Herramientas de administración de datos**, para seleccionar los polígonos no pertenecientes a la huella del edificio y poder eliminarlos. En el panel de esta herramienta se definen los siguientes parámetros:

- En **Filas de entrada**, se selecciona **Raster_Muralla_SinProcesar**.
- En Tipo de selección, **Nueva selección**.
- En el siguiente paso, seleccionamos uno de los pequeños polígonos que no pertenecen a la huella del edificio. En la ventana de información, nos fijaremos en el valor **Shape_Area** para saber el área en m^2 que tienen los polígonos pequeños. Una vez conocido este valor que, en función del polígono seleccionado, ronda entre los $00,1 m^2$ y $0,07 m^2$ será necesario utilizar la herramienta que solo seleccione los polígonos superiores a $0,07 m^2$.

Una vez ejecutada la herramienta, se seleccionarán únicamente los polígonos cuyos parámetros se definieron con anterioridad, dejando fuera los polígonos más pequeños que no interesan para la posterior modelización (Fig. 37).

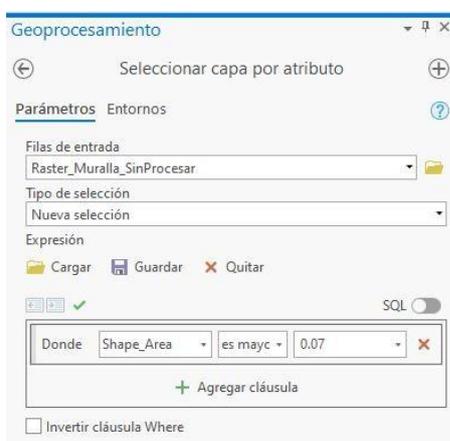


Fig. 36. Aplicación de herramienta de geoprocetamiento, Seleccionar capa por atributo. Elaboración propia.



Fig. 37. Resultado de aplicación de la herramienta Seleccionar capa por atributo, se puede apreciar la selección de polígonos. Elaboración propia.

Una vez seleccionados los polígonos válidos para el modelado, el siguiente paso es la eliminación de todos aquellos polígonos que no pertenecen a la huella, mediante la aplicación de la herramienta de geoprocésamiento **Eliminar parte del polígono** (Fig.38). En el panel de esta herramienta se definen los siguientes parámetros:

- En **Entidades de entrada**, seleccionamos la capa **Raster_Muralla_SinProcesar**.
- En **Clase de entidad de salida**, la capa resultante de la aplicación de la herramienta se denominará **Muralla_Reducida_Limpia**.
- En **Condición**, se selecciona **Área**.
- En **Área**, se seleccionan el atributo definido en la anterior tarea de selección de polígonos que es el valor de **0,07 m²**.

Una vez ejecutada la herramienta, se puede observar que algunos de los huecos y polígonos no pertenecientes a la huella del edificio han sido eliminados (Fig.39).

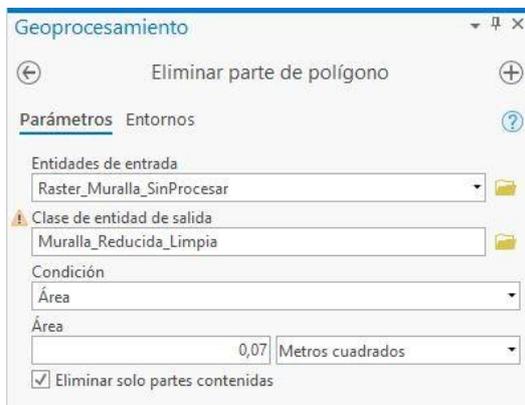


Fig. 38. Aplicación de herramienta de geoprocésamiento, Eliminar parte del polígono. Elaboración propia.



Fig. 39. Polígono de la huella de la muralla limpia. Elaboración propia.

Como tarea final de la depuración de la huella del edificio, es necesario regularizar los bordes del mismo mediante la herramienta de geoprocésamiento **Regularizar huella de edificio** (Fig.40). En el panel de esta herramienta se definen los siguientes parámetros:

- En **Entidades de entrada**, se selecciona la capa de **Muralla_Reducida_Limpia**.
- En **Clase de entidad de salida**, **Muralla_Reducida_Limpia_Regularizada**. Esta capa será el resultado de la aplicación de esta herramienta.
- En **Método**, tras varios intentos de prueba y error, se encontró que lo más óptimo para la realización de modelados 3D para este tipo de edificios, sin ángulos pronunciados ni geometrías demasiado complejas, es el valor de **Ángulos rectos**.
- Para la **Tolerancia**, tras realizar varios ensayos de prueba y error, se da un valor de **1**.

- Para la **Densificación**, tras realizar varios ensayos de prueba y error, se da un valor de **1**.
- En **Precisión**, se define la precisión de la cuadrícula resultante de la regularización de la huella del edificio, tras realizar varios ensayos de prueba y error, se le da un valor de **0,05**.

Tras ejecutar la herramienta, obtenemos la huella del edificio completamente regularizada (Fig. 41). Una vez finalizada esta tarea de depuración de la huella de la muralla, se procedió a realizar el modelado 3D.

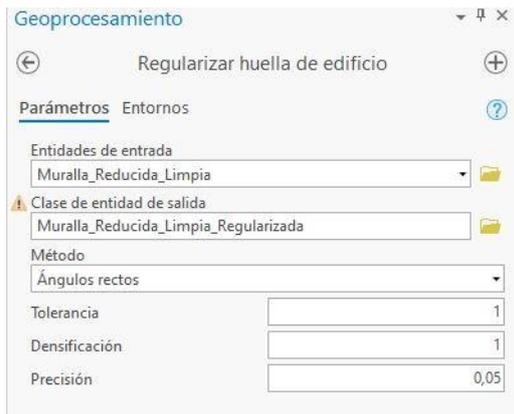


Fig. 40. Aplicación de herramienta de geoprocesamiento, Regularizar huella de edificio. Elaboración propia.



Fig. 41. Huella de la muralla regularizada. Elaboración propia.

A continuación, se procede a realizar el modelado 3D de la muralla, mediante la herramienta de geoprocesamiento **Edificios multiparache LAS** (Fig.42), perteneciente a la extensión 3D Analyst. En el panel de esta herramienta se definen los siguientes parámetros:

- En **Dataset LAS de entrada**, seleccionamos la capa de nube de puntos de la que partimos al inicio del proceso de modelado, **Nube_reducida.lasd**.
- En **Entidades de entrada**, será necesario seleccionar la capa denominada **Muralla_Reducida_Limpia_Regularizada**.
- En **Selección de puntos del tejado LAS**, se tiene que seleccionar los puntos pertenecientes al código de clasificación de edificio, por lo tanto, se selecciona **Puntos clasificados del edificio**.
- En **Altura de suelo**, se escoge la opción **Capa ráster** y se selecciona el DEM obtenido de la nube de puntos, **nube_reducida_DEM**.
- En **Clase de entidad multiparache de salida**, se detalla el nombre del archivo **MODELO3D_MURALLA_REDUCIDA**. Este será el archivo resultante de la aplicación de la herramienta.
- En **Tolerancia de simplificación**, se escribe el mismo valor que el tamaño de celda que se introdujo para la creación del DEM: **0,1 metros**.

Una vez ejecutada esta herramienta, el software procede a realizar el levantamiento 3D del edificio, obteniéndose un modelado 3D en **LOD2** (Fig. 43).

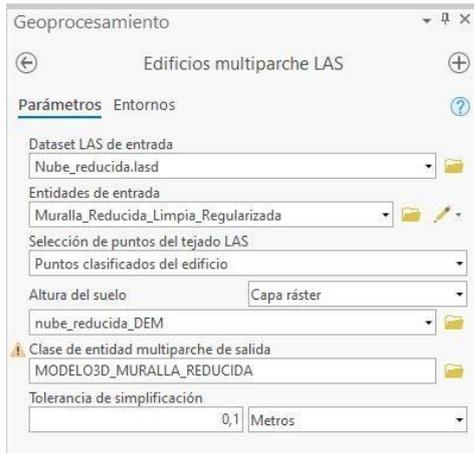


Fig. 42. Aplicación de herramienta de geoprocesamiento, Edificio multiparache LAS. Elaboración propia.



Fig. 43. Modelado 3D muralla LOD2 tras la aplicación de la herramienta Edificios multiparache LAS. Elaboración propia.

