

Comparativa de técnicas de escaneado 3D de objetos patrimoniales: fotogrametría vs escáner láser 3D

Mónica Fernanda Nieto Rojas

Juan Pedro Ortiz Sanz

Curso académico 2023-2024

CAMPUS DE LUGO

UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	3
PALABRAS CLAVE	3
SUMMARY	3
KEY WORDS	3
1. INTRODUCCION.....	4
2. OBJETIVOS.....	7
3. CONTENIDO/DESARROLLO	9
3.1 CASO DE ESTUDIO	9
3.2 MATERIALES.....	12
3.2.2 LEVANTAMIENTO FOTOGRAMÉTRICO.....	14
3.2.3 ORDEANDORES Y OTROS SOFTWARES PARA EL PROCESAMIENTO DE DATOS 17	
3.3 METODOLOGÍA.....	18
3.3.1 UTILIZACIÓN DEL ESCANER.....	18
3.3.1.1 Preparación previa al trabajo de campo.....	18
3.3.1.2. Obtención de datos	21
3.3.1.3 Procesamiento de los datos obtenidos	22
3.3.2. LEVANTAMIENTO FOTOGRAMETRICO	26
3.3.2.1 Preparación previa al trabajo de campo	26
3.3.2.2. Obtención de datos	28
3.3.2.3 Procesamiento de los datos obtenidos	29
3.3.3 CALIDAD DE MEDIDA DEL MODELO FOTOGRAMÉTRICO RESPECTO DEL MODELO ESCANEADO	34
3.3.4 CALIDAD DE MEDIDA DEL MODELO FOTOGRAMÉTRICO RESPECTO DE LAS PLANCHAS INTRODUCIDAS EN LA ESCENA	34
3.3.5. COMPARACIÓN DE LOS MODELOS OBTENIDOS EN ESTE ESTUDIO CON EL MODELO DEL CATALOGO ARQUEOLOGICO LUCUS AUGUSTI DEL CONCELLO DE LUGO	35
4. RESULTADOS	36
4.1. EXPOSICIÓN DE RESULTADOS	36
4.1.1. PREPARACIÓN PREVIA AL TRABAJO DE CAMPO	36
4.1.2 TRABAJO DE CAMPO.....	37
4.1.3 PROCESAMIENTO DE DATOS.....	39
4.1.4 CALIDAD DE MEDIDA DEL MODELO FOTOGRAMÉTRICO RESPECTO DEL MODELO ESCANEADO	41

4.1.5 CALIDAD DE MEDIDA DEL MODELO FOTOGRAMÉTRICO RESPECTO DE LAS PLANCHAS INTRODUCIDAS EN LA ESCENA	42
4.1.6 COMPARACIÓN DE LOS MODELOS OBTENIDOS EN ESTE ESTUDIO CON EL MODELO DEL CATALOGO ARQUEOLOGICO LUCUS AUGUSTI DEL CONCELLO DE LUGO	43
4.2 DISCUSIÓN ACERCA DE LOS RESULTADOS	44
5. CONCLUSIONES.....	46
6. BIBLIOGRAFIA.....	48
7. ANEXOS.....	51
7.1 ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	51
7.2 ÍNDICE DE TABLAS	52

RESUMEN

Este estudio analiza y compara las técnicas de fotogrametría y escaneo láser 3D en el modelado 3D de objetos patrimoniales escultóricos, evaluando su facilidad de uso, eficiencia, calidad de los modelos generados y limitaciones. Se lleva a cabo el contraste mediante el modelado 3D, con ambas técnicas, del Ara de la Domus do Mitreo en Lugo (España). Los resultados demuestran que ambas técnicas son precisas y fiables, con la fotogrametría destacándose por su accesibilidad y flexibilidad en costos, y el escaneo láser por su alta precisión e inmediatez. Además, se contribuye al estudio de la viabilidad de utilización de estas técnicas en las actividades cotidianas de museos y otras instituciones culturales aun teniendo en cuenta que en dichas instituciones no nos encontremos con personal especializado en la digitalización o diseño gráfico; proporcionando a los gestores culturales información útil para tomar decisiones informadas sobre la implementación de estas tecnologías, mejorando la preservación y difusión del patrimonio cultural de manera sostenible y efectiva.

PALABRAS CLAVE

Fotogrametría/escáner laser 3D/luz estructurada/modelado 3D/elementos patrimoniales/ara/Mitreo.

SUMMARY

This study analyzes and compares photogrammetry and 3D laser scanning techniques in the 3D modelling of sculptural heritage objects, evaluating their ease of use, efficiency, quality of generated models, and limitations. The comparison is carried out by modelling the Ara of the Domus do Mitreo in Lugo (Spain) using both techniques. The results show that both techniques are accurate and reliable, with photogrammetry standing out for its accessibility and cost flexibility, and laser scanning for its high precision and immediacy. Furthermore, this study contributes to the examination of the feasibility of utilizing these techniques in the daily activities of museums and other cultural institutions, even considering the potential absence of personnel specialized in digitization or graphic design. It provides cultural managers with useful information to make informed decisions about the implementation of these technologies, thereby improving the preservation and dissemination of cultural heritage in a sustainable and effective manner.

KEY WORDS

Photogrammetry/3D laser scanner/structured light/3D modelling/heritage objects/altar/Mithraeum.

1. INTRODUCCION

En los últimos años, el desarrollo de las tecnologías 3D aplicadas al ámbito del Patrimonio Cultural ha permitido obtener resultados de la máxima importancia desde el punto de vista de la conservación, valorización, comunicación y disfrute de nuestros bienes (Balletti et al., 2017).

La posibilidad de crear modelos tridimensionales precisos permite no solo preservar el estado actual de los elementos patrimoniales, sino también facilitar su estudio, restauración y difusión. Y aunque hoy en día, la mejora de la tecnología ha hecho que la digitalización sea significativamente menos difícil (Qiu y Xie, 2023), seguimos encontrando desafíos, uno de ellos es la accesibilidad de estas tecnologías para personal no especializado, como aquellos que trabajan en museos, bibliotecas y otras instituciones dedicadas a la preservación del patrimonio. Estos profesionales, aunque son expertos en arte, literatura, antropología o arqueología, no necesariamente poseen conocimientos avanzados en modelado 3D o diseño gráfico.

Este desafío ha motivado la elección de nuestro tema de estudio, asumiendo el reto de utilizar técnicas de bajo coste y de fácil manejo para el modelado 3D de un elemento patrimonial por personas no especializadas, con su respectiva evaluación. Hemos centrado la atención en técnicas accesibles como la fotogrametría y los escáneres 3D. La fotogrametría, mediante la optimización de algoritmos y mejoras en la captura de imágenes, ha logrado reducir notablemente los costos tanto de adquisición como de procesamiento (Pavlidis, 2007). Por otro lado, los escáneres de luz estructurada utilizan patrones de luz para capturar la geometría de los objetos, siendo también una opción viable en términos de precisión y accesibilidad (Rocchini, 2001).