4.2.3. Procedimiento semiautomático: LOD₃

Tras realizar la modelización automatizada, se procedió a realizar el modelado tridimensional en su nivel LOD₃. Partiendo del LOD₂, mediante el uso de herramientas de edición pertenecientes a la opción de modificación de entidades de ArcGIS Pro, se añadieron los huecos de las entradas pertenecientes a los paramentos verticales o fachadas de la muralla. El desarrollo de esta fase consta de dos tareas principales: la **sectorización del modelo LOD₂** y la **segmentación** del mismo mediante la **eliminación de entidades** para crear los huecos. A continuación, se detallan dichas tareas:

- Segmentación del modelo LOD₂:

La sectorización del modelo se basa en tres criterios distintos: el sector perteneciente a los muros, el sector perteneciente a las torres y el sector perteneciente a los huecos. Estos criterios de sectorización son los utilizados por distintos estudios en la muralla de la Macarena (Quesada Cano et al., 2021) (di Sivo et al., 2019).

Como primer paso para la creación de manera manual de los huecos de la muralla, es necesario la sectorización de la misma, para así, estimar la posición de los huecos en sus paramentos verticales y poder realizar la tarea de eliminación de esas zonas correspondientes a los huecos.

Esta sectorización parte de la utilización de la herramienta de edición **Dividir multiparache** (Fig.44) mediante esta, es posible crear un plano de corte editable que permie la división del modelo en varios sectores. Como primer paso, se sectorizan los muros y las torres mediante planos de corte verticales (Fig.45). Finalizada esta sectorización, se procedió a estimar la posición de los huecos mediante la colocación de planos de corte verticales, delimitando el ancho de estos (Fig. 47). Por último, una vez delimitado el ancho de los huecos, se realizó su acotación vertical mediante planos de corte horizontales (Fig.48), creando así los sectores pertenecientes a los huecos de fachada de la muralla (Fig.49).

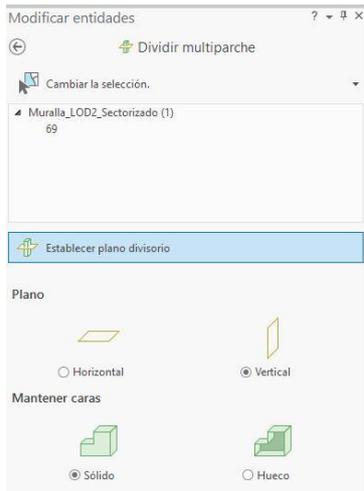


Fig. 44. Herramienta de modificación de entidades Dividir multiparche. Elaboración propia.

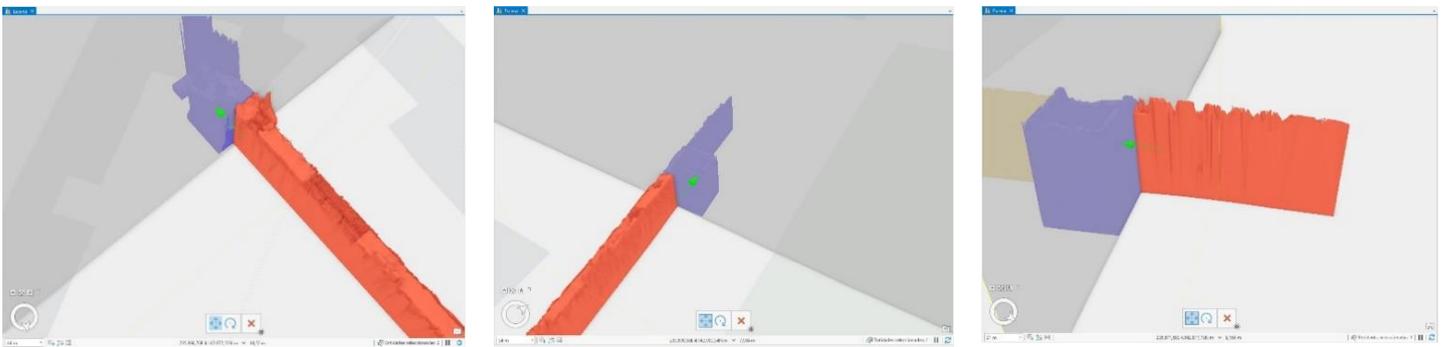


Fig. 45. Elaboración de la sectorización de la muralla, torres y muros. Elaboración propia.

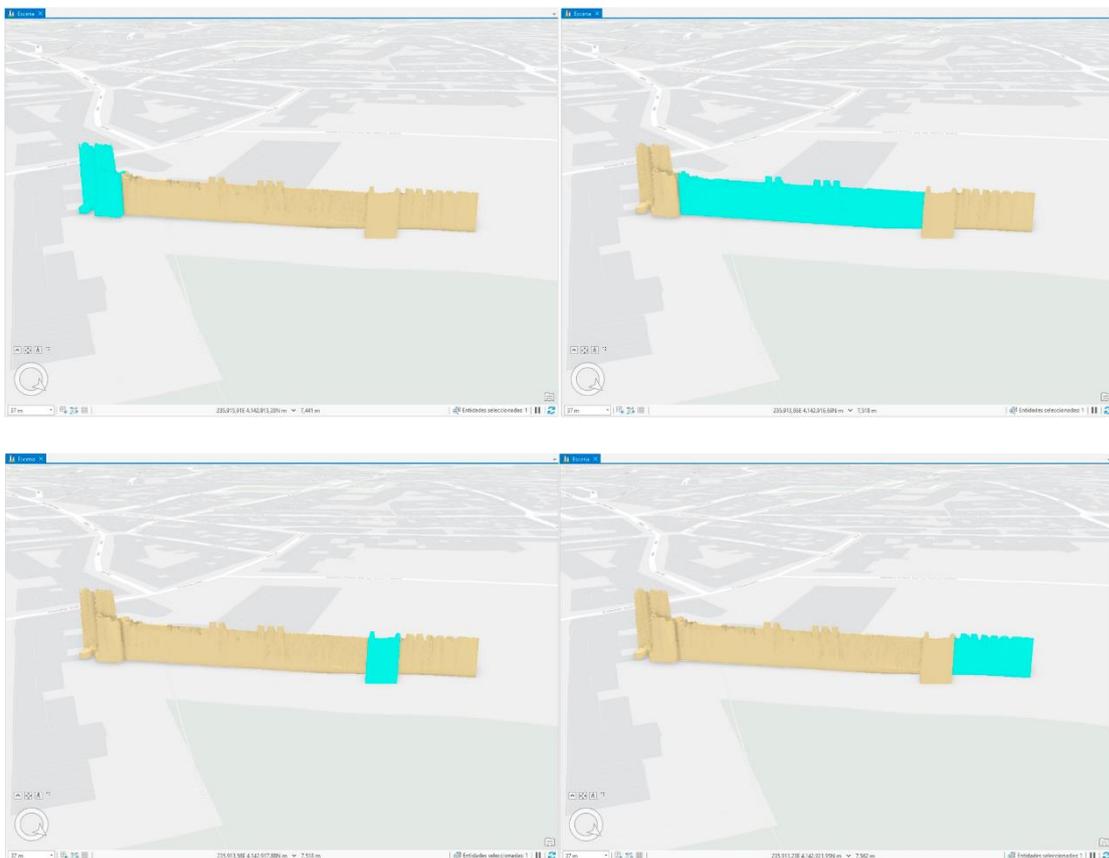


Fig. 46. Sectores resultantes a la aplicación de los planos de corte. Elaboración propia.

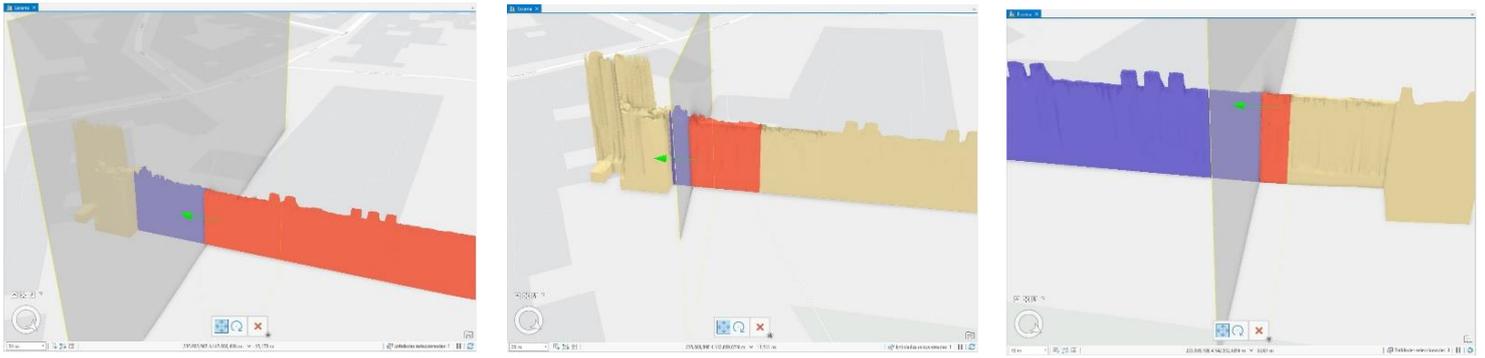


Fig. 47. Estimación del ancho de los huecos mediante los planos de corte verticales.

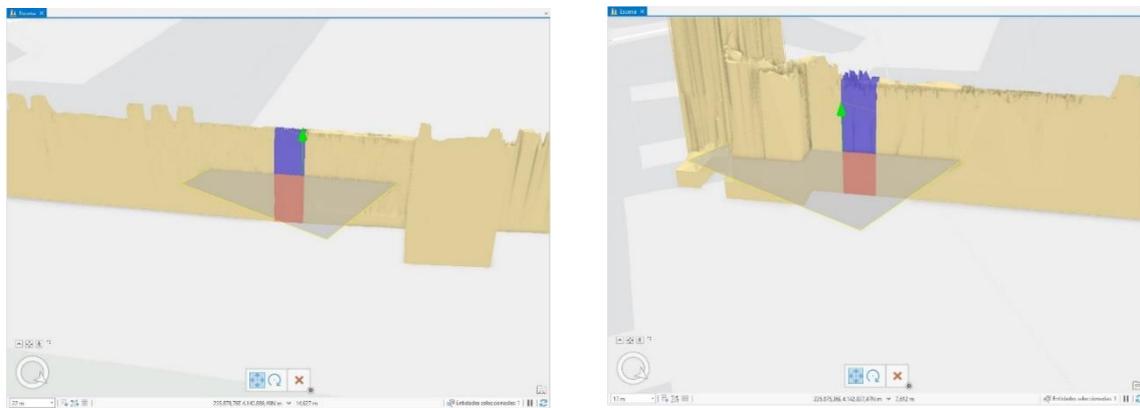


Fig. 48. Cortes horizontales para la delimitación de la altura de los huecos. Elaboración propia.

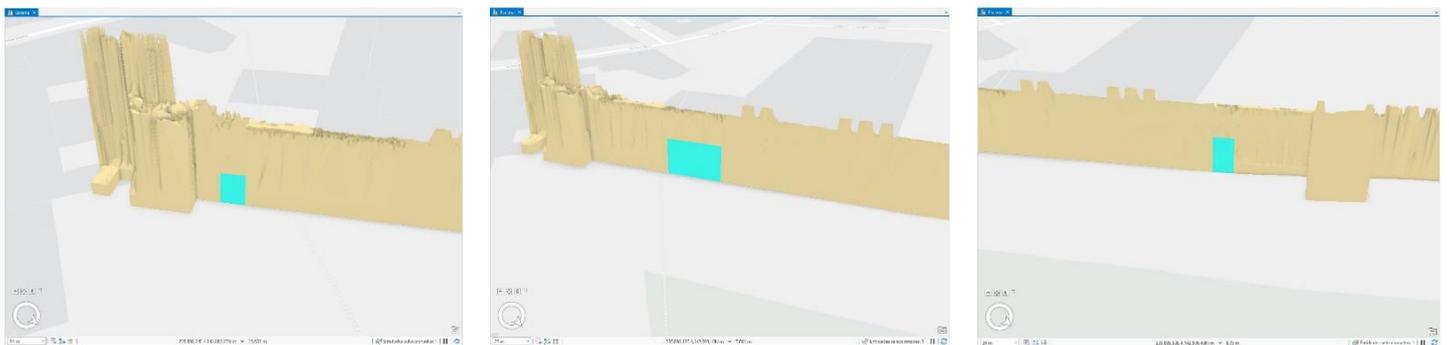


Fig. 49. Sectores pertenecientes a las estimaciones de los huecos. Elaboración propia.

Una vez obtenidos los sectores correspondientes a los huecos, mediante la herramienta de edición de **Eliminar entidades**, se eliminan estos sectores, creando un vaciado que representa de manera esquematizada los huecos de paso que contiene la muralla en sus paramentos verticales (Fig.50) dando como resultado un modelado 3D en **LOD3**.



Fig. 50. LOD3, muralla. Elaboración propia.

4.3. Integración de información de contexto

Una vez finalizado el desarrollo de los diferentes LOD, el siguiente paso fue el incluir una escena tridimensional completa, incorporando todo el entorno colindante al caso de estudio, el fragmento de la muralla. Para el desarrollo de esta tarea y comprender bien el entorno de los Jardines del Valle, se incorporó a la escena la topografía colindante a esta y un modelo tridimensional urbano del sector de la ciudad al que pertenece.

4.3.1. Topografía

Para esta tarea de incorporación de la topografía del entorno, es necesario crear dos superficies de elevación que repliquen dicho terreno, para la correcta realización de esta tarea, fue necesario crear dos superficies de elevación distintas: **La superficie de elevación correspondiente al entorno de la muralla**, obtenida de la nube de puntos inicial y **la superficie de elevación colindante**, referente a todo el sector de la ciudad de Sevilla donde se encuentra el caso de estudio, obtenida de la nube de puntos del PNOA. A continuación, se detalla el desarrollo de la creación de las dos superficies de elevación.

- Integración de la superficie de elevación del entorno de la muralla:

Para la integración de esta topografía, bastó con añadir el modelo digital del terreno (DEM) de la nube de puntos como una nueva superficie de elevación. A continuación, se detalla este proceso:

- Se selecciona el apartado de **Superficies de elevación**, en la columna de **Contenido**. Una vez seleccionado, se elige la opción **Agregar nueva superficie de elevación**, una vez hecho esto, se selecciona el archivo ráster **nube_reducida_DEM**.

Una vez finalizado este proceso, de manera automática, se añade la superficie de elevación colindante a la muralla (Fig.51).

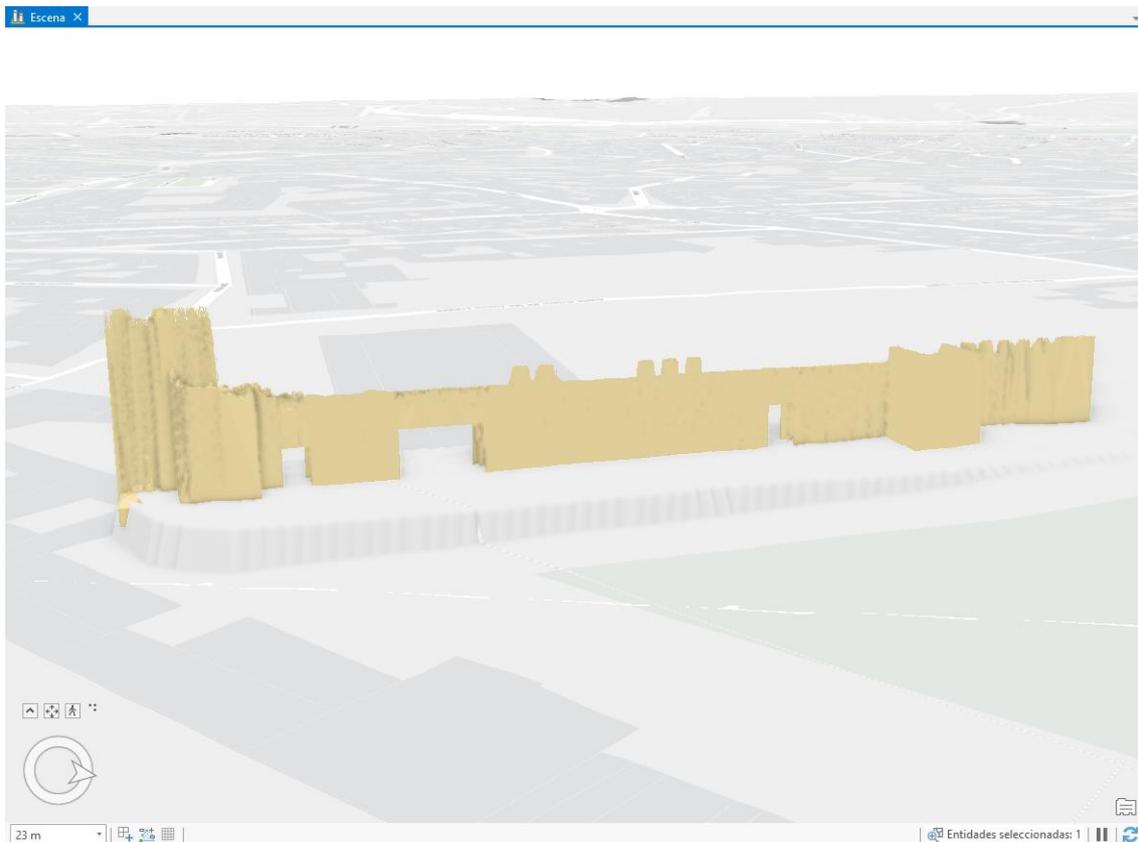


Fig. 51. Modelado 3D muralla con la incorporación de la superficie de elevación colindante. Elaboración propia.