En la conservación y documentación del patrimonio cultural, la digitalización y modelado 3D de elementos patrimoniales, desde elementos pequeños hasta grandes construcciones, ha adquirido una importancia creciente, lo cual se evidencia en la gran variedad de estudios realizados sobre este campo. Atik et al. (2022) mencionan varios estudios relevantes que destacan la aplicación de técnicas de escaneo láser y fotogrametría en la documentación y preservación de objetos históricos: “Herramientas de medición (Duran y Ayudar, 2012), modelación de lápidas (McCarthy, 2014), edificios (Sasi y Yakar, 2018), obeliscos (Lerma y Muir, 2014), documentación de una iglesia y un mausoleo (Yakar et al., 2010), análisis de daños (Zeybek y Kaya, 2020), entre otros” (p. 25)

La fotogrametría es una técnica de reconstrucción 3D basada en la técnica de "estructura a partir del movimiento" o SFM (Structure from Motion), que utiliza imágenes analógicas o digitales para crear modelos tridimensionales. Funciona mediante el uso de fotografías obtenidas desde diferentes ángulos, que son procesadas con software especializado para calcular las coordenadas 3D del objeto mediante puntos conjugados en las imágenes (Duran et al., 2021). De manera más simplificada la podemos definir como lo hace Barberà (2017) cuando resume a Aparicio (2015), como la generación semiautomática de modelos tridimensionales a partir de fotografías. La fotogrametría, ha evolucionado significativamente gracias a los avances en software y la mejora en la resolución de las cámaras digitales, incluyendo las de los teléfonos móviles, democratizando su uso e incluso permitiendo a personal no especializado obtener resultados de alta calidad.

Los escáneres de luz estructurada funcionan proyectando patrones de luz sobre un objeto y capturando las imágenes resultantes con una cámara. Analizando la distorsión de estos patrones, causada por la geometría del objeto, se puede calcular información de profundidad y superficie para reconstruir un modelo 3D (Schmalz et al., 2012).

Hoy en día, la utilización de escáneres de luz estructurada se ha facilitado significativamente debido a varios factores. Los avances en la tecnología de cámaras y proyectores han mejorado la precisión y resolución de las capturas de imagen. Además, el desarrollo de software más sofisticado ha automatizado gran parte del proceso de reconstrucción 3D, reduciendo la necesidad de intervención manual y conocimientos técnicos avanzados. Esto facilita el uso de esta tecnología y puede permitir que más profesionales en diversos campos puedan utilizarla, baste pensar que esta técnica se emplea con éxito desde hace años en proyectos desarrollados por escolares (Gil-Docampo et al. 2019; Ortiz et al. 2020).

Para nuestro estudio, hemos seleccionado un ara como objeto de análisis debido a su tamaño intermedio, el cual es adecuado para aplicar ambas técnicas de modelado 3D que pretendemos evaluar. La fotogrametría no presenta limitaciones significativas en cuanto a las dimensiones del objeto con una misma cámara y software. Sin embargo, los escáneres de luz estructurada, aunque precisos, están limitados por el tamaño del objeto que pueden escanear eficazmente. Este estudio se enfoca en objetos de tamaño escultórico, porque algunos modelos de escáneres comerciales de luz estructurada muy populares están diseñados para trabajar con esculturas, pudiendo encontrar una amplia variedad de modelos en el mercado en la actualidad, como sol-pro (<https://es.scandimension.com/products/sol-pro-3d-scanner>) Shining3D

EinScan-SP (<https://www.3djake.es/shining-3d/einscan-sp>) Shining3D.EinScan-SP (Escáner 3D de escritorio SHINING 3D EINSCAN SP) scan-one (<https://it3d.com/escaneres-3d/escritorio/it3d-scan-one/>) ireal2e (<https://it3d.com/escaneres-3d/color/scantech-ireal-2e/>) whale(3dmakerpro.com)peel-3d (<https://peel-3d.com/>) etc. Por otra parte, y al igual que ocurre con la fotogrametría, el coste y sencillez de estos dispositivos hacen que su uso sea accesible, incluso, a escolares (Megri et al, 2020). Además, la elección de esta ara también considera su textura, ya que la fotogrametría puede tener dificultades adicionales con superficies reflectantes o brillantes, aspectos que pueden influir en la calidad y precisión de los modelos digitales obtenidos.

Teniendo en cuenta que las “metodologías bien definidas con sistemas 3D cada vez más accesibles han permitido planificar campañas masivas de adquisición 3D de colecciones enteras de museos, construyendo bases de datos precisas de gemelos digitales” (Guidi et al., 2015), este estudio tiene como objetivo evaluar la viabilidad de utilizar técnicas de modelado 3D de bajo coste, accesibles para personal no especializado, en la documentación y de elementos patrimoniales escultóricos. Lo que permitirá determinar las ventajas y limitaciones de cada técnica en un contexto práctico y realista, facilitando la toma de decisiones informadas por los gestores de estas instituciones.

2. OBJETIVOS

El objetivo principal de este trabajo es analizar y comparar la aplicación de dos técnicas de modelado 3D de bajo costo, la fotogrametría y el escáner láser 3D, en el contexto de la digitalización de objetos patrimoniales de tipo escultórico. Se busca examinar una serie de aspectos cruciales para determinar cuál de estas técnicas resulta más adecuada para su implementación en museos y otras instituciones culturales. De acuerdo con las características específicas de los objetos a digitalizar, así como las posibles limitaciones a las que podría enfrentarse la institución, tales como restricciones económicas, de tiempo y la falta de personal cualificado o especializado en técnicas de modelado, entre otros. Más concretamente analizaremos los siguientes aspectos, los cuáles darán respuesta a las incógnitas planteadas:

1. **Facilidad de uso y accesibilidad.** Se analizará la facilidad de uso de cada técnica, considerando la complejidad operativa y la accesibilidad para usuarios no especializados. Para responder al objetivo planteado es importante evaluar cómo se desempeñan estas técnicas en manos de personal que, aunque tiene amplios conocimientos en cultura y elementos históricos, no posee un conocimiento profundo de estas tecnologías.
2. **Eficiencia y practicidad.** Se tomará en cuenta el tiempo requerido para completar el modelado con cada técnica, buscando identificar cuál es más eficiente y práctica para su aplicación en entornos de preservación patrimonial. También se tendrá en cuenta la capacidad del personal no cualificado para aprender y manejar estas tecnologías de manera eficiente y ver si es viable su integración en los procesos rutinarios de museos y otras instituciones culturales.
3. **Calidad de las imágenes y precisión de los modelos 3D.** La calidad de las imágenes obtenidas será un factor determinante, considerando la resolución y los detalles capturados por cada método. Se evaluará la precisión de los modelos tridimensionales generados, comparando la fidelidad de la representación digital con respecto al objeto original. Este análisis permitirá determinar cuál de las dos técnicas produce resultados más fieles y detallados.
4. **Limitaciones y desafíos.** Se compararán las limitaciones y desafíos encontrados en cada técnica durante los pasos previos al trabajo de campo, durante la obtención de los datos y durante su procesamiento, proporcionando una visión clara de las dificultades prácticas que pueden surgir.