- Integración de superficie de elevación colindante (sector de la ciudad):

Para la realización de esta tarea, es necesario crear un nuevo Modelo Digital del Terreno (DEM) de todo el sector de la ciudad de Sevilla donde se encuentra la muralla. Para ello, se ha usado la nube de puntos del PNOA, que contiene una densidad de puntos suficiente para desarrollar un DEM a gran escala. A continuación, se detalla este proceso:

Al igual que como se realizó el DEM de la nube de puntos de la muralla, se utiliza la herramienta de geoprocesamiento **De dataset LAS a ráster** (Fig.52). En el panel de esta herramienta se definen los siguientes parámetros:

- Como **Dataset LAS de entrada**, se selecciona **PNOA_NUBE_PUNTOS.lasd** y como valor de **Ráster de salida**, **pnoa_DEM**, este último será el nombre del ráster resultante de la aplicación de la herramienta.
- En el **Campo de valor**, se debe seleccionar **Elevación**, para que seleccione la elevación de los datos LIDAR pertenecientes al terreno.
- En el **Tipo de interpolación**, se define como valor **Triangulación**.
- En el **Método de interpolación**, se selecciona **Vecino natural**.
- En el **Tipo de simplificación**, se selecciona **Sin simplificar**.
- Respecto a los **Tipos de datos de salida**, se deja la opción que aparece por defecto, **Flotante**.
- Como últimos datos a introducir, en el **Tipo de muestra**, se selecciona **Tamaño de celda** y se le asigna un valor de **0,1 metros** para dotar al ráster de una mejor resolución y obtener más detalle.

Tras ejecutar la herramienta, se obtiene el **Modelo Digital del Terreno (DEM)** (Fig.53), donde se puede apreciar, en una escala de grises, las diferentes alturas que contiene el terreno de todo el sector, siendo las zonas blancas las cotas más altas y las zonas negras las cotas más bajas.

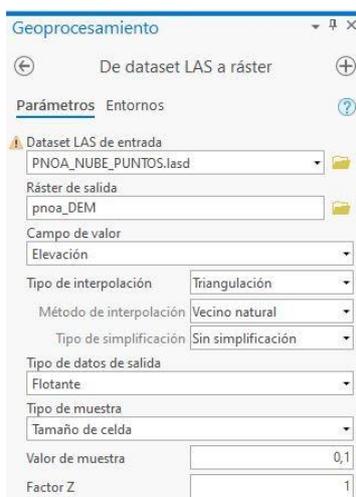


Fig. 52. Aplicación de herramienta de geoprocésamiento, De dataset LAS a ráster. Elaboración propia.

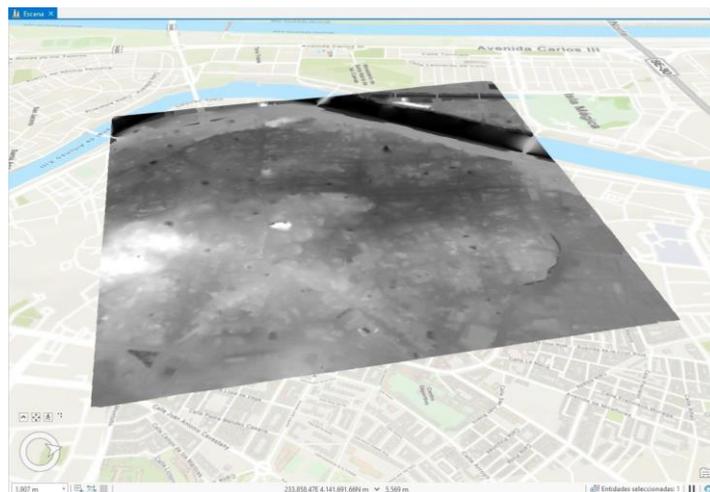


Fig. 53. Modelo digital del terreno (DEM) sector completo. Elaboración propia.

Una vez finalizado este proceso de creación del modelo digital del terreno, al igual que sucedía con la anterior tarea, fue necesario crear una nueva superficie de elevación para incorporar el resto del terreno a la escena 3D de la muralla. A continuación, se detalla este proceso:

- Se selecciona el apartado de **Superficies de elevación**, en la columna de **Contenido**. Una vez seleccionado, se elige la opción **Agregar nueva superficie de elevación**, una vez hecho esto, se selecciona el archivo ráster **pnoa_DEM**.

Al finalizar este proceso, de manera automática, el software incorpora la nueva superficie de elevación tal y como se muestra en la Fig. 54.



Fig. 54. LOD3 de la muralla con las superficies de elevación.
Elaboración propia.

4.3.2. Bienes arquitectónicos

Para esta tarea, se parte del trabajo realizado en el contexto del **PD-PHiM** (Hidalgo-Sánchez et al., 2022), cedido para su integración en este trabajo de investigación. En dicho documento, se desarrollaron diferentes modelados mediante métodos semiautomáticos de modelización que dieron como resultado un modelado tridimensional en LOD₁ y LOD₂ de la ciudad de Sevilla, por lo tanto, para la complementación de la escena tridimensional que rodea a la muralla, se integrará el sector correspondiente a la zona de los Jardines del Valle de este modelo urbano 3D. El proceso de incorporación de estos modelados es sencillo, basta con incorporar el archivo SIG al documento de trabajo.

El desarrollo de estas tareas y subtareas de modelización, dan como resultado una escena completa en 3D, que ayuda a entender mejor todo el territorio y escenario urbano colindante a la muralla de los Jardines del Valle (Fig.55).

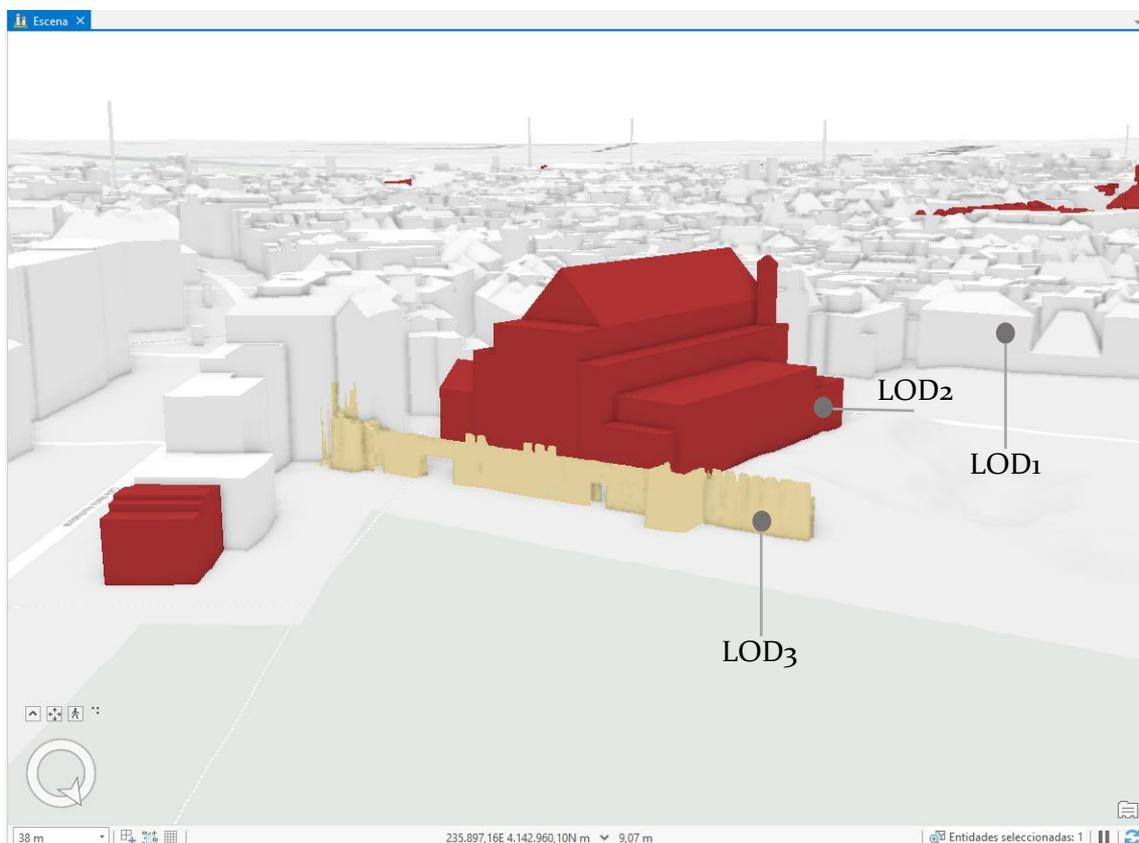


Fig.55. Escena tridimensional de la muralla y todo su entorno, en ella se muestran los diferentes LOD del conjunto urbano (LOD₁, LOD₂ y LOD₃). Elaboración propia.