5. **Selección informada de técnicas de escaneo 3D.** A través de estos análisis, se pretende identificar cuál de las dos técnicas es más adecuada para escanear objetos patrimoniales en función de las características específicas de cada caso.

Al analizar estos aspectos, se evaluará la viabilidad de incorporar una de estas técnicas en la rutina diaria de un museo, permitiendo la creación de modelos 3D para su estudio, conservación y difusión sin depender de servicios externos. También se investigará la posibilidad de que el personal de estas instituciones adquiriera las habilidades necesarias para utilizar una o ambas técnicas de manera económica y sostenible.

Este estudio ofrecerá a los responsables de museos y gestores culturales herramientas y conocimientos útiles para tomar decisiones informadas sobre la implementación de estas tecnologías, considerando tanto los costos económicos como la facilidad de uso y la eficiencia de cada técnica; permitiendo que las instituciones culturales integren estas tecnologías de manera sostenible y efectiva en sus actividades cotidianas, mejorando así la preservación y difusión de su patrimonio.

3. CONTENIDO/DESARROLLO

3.1 CASO DE ESTUDIO

Para la realización de este estudio hemos escogido un ara votiva dedicada al Dios Mitra por un centurión de la Legión VII. Esta ara es una pieza museística perteneciente al Museo Universitario A Domus do Mitreo en Lugo. Este centro museístico, aunque gestionado por la Universidad de Santiago de Compostela comparte su titularidad con el Ayuntamiento de Lugo.

En 1998, la Universidad de Santiago de Compostela decidió situar la sede del Vicerrectorado de Lugo en el antiguo Pazo de Montenegro. Sin embargo, durante los sondeos arqueológicos previos a la construcción del nuevo edificio, se descubrieron restos romanos de gran importancia. El equipo del arqueólogo D. Celso Rodríguez Cao...llevó a cabo una intervención arqueológica en un espacio de más de 600 metros cuadrados en el que se encontró una domus romana de época altoimperial (27 a. C.-284 d. C.). (Colmenero, 2017).

Estos hallazgos obligaron a replantear las obras previstas, a fin de conservar e incorporar los restos arqueológicos al nuevo edificio. Entre 2000 y 2007, se realizaron varias campañas arqueológicas que descubrieron una significativa parte de una antigua domus romana con estancias decoradas con mosaicos y pinturas murales, así como un mitreo. Este sitio era un lugar de culto dedicado al dios Mitra y su hallazgo es uno de los más importantes de su tipo en el Imperio Romano (Colmenero, 2017). Debido a estos descubrimientos, el museo recibe el nombre de Domus do Mitreo.



Figura 1. Mitreo. La Domus del Mitreo: 2000 Años de Historia En 700 M2. (Diputación de Lugo, s. f.). Tomado de <https://turismo.deputacionlugo.gal/es/conece/lugoinedito/domusmitreo>

DESCRIPCIÓN DEL ARA por Rodríguez, (s.f.):

“Ara granítica dedicada a Mitra, divinidad de origen persa muy extendida por todo el imperio romano.

Época romana

Material: granito

Cronología: ca. 212-218 dC.

Medidas: altura 0,935 m; anchura 0,363 m; profundidad 0,235 m.

Área inscrita 0,635 x 0,315 m

Altura de las letras: 0,04 m”



Figura 2. Ara votiva.

Inscripción:

“Deo / Inuic(to) Mithrae /
G(aius) Victorius Vic/torinus
(centurio) L(egionis) VII
G(emina) / Antonianiae P(iae)
F(elicis) / in honorem sta/tionis
lucensis / et Victoriorum /
Secundi et Vic/toris lib(ertorum)
suor/um aram po/suit libenti
animo (hedera).

Al invicto Mitra, Gaius
Victorius Victorinus, centurión
de la Legión VII Gemina
Antoniniana Pía Feliz, en honor
de la statio de Lucus Augusti y
de los Victorios Secundus y
Victor, sus libertos. Colocó esta
ara de buen grado.” (Rodríguez,
C., s.f.)

De acuerdo con las investigaciones de Rodríguez (2020):

El altar está modelado en granito procedente de la cantera de Hombreiro, situada al norte de la ciudad de Lugo.... Presenta doble molduras que separan el capitel del fuste, una simple gola invertida entre el fuste y la base. A partir del estudio de la materia prima (granito) del soporte en la que se talló su inscripción, se pudieron apreciar microrrestos de pintura de color verde, en su parte superior (p.139).

Hemos escogido el ara votiva dedicada al dios Mitra como objeto de estudio por varios motivos:

Valor Patrimonial y Cultural: La directora de la Domus do Mitreo, María Dolores Dopico, resalta que lo que da nombre al Museo y probablemente lo más importante de todo lo que se puede ver en él, son los restos de un tempo mitraico. Prácticamente no hay evidencias en

España de arquitectura de este tipo. Este es el más completo, el que refleja mejor la estructura. Es enormemente valioso desde el punto de vista histórico (Agencia EFE, 2024).

Tamaño Adecuado: El presente estudio se centra en objetos de tamaño escultórico.

Estado de Conservación: El excelente estado de conservación del yacimiento (Agencia EFE, 2024) y del ara permite leer perfectamente la inscripción tallada en ella. Esto resulta muy interesante para comparar el nivel de precisión de los modelos creados mediante ambas técnicas.

Accesibilidad Administrativa: Al ser un museo gestionado por la universidad, el trámite burocrático para tener acceso al ara es más sencillo, facilitando la realización del estudio.

Variedad de Texturas y Figuras Geométricas: El ara presenta no solo figuras geométricas, sino que también es rica en texturas, lo que la convierte en un objeto ideal para evaluar la capacidad de las herramientas de adquisición 3D para capturar estos detalles.

Desafíos de Iluminación: El entorno en el que se tomarán las muestras puede presentar diferentes niveles de iluminación. Evaluar el rendimiento del escáner y la fotogrametría en condiciones de luz no tan favorables permitirá chequear la evolución de estas dos técnicas en el proceso modelado 3D. Ya que la iluminación siempre ha representado limitaciones en estos procesos.

3.2 MATERIALES

En el estudio se utilizaron diversas herramientas y materiales para llevar a cabo la captura y procesamiento de modelos 3D del ara votiva en la Domus do Mitreo. A continuación, se presenta una serie de tablas que resume el material empleado, incluyendo la descripción, el modelo o marca, y el propósito de cada elemento:

3.2.1 ESCANEADO 3D Y PROCESAMIENTO DE DATOS

Para el escaneado 3D se utiliza uno de luz estructurada de matriz lineal infrarroja y el software proporcionado por el fabricante. De manejo sencillo por su reducido peso (850 g) y dimensiones, su coste se sitúa en torno a los 6.000€. Requiere para su utilización un equipo informático con una tarjeta gráfica Nvidia GTX 1650 Ti o superior, una memoria de video superior a 4 Gb, un procesador Intel Core i7 o superior con una memoria RAM de 32GB y conectividad USB 3.0, cuyo coste mínimo puede situarse en 2.500€. El equipo incluye el

material necesario para la calibración dimensional y cromática del escáner. La tabla 1 recoge sus principales características y en las Figuras 4 y 5 se puede ver el escáner propiamente dicho y el conjunto escáner-equipo montado junto al ara para realizar el trabajo in situ.