5. GESTIÓN DE LA INFORMACIÓN

5.1. Vínculo con la información temática

En el siguiente apartado, se detalle el proceso de incorporación de la información a los diferentes elementos que componen la muralla, este proceso se inicia con la sectorización de sus unidades particulares y, por último, la publicación de los resultados obtenidos mediante la plataforma ArcGIS Online.

5.1.2. Datos generales del bien

Tras la realización de todo el proceso de modelización 3D, el siguiente paso fue realizar la sectorización para la caracterización de sus paramentos principales y así acercar este trabajo de investigación al contexto del PD-HiM.

En primer lugar, siguiendo un procedimiento similar al proceso de segmentación del LOD₂ para la creación de los huecos en la muralla, se realizó la sectorización del modelo mediante la utilización de la herramienta de **Dividir multiparce** de las opciones de **Edición de entidades**. De esta manera, fue necesario volver a realizar este proceso de sectorización, puesto que, para añadir información a las distintas entidades de los huecos, se necesita una volumetría sólida, debido a que el hueco no es contabilizado como entidad al ser un vaciado del modelo 3D original.

Como primer paso, se partió del mismo modelo LOD₂ y se realizó la sectorización mediante la utilización de los planos de corte proporcionados por la herramienta, llegando al modelo sectorizado previo a la realización del LOD₃. Seguidamente, para la correcta caracterización de los distintos elementos de la muralla, se realizó una agrupación de entidades mediante la utilización de la herramienta **Fusionar** en el panel de edición de entidades, obteniendo así tres grupos de entidades (Fig.56) de la muralla: **los muros, las torres y los huecos**.

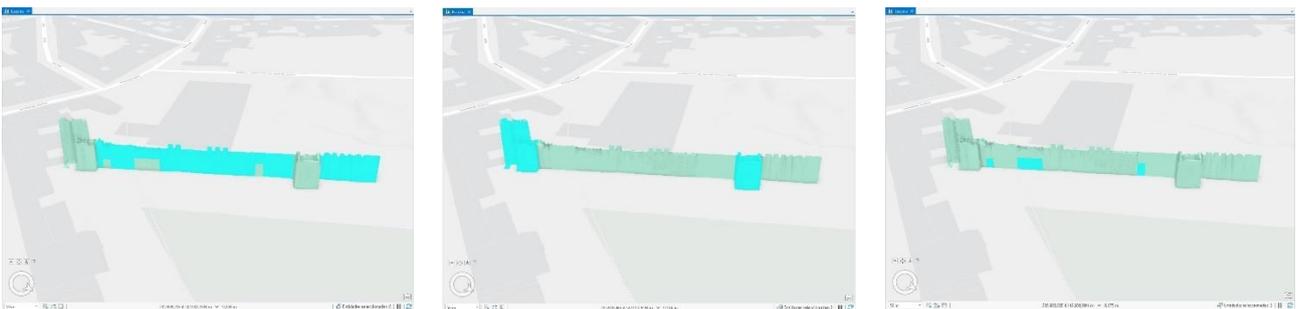


Fig.56. Selección de entidades para su fusión, en orden de izquierda a derecha: muros, torres y huecos. Elaboración propia.

En segundo lugar, una vez se crearon las tres entidades, se procedió a modificar sus atributos para poder diferenciarlas entre sí, ya que no era posible visualizar los huecos ni la posición de los mismos. Para esta tarea, se crearon unos nuevos campos de atributos mediante la edición de campos en la opción de datos del panel de edición de entidades, así mismo, se crearon dos campos diferentes para facilitar la diferenciación de las

entidades, una para los huecos en la muralla denominada **Huecos** y otra para el resto de entidades denominada **Sólido** (Fig.57).

Visible	Solo lectura	Nombre de campo	Alias	Tipo de datos	Permitir NULO	Resaltar	Formato de número	Dominio	Predeterminado	Longitud
<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	ORIG_FID	ORIG_FID	Largo	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Numérico			
<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	ORIG_OID	ORIG_OID	Largo	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Numérico			
<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	STATUS	STATUS	Largo	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Numérico			
<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	ORIG_OID_1	ORIG_OID_1	Largo	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Numérico			
<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Hueco	Hueco	Largo	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Numérico			
<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Solido	Solido	Largo	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Numérico			

Fig.57. Creación de campos: Hueco y Sólido. Elaboración propia.

Una vez creados los nuevos campos, se comprobó su incorporación a la tabla de atributos de las entidades y se les asignó un código numérico para poder añadirlos a las entidades correspondientes (Fig.58), asignando un 1 al campo **Hueco** e incorporándolo a la entidad correspondiente a los huecos de la muralla y con un 2 al campo **Sólido**, asignándolo a las entidades de los muros y las torres.

OBJECTID *	Shape *	Id	gridcode	ORIG_FID	ORIG_OID	STATUS	ORIG_OID_1	Hueco	Solido
2	Multiparche	<Nulo>	<Nulo>	<Nulo>	<Nulo>	<Nulo>	<Nulo>	<Nulo>	2
3	Multiparche	<Nulo>	<Nulo>	<Nulo>	<Nulo>	<Nulo>	<Nulo>	<Nulo>	2
11	Multiparche	<Nulo>	<Nulo>	<Nulo>	<Nulo>	<Nulo>	<Nulo>	1	<Nulo>

Fig.58. Comprobación y asignación de códigos en la tabla de atributos. Elaboración propia.

Una vez finalizada la tarea de la creación de los nuevos campos de atributos, se procedió a modificar la simbología de las entidades en función de los campos creados y así obtener unas entidades visualmente diferenciadas, por lo tanto, mediante el panel de **Simbología de las entidades**, se seleccionó una simbología principal en función de **Valores únicos**, pudiendo así crear una distinta para cada uno de los campos (Fig.59). Al campo 1 (Hueco) se le asignó un color gris y una transparencia de capa (Fig.60) que provocase el efecto visual de hueco y al campo 2 (Sólido) un color arena con la opacidad de la capa al máximo.

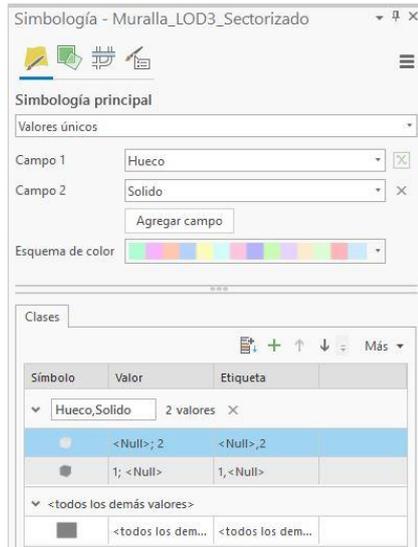


Fig.59. Simbología de las identidades. Elaboración propia.

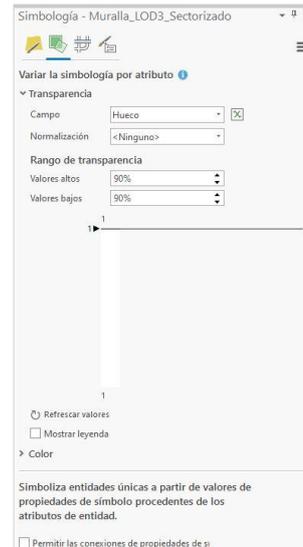


Fig.60. Valores de transparencia del campo Hueco. Elaboración propia.