Material	Descripción	Modelo/Marca	Propósito
Escáner 3D	Escáner de luz estructurada	Scantech iReal 2E 3D Color Scanner IT3D Group	Captura de modelos 3D con alta precisión
Tecnología	Luz estructurada de matriz lineal infrarroja	-	Método de captura de datos 3D
Precisión (Punto único)	Alta precisión de captura	0.100 mm	Detalle fino en modelos 3D
Precisión volumétrica	Precisión en la captura de volúmenes	0.3mm / m	Captura precisa de volúmenes grandes
Resolución	Alta resolución	0.40 mm	Detalle fino en modelos 3D
Distancia de trabajo	Rango de operación del escáner	350mm ~ 650mm	Flexibilidad en la captura de datos
Área de escaneo	Tamaño del área escaneada	580mm x 550mm	Captura de grandes áreas
Volumen de escaneo	Rango de tamaños de volumen capturable	Min: 250x250x250 mm, Max: 3000x3000x3000 mm	Adaptabilidad a diversos tamaños de objetos
Velocidad de trabajo	Frecuencia de captura de datos	15 fps	Eficiencia en la captura de datos
Captura de textura	Capacidad para capturar colores y texturas	Sí	Detalle adicional en los modelos 3D
Formato de exportación	Formatos de archivo compatibles	OBJ, STL, PLY, ASC, SK	Flexibilidad en la utilización de modelos
Software	Programa para visualización y procesamiento de datos	iReal3D versión 3.2.3.1 (2022) / SCANTECH	Procesamiento y análisis de datos escaneados
Conectividad	Método de conexión	USB 3.0	Transferencia rápida de datos
Longitud del cable	Longitud del cable de conexión	2 m	Flexibilidad en el manejo del escáner

Tabla 1. Características del material utilizado para escanear el ara.



Figura 3. Descripción del escáner. Scantech (s.f). Tomado de <https://www.ireal3dscan.com/products/ireal-2e-3d-scanner/>



Figura 4. Escáner Scantech iReal 2E 3D Color



Figura 5. Escena de trabajo para utilización de escáner.

3.2.2 LEVANTAMIENTO FOTOGRAMÉTRICO

Para el levantamiento fotogramétrico se emplea una cámara, objetivo y trípode de gama media/alta a nivel aficionado, con un coste aproximado de todo el conjunto de 2000€. Para facilitar el trabajo in situ se puede emplear un teléfono móvil, una tableta o, como en este caso, un pequeño ordenador portátil. El procesado de las fotografías se realiza con el software Agisoft Metashape Professional. Versión 1.76 Build 13779 (64 bit), cuyo coste se sitúa en el entorno de los 4000€. Las características del equipo informático repercuten en el rendimiento del software, de modo que un equipo de sobremesa cuyo coste supere los 2000€ se puede considerar adecuado para este fin. La tabla 2 recoge las principales características del equipo

fotogramétrico empleado y en las Figura 7 se puede ver la cámara montada en la trípode conectada a un portátil junto al ara en el momento de realizar el trabajo in situ.

Material	Descripción	Modelo/Marca	Propósito
Software	Programa para procesamiento y modelado de imágenes	Agisoft Metashape Professional. Versión 1.76 Build 13779 (64 bit)	Creación de modelos 3D a partir de fotografías
Dianas codificadas	Impresas en cartón pluma	-	Referencias para el software de fotogrametría
Pie de rey digital	Calibre digital de alta precisión que mide en un rango de 0 a 150 mm y permite realizar mediciones con una resolución de 0,01 mm.	Mitutoyo Absolute Digimatic™ 500-161-20	Medición precisa de dimensiones
Cámara	Cámara digital réflex de lente única (DSLR)	Canon EOS 2000D	Captura de imágenes de alta resolución
Sensor cámara	Sensor APS-C™, Complementary Metal Oxide Semiconductor (CMOS) de 22,3 x 14,9 mm, resolución de 24 megapíxeles (6000 x 4000 píxeles), que produce un tamaño de píxel de 3,72 x 3,73 μm.	-	Se encarga de recibir y captar la luz. Del sensor depende que las imágenes capturadas sean de calidad. Por tanto, nos ayuda en la alta resolución para la reconstrucción de modelos 3D.
Lente	Lente de 20 mm	Canon EF20 mm	Captura de imágenes detalladas
Ajustes de cámara	Configuración de ISO y apertura	ISO-100, f/14	Optimización de la calidad de imagen
Tablero de calibración	Damero en blanco y negro impreso en adhesivo mate sobre una superficie plana (vidrio)	-	Utilizado para la calibración precisa de la cámara
Trípode	Soporte para cámara	-	Estabilidad durante la captura de imágenes
Webcam	Cámara adicional para captura de fotos.	Laia 2,1MP (1920*1080)	Complemento para la fotogrametría y análisis de texturas
Sensor y lente Webcam	Sensor 1/2.7", CMOS, Effective Pixel: 2.07M Montura de la lente M12. Lente Focus: f=3.5mm. FOV: 84° F1.8	-	

Tabla 2. Características del equipo utilizado para el levantamiento fotogramétrico.



Figura 6. Calibre digital



Figura 7. Levantamiento fotogramétrico.

Planchas de vidrio y Placa de granito

Con el fin de chequear la calidad de medida del equipo fotogramétrico, se incluyeron en la escena diversas planchas de vidrio, que, para los niveles de exactitud y precisión que se pueden esperar para un proyecto de estas características, se consideran perfectamente planos. A cada una de las planchas se le colocó una hoja adhesiva impresa con textura aleatoria similar al granito. Se midió el espesor en diferentes puntos de las planchas mediante un calibre digital Mitutoyo Absolute Digimatic 500-161-20. La tabla 3 muestra algunas características de interés de estas planchas, que se dispusieron sobre el suelo del entorno del ara niveladas con ayuda de un nivel de burbuja.

Material	Descripción	Dimensiones	Propósito
Planchas de vidrio (3)	Vidrio con textura de granito adherida a una de sus caras. De diferentes dimensiones y espesores.	Pequeña: 20cm*10cm*≈18.6cm Mediana: 20cm*30cm*≈18.50cm Grande: 30cm*40cm*≈18.50cm	Superficie de referencia para chequear la precisión del modelo obtenido con la fotogrametría.
Placa de granito	Pulida y dispuesta sobre tres apoyos regulables	-	Base nivelada que sirvió de soporte para las planchas de vidrio.
Nivel de burbuja	Herramienta para asegurar la nivelación	-	Disponer de un plano de referencia horizontal en el modelo 3D.

Tabla 3. Características planchas de vidrio y placa de granito.

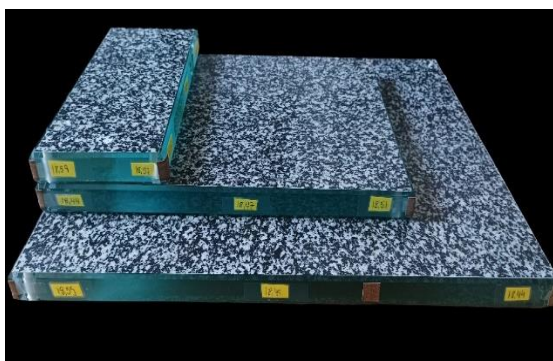


Figura 8. Planchas de vidrio.