Tras finalizar estas tareas de creación de entidades del modelo, se obtuvo un modelo tridimensional sectorizado en un nivel LOD₃ (Fig.61). Se pudo comprobar que al realizar una entidad de hueco con una transparencia en vez de con un vaciado del propio modelo, el LOD mantenía información en su interior sobre los huecos situados en sus paramentos verticales que, aunque no se encuentran modelizados, se deja entrever su forma y dimensiones.

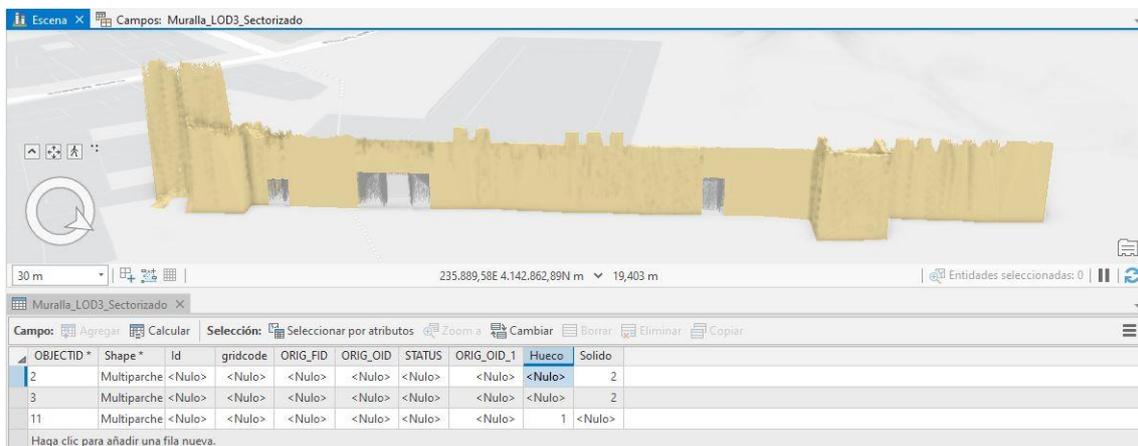


Fig.61. LOD₃ sectorizado. Elaboración propia.

5.1.3. Datos específicos de los sectores

Con las nuevas entidades del modelo ya creadas, se realizó la vinculación a estas de información temática desarrollada en el trabajo realizado en el marco del PD-PHiM (Hidalgo-Sánchez et al., 2022). La información recogida del inmueble de la muralla de los Jardines del Valle viene detallada en una tabla de atributos realiza en el software ofimático Excel.

Para la vinculación de esta información a la tabla de atributos correspondiente a la capa de la muralla en ArcGIS Pro, en primer lugar, se añadió la hoja de Excel al panel de contenido, seguidamente, mediante la opción **Uniones y relaciones** de la capa, se realizó la unión de los datos **agregando una nueva unión**, dando como resultado una nueva tabla de atributos con toda la información temática (Fig.62).

OBJECTID	Shape	Id	gridcode	ORIG_FID	ORIG_OID	STATUS	ORIG_OID_1	Hueco	Solido	NUM_LIST	INMUEBLE	ID_COD	CAPA_NDE	GEOM
2	Multiparche	18	<Nulo>	<Nulo>	<Nulo>	<Nulo>	<Nulo>	<Nulo>	2	18	Murallas del Valle	MVALLE_000_01_CONT	Contorno Edificio (1)	Poligono
3	Multiparche	18	<Nulo>	<Nulo>	<Nulo>	<Nulo>	<Nulo>	<Nulo>	2	18	Murallas del Valle	MVALLE_000_01_CONT	Contorno Edificio (1)	Poligono
11	Multiparche	18	<Nulo>	<Nulo>	<Nulo>	<Nulo>	<Nulo>	<Nulo>	1	18	Murallas del Valle	MVALLE_000_01_CONT	Contorno Edificio (1)	Poligono

Fig.62. Tabla de atributos de las entidades de la muralla con la nueva información vinculada.
Elaboración propia.

Una vez se vincula la información, es necesario guardar todo el proceso mediante la herramienta de geoprocesamiento **Clase de entidad a clase de entidad** (Fig.63), dando como resultado una nueva capa tridimensional de la muralla con todos los datos de su tabla de atributos actualizados (Fig.64).

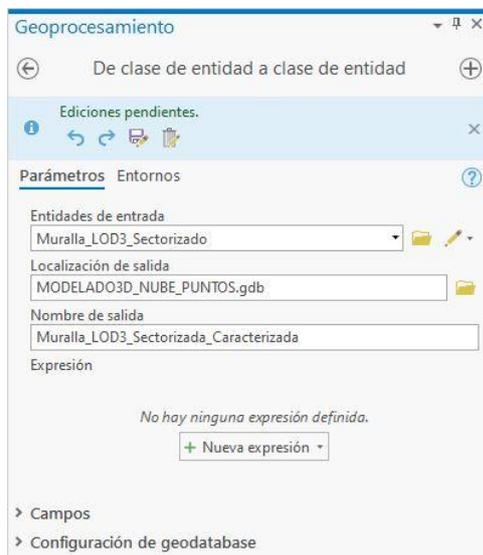


Fig.63. Aplicación de la herramienta de geoprocesamiento De clase de entidad a clase de entidad. Elaboración propia.

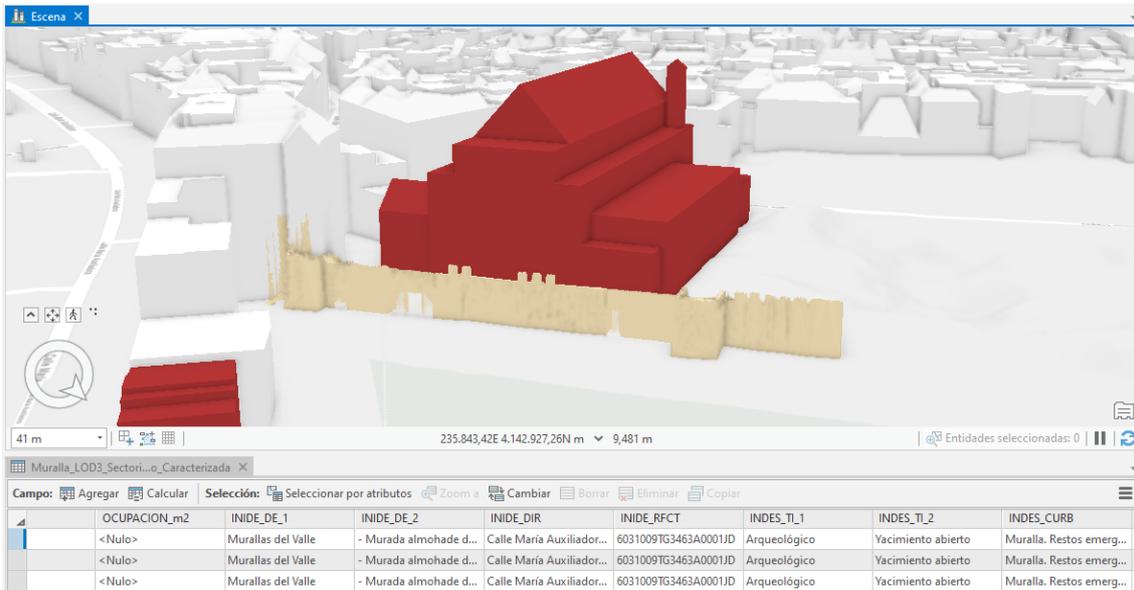


Fig.64. LOD3 sectorizado con la tabla de atributos actualizada.
Elaboración propia.

5.2. Publicación de resultados

En este apartado, una vez vinculada la distinta información temática a los sectores de la muralla, se ha procedido a la publicación de toda la escena tridimensional desarrollada en la plataforma de ArcGIS Online, creando una escena web al alcance de cualquier usuario que desee consultarla. La creación de esta escena web se realizó mediante la opción **Compartir escena web** (Fig.65), añadiendo un título, un breve resumen del contenido y una serie de etiquetas relacionadas con el tema.



Es importante destacar que, para la publicación de una escena web en ArcGIS Online, es necesario establecer el sistema de coordenadas **WGS 1984 Web Mercator**, puesto que son las coordenadas predeterminadas usadas por el programa para la publicación de datos online.

Fig.65. Aplicación de la opción Compartir escena web.
Elaboración propia.