Figura 9. Planchas de vidrio en escena.

Para realizar un escalado del modelo de alta calidad de medida, se utilizaron dianas codificadas, que el software es capaz de reconocer automáticamente y se midió la distancia entre ellas con ayuda de un ordenador y una webcam solidaria al calibre ya descrito. La calibración de la cámara se llevó a cabo in situ con ayuda de un vinilo con un damero impreso adherido a un grueso vidrio, elemento que cuenta con una superficie perfectamente plana en la práctica.

3.2.3 ORDEANDORES Y OTROS SOFTWARES PARA EL PROCESAMIENTO DE DATOS

En la tabla 4 se muestran las principales características de los equipos informáticos y otros softwares empleados.

Material	Descripción	Modelo/Marca	Propósito
Ordenador 1	De mesa	Intel(R) Core (TM) i7-9700F CPU @ 3.00 GHz.	Ejecutar software de procesamiento y análisis de datos 3D.
Sistema operativo	Windows 10 Enterprise LTSC. 64 bits.		
Tarjeta Gráfica	NVIDIA	NVIDIA Geforce GTX 1660. 6GB	Renderizar modelos ·D y procesamiento gráfico.
RAM	32.0 GB		
Conectividad	USB 3.0		
Ordenador 2	Portátil	Acer Aspire 3 (Modelo No, N19C2)	Movilidad y procesamiento de datos en el campo.
Procesador	AMD Ryzen 5 3500U	AMD	
Tarjeta Gráfica	AMD Radeon RX Vega 8	AMD	
Memoria RAM	8GB DDR4 RAM, 2133 MHz		
Memoria	512GB SSD		
Software	Software de procesamiento de datos 3D de código abierto que permite comparar nubes de	Cloud compare Versión 2.13.1	Procesamiento y comparación de nubes de puntos y mallas 3D

	puntos, mallas y realizar diversas operaciones de análisis y visualización.		obtenidas mediante el escáner y la fotogrametría.
--	---	--	---

Tabla 4. Ordenadores y otros softwares utilizados en el procesamiento de datos.

3.3 METODOLOGÍA

El planteamiento para la ejecución de este trabajo se estructura en varias etapas. La primera etapa consistió en la elección del objeto y de los materiales que se utilizarían en el trabajo de campo. Tanto el objeto elegido como los materiales ya se detallaron en los apartados anteriores. También se mencionó que se utilizaron dos técnicas distintas para la obtención y procesamiento de datos: el escáner 3D y la fotogrametría, ambas técnicas de modelado 3D sin contacto con el objeto a estudiar.

La segunda etapa representa la familiarización con los distintos instrumentos a utilizar. Esta fase se desarrolló en el despacho de la universidad y con algunos tutoriales en casa, permitiendo adquirir destreza en el manejo de los equipos y software necesarios.

La tercera etapa es el trabajo de campo, donde se realiza el escaneo propiamente dicho. Dependiendo de la técnica utilizada, los materiales a llevar al museo varían. Una vez finalizada esta etapa, se procede al procesamiento de los datos obtenidos. En este caso, se utilizaron diferentes programas de software para cada técnica. Por tanto, se utilizó el mismo ordenador, pero diferentes programas para procesar los datos y generar las nubes de puntos correspondientes.

La última etapa se refiere a los resultados y su interpretación. Aquí se analizan y comparan los datos procesados de ambas técnicas, modelos 3D y se evalúa su precisión, calidad, facilidad de manejo y utilidad para la digitalización de objetos patrimoniales. Esta fase es importante para identificar las ventajas e inconvenientes de una técnica frente a la otra en este caso.

3.3.1 UTILIZACIÓN DEL ESCANER

3.3.1.1 Preparación previa al trabajo de campo

Antes de comenzar a utilizar el escáner, uno de los pasos previos es la calibración, especialmente si ha pasado mucho tiempo desde la última vez que se utilizó.

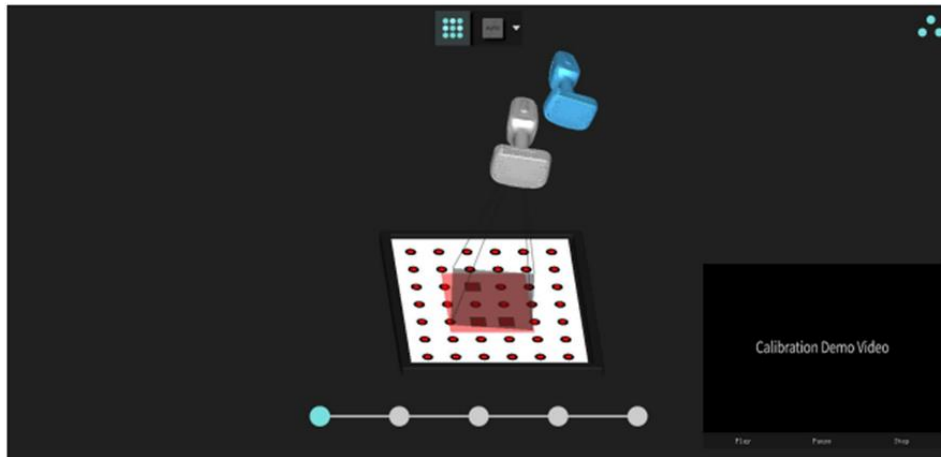


Figura 10. Proceso de calibración. Scantech ((2022). Tomado de iReal 3D User Manual V3.2.0. Obtenido del programa de ordenador iReal Handheld Color 3D Scanner.

Para familiarizarme con el equipo realicé una serie de pruebas con distintos objetos para adquirir práctica, tanto en el manejo del escáner como en el uso del software proporcionado. Los distintos modos de escaneado y las configuraciones del programa Ireal3D, varían según el objeto a escanear y las condiciones ambientales y están diseñadas para optimizar los resultados, tanto en el proceso de escaneado como en el procesamiento de los datos obtenidos para generar el modelo 3D.

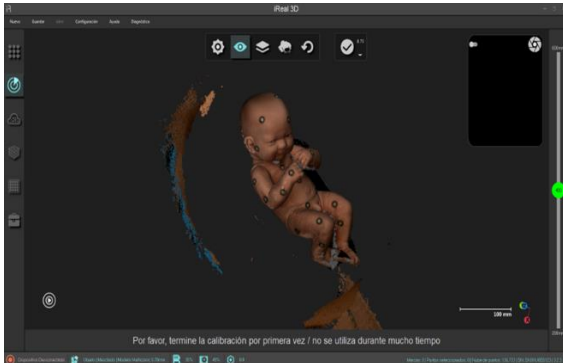


Figura 11. Pruebas con dianas.

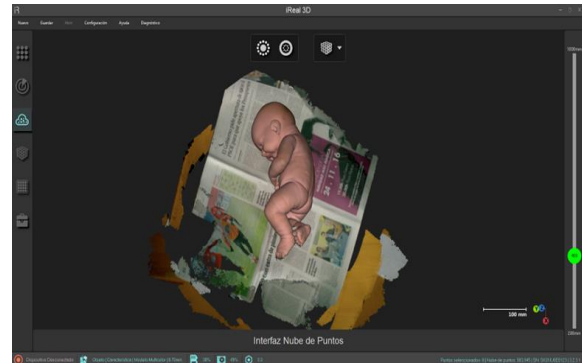


Figura 12 Pruebas con distintas texturas

Por otra parte, para este proceso de aprendizaje se cuenta además con videos y manuales que se pueden encontrar fácilmente en la página web del fabricante del escáner.

Una vez adquirida la destreza suficiente con esta técnica, el siguiente paso consistió en practicar recreando la escena en el campo de trabajo. Se seleccionaron objetos de práctica que se asemejaran lo más posible a los que realmente se iban a escanear, en este caso, el ara y la losa.

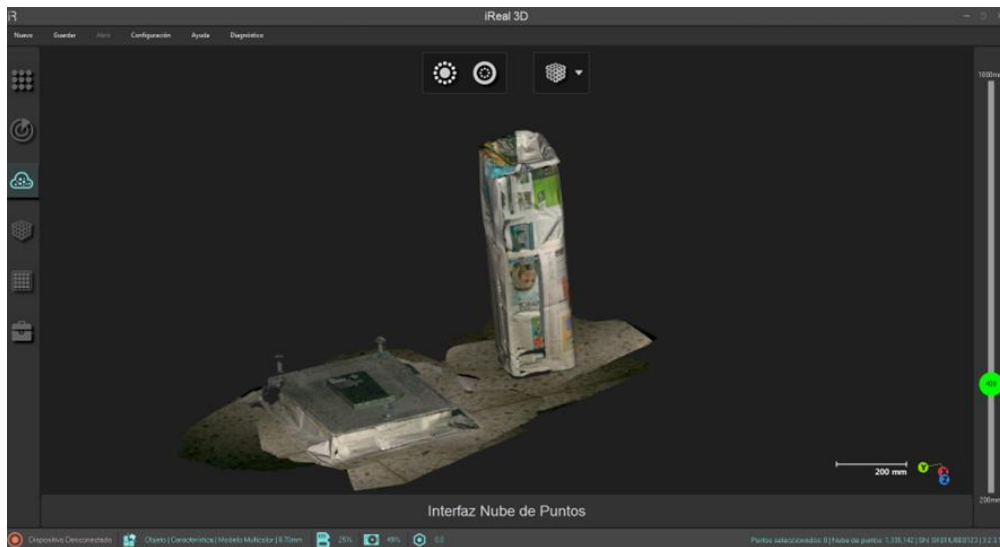


Figura 13. Nube de puntos de la prueba con material similar al ara y la losa.



Figura 14. Pruebas recreando ara y losa.

3.3.1.2. Obtención de datos

Para la obtención de datos con el escáner, nos dirigimos al museo llevando con nosotros todos los materiales descritos anteriormente. Aunque desde el principio tuvimos facilidad para acceder al museo y al ara, la Domus do Mitreo está abierta al público y solo podíamos trabajar los lunes, cuando cierra. Comenzamos a las 9 de la mañana y continuamos hasta las 2:30 de la tarde. Este tiempo no fue dedicado únicamente al escaneo del ara. Primero, tuvimos que bajar todo el material dos plantas por debajo del nivel de la calle. Luego, nos dedicamos a colocar y conectar todos los equipos de manera que nos facilitara la obtención de los datos. (Ver figura 4).

Al haber practicado previamente con otros objetos y después con algo similar al ara, pensamos que escanear esta sería más fácil y llevaría menos tiempo, sin embargo, no fue así. La experiencia previa con los ajustes y el manejo del escáner fue fundamental para realizar el trabajo en el lugar, aunque no garantizaba el éxito.

Para capturar el ara de manera fiel, detallada y precisa, tuve que realizar varias pruebas antes de encontrar el ajuste idóneo que me permitió trabajar de manera fluida sin comprometer la calidad del modelo.

En los ajustes del escáner, se pueden escoger distintos modos de escaneo, y también se puede seleccionar distintas resoluciones.

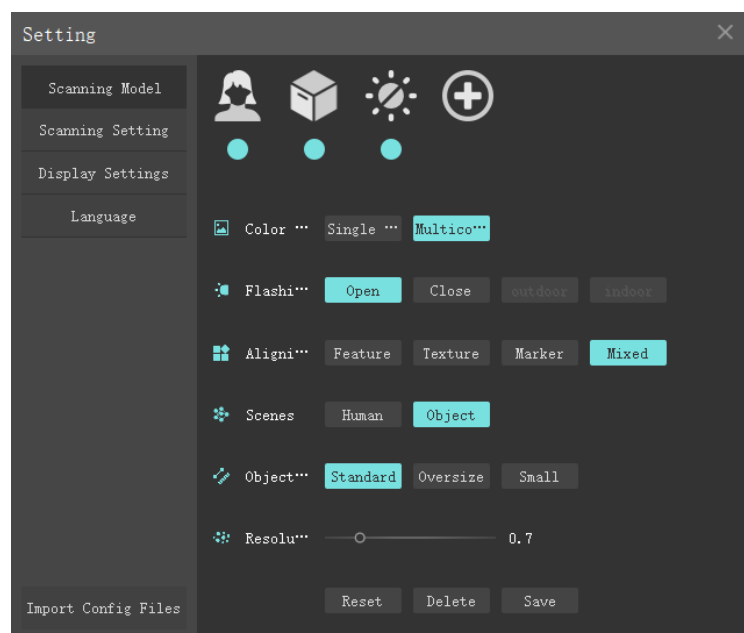


Figura 15. Distintos modos de escaneo. working parameters. Ireal 3D user manual. (05/29/2023)

tomado de <https://www.ireal3dscan.com/main/3skill/mode.html>.

El escaneo del ara comenzó por la parte superior, ya que, al tener figuras geométricas, se consideró que sería más fácil para el escáner reconocer esta sección y retomar desde allí el proceso de escaneo



Figura 16. Trabajo de campo con el escáner.

3.3.1.3 Procesamiento de los datos obtenidos

En la figura 17 podemos ver el interfaz de escaneo del programa. El ara aparece escaneada perfectamente. También comprobamos con la opción de “Data Quality Color Map” y el ara aparecía completamente en color verde (ver figura 18), indicando que todas las partes del ara tenían suficientes datos para procesar la nube de puntos. Esta opción permite visualizar el objeto en un mapa de colores: rojo indica que la calidad de la nube de puntos no es alta, y verde indica que la densidad de la nube de puntos cumple con los requisitos de resolución.