Una vez que el programa finaliza con la publicación de todos los datos y capas que forman la escena web, obtenemos una escena tridimensional de la muralla y su entorno totalmente funcional e interactivo con los distintos elementos que la conforman (Fig.66).

Se puede observar cómo al seleccionar los distintos elementos de la muralla (muros, torres o huecos), la escena nos muestra toda la información vinculada a esta (Fig.67).



Fig.66. Escena web tridimensional completa de la Muralla de los Jardines del Valle, publicada en la plataforma ArcGIS Online. Elaboración propia.

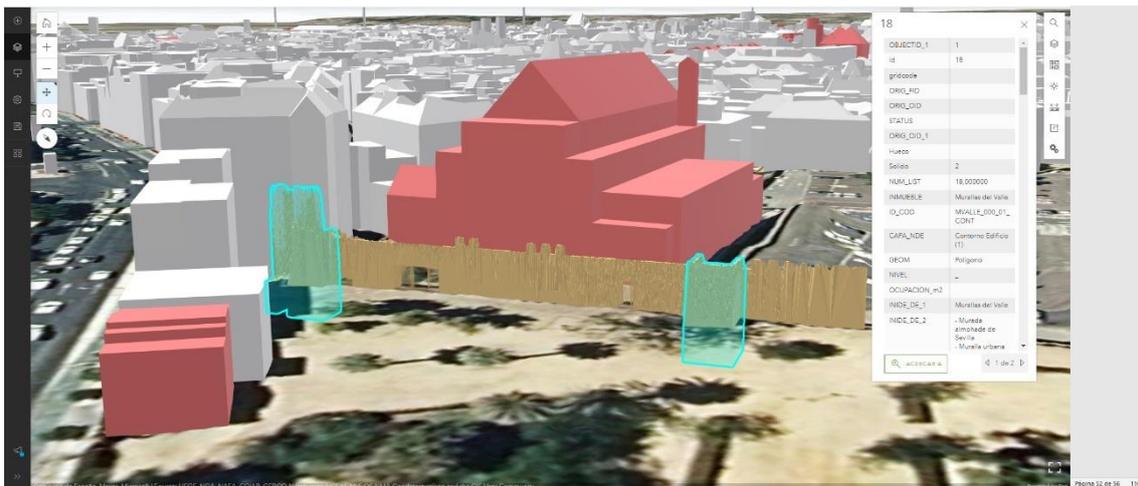


Fig.67. Ejemplo de selección de los elementos pertenecientes a las torres. A la derecha, se observa la tabla de atributos con la información asociada a las torres. Elaboración propia.

La escena web puede consultarse en ArcGIS Online mediante el siguiente link:

<https://arcg.is/1jCX1j>

O mediante el siguiente código QR:



6. CONCLUSIONES

Respecto a los trabajos de clasificación, podemos obtener como conclusión que, debido al alto nivel de detalle y densidad de la nube de puntos, la clasificación mediante herramientas de filtrado automatizadas no es eficiente, ya que los softwares de tratamientos de datos LIDAR no son capaces de distinguir tanta cantidad de puntos, dando como resultado errores en su clasificación o simplemente la imposibilidad de realizar clasificación alguna, mezclando diferentes códigos de filtrado de puntos, por lo tanto, para estos casos de trabajos fotogramétricos de gran detalle, es necesaria una clasificación mediante métodos de filtrado manual.

Respecto a la fase de modelización, obtenemos como conclusión que, para el desarrollo de este tipo de trabajos con archivos de nubes de puntos con alta densidad, es necesario contar con un hardware potente o realizar una reducción de su información LIDAR, además, para estas tareas de modelización es necesario la realización de varias tareas de prueba y error que pueden llegar a demorar mucho tiempo para llegar a conseguir un modelo 3D óptimo, con un equilibrio entre el nivel de detalle del mismo y el tiempo de desarrollo que necesitan estas tareas de modelización.

Respecto a la fase de procesos de gestión de la información, obtenemos la conclusión de que este tipo de tecnología SIG es de gran utilidad para caracterizar elementos de edificios pertenecientes al patrimonio arquitectónico, concretamente a un yacimiento arqueológico como es la muralla, mediante la vinculación de información relevante. Además, al sectorizar un modelo 3D y añadir valores a sus distintas entidades como transparencias, es posible obtener modelos tridimensionales en niveles LOD₃ aún más detallados que con la simple segmentación del modelo, debido a que estos modelos obtenidos de nubes de puntos, aunque modelicen de manera muy simplificada los paramentos verticales, mantienen información de algunos elementos en su interior, como es el ejemplo de los huecos.

Respecto a las conclusiones extraídas sobre las diferentes particularidades del caso de estudio, podemos decir que el uso de trabajos de campo fotogramétricos son la mejor opción para crear modelados 3D de elementos arquitectónicos con gran cantidad de detalle y complejidad, además, al tratarse de una construcción maciza con pocas aberturas en sus fachadas, se facilita la obtención de modelados tridimensionales con niveles de detalle más elevados.

7. REFERENCIAS

- Agisoft LLC. (2021). *Agisoft Metashape User Manual Professional Edition, Version 1.7*.
- American Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ASPRS). (2019). *LAS Specification 1.4-R14 Release Information*.
- Axelsson, P. (1999). Processing of laser scanner data-algorithms and applications. In *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing* (Vol. 54).
- Barragán Zaque, W. B., Escobar Rey, L. K., & García, L. (2017). Obtención de parámetros óptimos en la clasificación de nubes de puntos LiDAR, a partir de sensores aerotransportados. *AVANCES
Investigación En Ingeniería*, 14, 9. <https://doi.org/10.18041/1794-4953/avances.1.1280>
- Cabrera-Revuelta, E., Mascort-Albea, E. J., Hidalgo-Sánchez, F. M., Romero-Hernández, R., & Canivell, J. (2021). Modelado 3D de la muralla de la Macarena (Sevilla). Propuesta metodológica para su integración en trabajos de gestión cartográfica digital. *EGE-Expresión Gráfica En La Edificación*, 14, 4. <https://doi.org/10.4995/ege.2021.15584>
- Calama Rodríguez, J. M., & Canivell, J. (2006). Análisis patológico de los paramentos de la muralla almohade de Sevilla: tramo comprendido entre la Puerta de la Macarena y el Jardín del Valle. *Construir Con Tierra Ayer y Hoy. V Seminario Iberoamericano de Construcción Con Tierra ; I Seminario Argentino de Arquitectura y Construcción Con Tierra. Celebrado En Mendoza, 14 al 17 de Junio, 2006*, 117.
- Canivell, J., & Graciani García, A. (2014). Muralla de Sevilla (1984-2008). In *La restauración de la tapia en la Península Ibérica: criterios, técnicas, resultados y perspectivas* (pp. 218–221). TC Cuadernos.
- Canivell, J., Jaramillo-Morilla, A., Mascort Albea, E. J., & Romero-Hernández, R. (2019). Methodological framework to assess military rammed-earth walls. The case of Seville city ramparts. In *Science and Digital Technology for Cultural Heritage - Interdisciplinary Approach to Diagnosis, Vulnerability, Risk Assessment and Graphical Information Models* (pp. 83–87). CRC Press-Taylor & Francis Group.
- Canivell, J., Mascort-Albea, E. J., Cabrera-Revuelta, E., Romero-Hernández, R., Jaramillo-Morilla, A., & Serrano-Chacón, Á. (2020). Marco metodológico para la conservación preventiva de murallas históricas emplazadas en contextos urbanos. Normalización de datos espaciales relativos a la muralla medieval de Sevilla (España): el caso del sector de la Macarena. *Ge-Conservacion*, 18(1), 44–55. <https://doi.org/10.37558/gec.v18i1.762>
- di Sivo, Michele., Ladiana, Daniela., & Canivell, Jacinto. (2019). *Le mura urbane crollano : conservazione e manutenzione programmata della cinta muraria dei centri storici : atti del seminario internazionale*. Pisa University Press.
- García-Tapial y León, J., & Cabeza Méndez, J. M. (1988). Restauración de las murallas del Jardín del Valle. *Aparejadores: Boletín Del Colegio Oficial de Aparejadores y Arquitectos Técnicos de Sevilla*, 26, 26–32.
- Gerencia Urbanismo y Medioambiente de Sevilla -GUMS-, & Fundación para la Investigación de la Universidad de Sevilla -FIUS-. (2020). *Plan Director del Patrimonio Histórico Municipal de Sevilla (PD-PHiM)*. Ayuntamiento de Sevilla. <https://www.urbanismosevilla.org/ficheros/pdf/plan-director-de-patrimonio-del-patrimonio-historico-municipal>