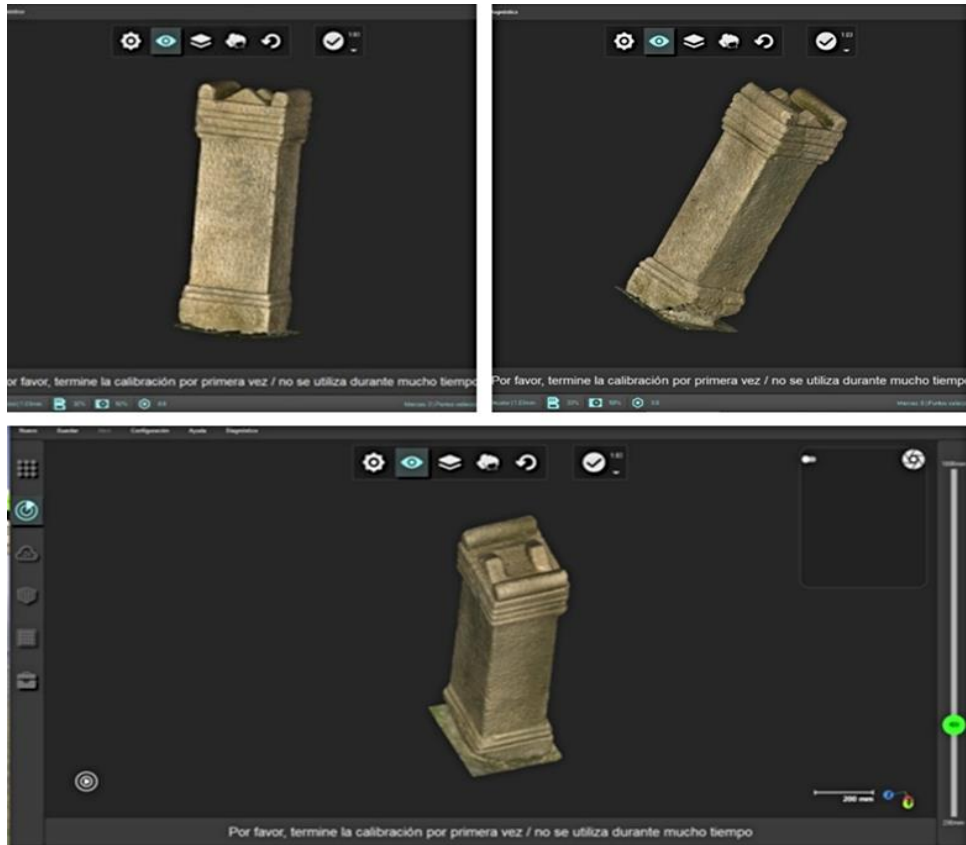


Figura 17. Interfaz de escaneado.

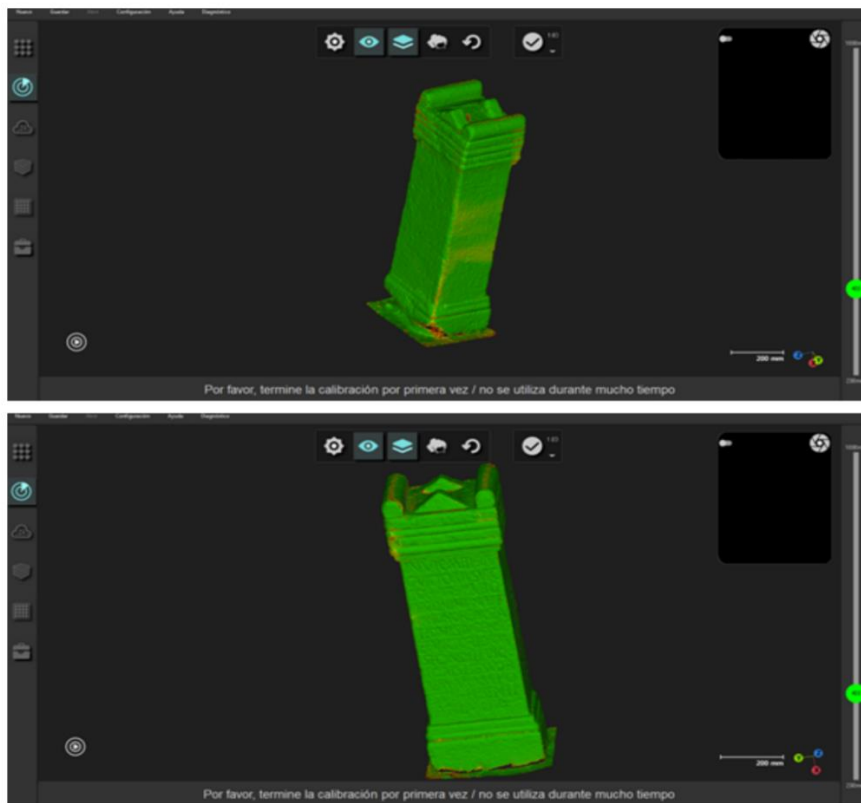


Figura 18. Data Quality Color Map

El propio software que se utiliza en el proceso de escaneo nos permite procesar la información obtenida para pasar a la nube de puntos densa, crear la malla y, por último, el modelo con textura. Para proceder a crear la nube de puntos, en la interfaz de escaneo le das al botón finalizar de la barra de herramientas y escoges la resolución que quieres, en nuestro caso escogimos 1,0. Al finalizar este procedimiento observamos que al crear la nube de puntos parecía faltar un trozo en la parte trasera del ara.

Una vez en la interfaz de la nube de puntos, puedes buscar los puntos aislados y los componentes desconectados con las opciones que te da la barra de herramientas y eliminarlos, de esta forma obtenemos una nube de puntos con menos ruido. El siguiente paso sería hacer clic en el ícono de “wrap” o envolver, pasando de la nube de puntos a la malla triangulada.

Al continuar con el procedimiento y crear la malla, el problema se hizo más evidente, la parte de atrás del ara aparecía con más distorsiones (Ver figura 19). Lo que realmente sucedía era que había partes superpuestas encima de la superficie de la parte trasera del ara.