- Graciani García, A. (2008). Propuesta de metodología científica para la caracterización constructiva de fábricas de tapial en los estudios previos. Su aplicación a la muralla de Sevilla en el tramo del Jardín del Valle. *IX Congreso Internacional de Rehabilitación Del Patrimonio Arquitectónico y Edificación: Patrimonio Cultural e Innovación. Celebrado En Sevilla, Del 9 al 11 de Julio, 2008*, 51–56.
- Gröger, G., & Plümer, L. (2012). CityGML - Interoperable semantic 3D city models. In *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* (Vol. 71, pp. 12–33). <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2012.04.004>
- Hackel, T., Savinov, N., Ladicky, L., Wegner, J. D., Schindler, K., & Pollefeys, M. (2017). *Semantic3D.net: A new Large-scale Point Cloud Classification Benchmark*. <http://arxiv.org/abs/1704.03847>
- Hidalgo-Sánchez, F. M., Mascort-Albea, E. J., Kada, M., Romero-Hernández, R., Canivell, J., & López-Larrínaga, F. (2022). 3D GIS Semi-automatized Modelling Procedure for the Conservation of the PHiM: Heritage Municipal Buildings of Seville (Spain). A New Dimension for Urban Cultural Data Management. *Journal on Computing and Cultural Heritage*, 15(1). <https://doi.org/10.1145/3467976>
- Martínez Blanco, M. P. (2016). *Evaluación y propuesta de metodologías de clasificación a partir del procesamiento combinado de datos LiDAR e imágenes aéreas georreferenciadas* [Universidad de Cantabria]. <http://hdl.handle.net/10803/381249>
- Nurminen, K., Karjalainen, M., Yu, X., Hyypä, J., & Honkavaara, E. (2013). Performance of dense digital surface models based on image matching in the estimation of plot-level forest variables. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 83, 104–115. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2013.06.005>
- Parra Artero, F. J. (2015). *Evaluación de diferentes algoritmos de filtrado de datos LiDAR para la clasificación Automática de suelo desnudo y microrrelieve (edificios, invernaderos y vegetación)*. Universidad de Almería.
- Quesada Cano, F. (2021). *Gestión de datos espaciales e indicadores de riesgo en arquitectura histórica construida con tapia en entornos urbanos: el caso de la Muralla de la Macarena* [Trabajo Fin de Grado, Universidad de Sevilla]. <https://idus.us.es/handle/11441/126966>
- Romero Masero, J. L. (2015). *Revitalización de la Murallas de la Macarena, Sevilla* [Proyecto Fin de Carrera, Universidad de Sevilla]. <http://hdl.handle.net/11441/37563>
- Vosselman, G. (2000). Slope based filtering of laser altimetry data Design and analysis of an indoor backpack mounted laser scanning system View project 3D Maps for Environmental Modelling View project SLOPE BASED FILTERING OF LASER ALTIMETRY DATA. In *IAPRS: Vol. XXXIII*. <https://www.researchgate.net/publication/228719860>
- Zhang, K., & Cui, Z. (2007). *Airborne LIDAR Data Processing and Analysis Tools ALDPAT 1.0*.
- Zhang, K., & Whitman, D. (2005). Comparison of Three Algorithms for Filtering Airborne Lidar Data. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 71(3), 313–324. <https://doi.org/10.14358/PERS.71.3.313>

8. ABREVIATURAS Y GLOSARIO

- **SIG:** Sistema de Información Geográfica.
- **Puntos LIDAR:** *Light Detection and Ranging*, puntos obtenidos mediante teledetección óptica, poseen información sobre sus coordenadas X, Y, Z.
- **Nube de puntos:** Conjunto de puntos LIDAR.
- **Archivos LAZ:** Datos comprimidos de detección y localización por luz.
- **Archivos LAS:** Formato binario que almacena datos LIDAR, los datos LAS son datos LAZ descomprimidos.
- **Ráster:** Mapa de píxeles formados por una cuadrícula de celdas que contiene información sobre algún elemento (edificio, terreno, ...).
- **Dataset LAS:** almacena referencias a uno o más archivos LAS, el Dataset LAS es necesario para examinar archivos LAS.
- **DEM:** *Digital Elevation Model*, modelo digital del terreno, es un tipo de ráster relativo a la topografía.
- **LOD:** (*Level of Detail*), nivel de detalle estandarizado para modelos tridimensionales SIG
- **PD-PHiM:** Plan Director de Patrimonio Histórico inmueble de la ciudad de Sevilla.
- **Entidad multiparce:** Objeto SIG que almacena información para la representación del límite un objeto tridimensional.

9. ANEXO I: TABLAS DE DATOS DE LAS MURALLAS DEL VALLE

NUM_LIST	INMUEBLE	ID_COD	CAPA_NDE	GEOM	NIVEL	OCUPACION_m2
18	Murallas del Valle	MVALLE_000_01_CONT	Entorno Edificio	Poligono	-	

INIDE_DE_1	INIDE_DE_2	INIDE_DIR	INIDE_RFCT
Murallas del Valle	- Murada almohade de Sevilla	Calle María Auxiliadora, 33A	6031009TG3 463A0001JD

INDES_TI_1	INDES_TI_2	INDES_CURB	INDES_CRON	INDES_AUTR	INDES_DESC	INDES_HIST	INDES_FTMU	INDES_MOD
Arqueológico	Yacimiento abierto	Muralla. Restos emergentes	-	-	-	-	-	-

INUA_US_1	INUA_US_1G	INUA_US_2	INUA_US_2G	INUA_US_H	INUA_CR_H	INUA_ACTVD	INUA_ESP_C	INUA_ESP_A	INUA_VISIT	INUA_WEB	INUA_TELEF
Monumento exento	-	-	-	Defensivo	Muralla de época almohade	-	No	No	-	-	-

PRBIC	PRBIC_DP_1	PRBIC_FA_1	PRBIC_TJ_1	PRBIC_EN_1	PRBIC_IN_1	PRBIC_FT_1	PRBIC_DP_2	PRBIC_FA_2	PRBIC_TJ_2	PRBIC_EN_2	PRBIC_IN_2	PRBIC_FT_2
sí	BOE del 29 de	31223	monumento	50 metros	-	https://www.boe.es	BOE (C.E) del 11	-	-	-	Corrección de err.	https://www.boe.es

PRCGP	PRCGP_DE_1	PRCGP_CD_1	PRCGP_IN_1	PRCGP_FT_1	PRCGP_DE_2	PRCGP_CD_2	PRCGP_IN_2	PRCGP_FT_2
sí	Muralla urban	1410910144	-	https://www.	-	-	-	-

PRMUN_FG_1	PRMUN_DN_1	PRMUN_NP_1	PRMUN_FA_1	PRMUN_IN_1	PRMUN_FT_1	PRMUN_FG_2	PRMUN_DN_2	PRMUN_NP_2	PRMUN_FA_2	PRMUN_IN_2	PRMUN_FT_2
Plan Especial Sector 04: Sar A	-	-	40375	-	https://sig.urbanisn	-	-	-	-	-	-

PRMUN_FG_3	PRMUN_DN_3	PRMUN_NP_3	PRMUN_FA_3	PRMUN_IN_3	PRMUN_FT_3	PRMUN_FG_4	PRMUN_DN_4	PRMUN_NP_4	PRMUN_FA_4	PRMUN_IN_4
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

PRMUN_FT_4	PRMUN_FG_4	PRMUN_DN_4	PRMUN_NP_4	PRMUN_FA_4	PRMUN_IN_4	PRMUN_FT_4
-	-	-	-	-	-	-

PROTR_EX_P	PROTR_FT	PROTR_INF_O	FUEN_BIB_V	FUEN_BIB_D	FUEN_BIB_T	FUEN_DOC_V	FUEN_DOC_D	FUEN_DOC_T
-	-	-	http://idesevilla.maps.arcgis.com/home/item.html?url=https://hdvirtual.us.es/discovirt/index.php/s/jXHTIwbXoQndTTp9e	57374bcd886	c2815b0ed53	23	http://idesevilla.maps.arcgis.com/home/item.html?id=b17384ab7dc24154afe3be5e9ceb9fd1	10

FUEN_ICO_V	FUEN_ICO_D	FUEN_ICO_T	ARCAU	ARCAU_GR	ARCPA	ARCPA_FT_1	ARCPA_FT_2
-	-	-	Sí	Cautela en Espacio Público (resto emergente)	No	-	-