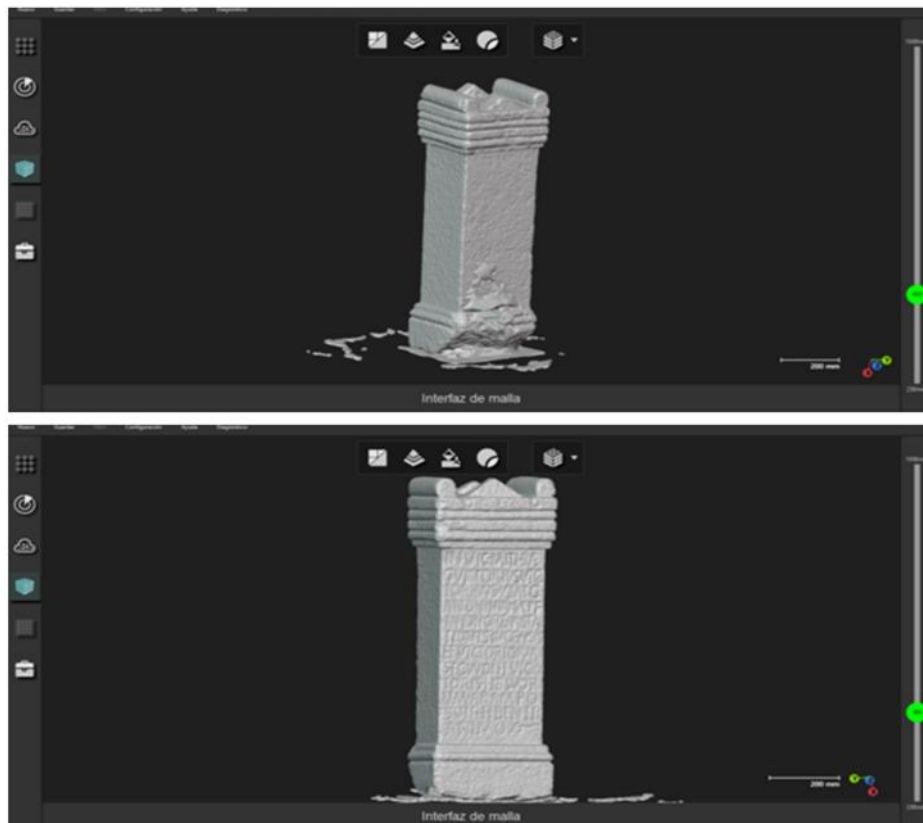


Figura 19. Interfaz de malla.

En la interfaz de malla tienes varias opciones que puedes realizar: reducir el número de triángulos mientras se mantienen los detalles, incrementar el número de triángulos

subdividiendo cada triángulo, la opción de rellenar huecos y de escoger otro material de acuerdo con el objeto.

Finalmente, en la interfaz de malla, procedimos a eliminar todos los puntos superpuestos, con cuidado de no eliminar las partes que realmente necesitábamos para crear el modelo. Una vez con el ara limpia, creamos el modelo, en el interfaz de malla se le hace clic al botón “mapping” de la barra de herramientas.

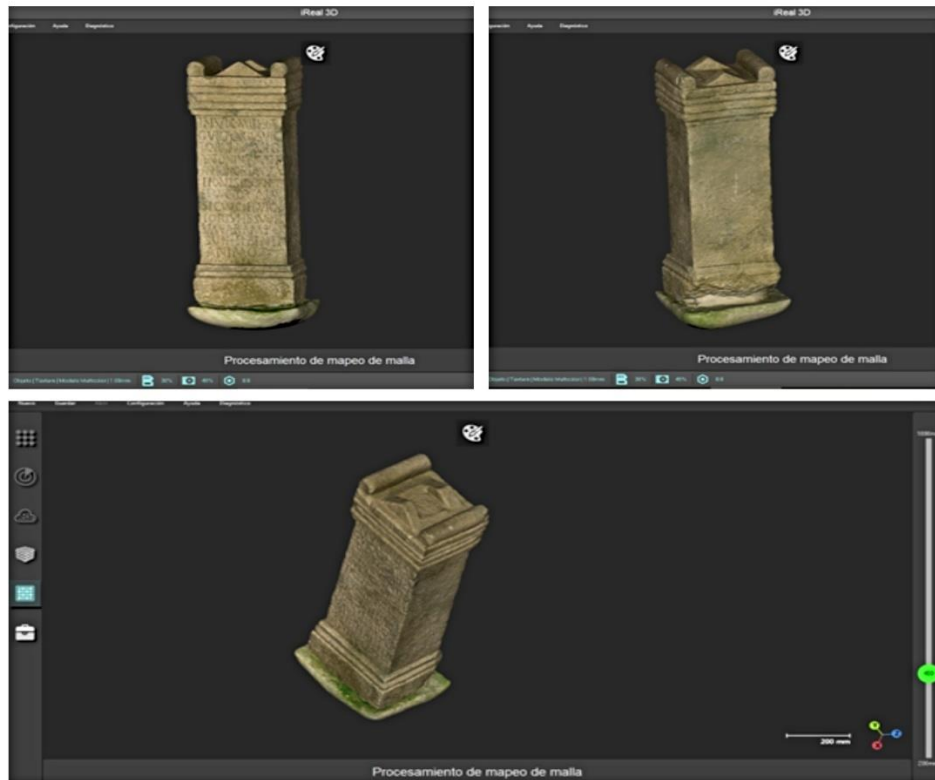


Figura 20. Interfaz de mapa. Malla editada.

Con el botón de “adjust textura” de la barra de herramientas, puedes ajustar el matiz, la saturabilidad, la luminancia, el ambiente y el especular. El modelo creado por el escáner no necesita ser escalado ya que por principio de medición que utiliza y las características del dispositivo la nube de puntos capturada ya se encuentra en sus dimensiones reales. El último paso de trabajar con este modelo fue exportarlo para poder compararlo con el modelo fotogramétrico en el software de comparación de nube de puntos.

3.3.2. LEVANTAMIENTO FOTOGRAMETRICO

3.3.2.1 Preparación previa al trabajo de campo

La preparación previa al trabajo de campo en el levantamiento fotogramétrico incluyó varias tareas específicas. En primer lugar, se imprimieron las dianas en cartón pluma y se midieron las distancias entre ellas utilizando una cámara web y un calibre digital de alta precisión, conocido como pie de rey digital. Esto era esencial para escalar el modelo 3D y medir su precisión. Posteriormente, las dianas se recortaron en tiras y se montaron sobre una base para facilitar su manejo durante el trabajo de campo.



Figura 21. Trabajo con dianas.

En cuanto a las planchas de vidrio, la preparación incluyó medir el espesor de cada lado en tres puntos distintos: en el medio y en ambos extremos, utilizando el calibre digital. Además, como ya se ha citado, se pegó una textura de granito a una de las caras de las planchas de vidrio para facilitar el trabajo fotogramétrico, ya que un cristal liso y brillante no es adecuado para este tipo de trabajo.



Figura 22. Trabajo con planchas de vidrio.

En lo que respecta a la cámara, se hicieron pruebas de profundidad de campo para saber a qué distancia se podían sacar las fotos con mayor nitidez y se configuraron los parámetros previamente mencionados. Se colocó una cinta en el lente para evitar ajustes automáticos durante cada toma, asegurando que todas las fotos se realizaran con los mismos parámetros.



Figura 23. Pruebas de profundidad de campo.



Figura 24. Parámetros lente.

También se realizó la calibración de la cámara, un proceso que utiliza imágenes de un objeto con un patrón geométrico, conocido como cuadrícula de calibración, en este caso fue un tablero de ajedrez.



Figura 25. Calibración de cámara

3.3.2.2. Obtención de datos

El proceso de obtención de datos en la fotogrametría fue similar al realizado con el escáner. Llegamos al museo alrededor de las 9 de la mañana y trabajamos hasta las 2:30 de la tarde. Descargamos todo el material al nivel donde se encontraba el ara y comenzamos a montar el equipo. En esta ocasión, llevamos un ordenador portátil en lugar de uno de mesa, lo que redujo un poco el tiempo de montaje.

Procedimos a colocar y nivelar las losas, ubicamos las dianas recortadas alrededor del ara y añadimos un par de piezas de cartón pluma de color blanco para detectar cualquier posible movimiento accidental de las dianas. Este paso era crucial para mantener la precisión en la captura de datos. Finalmente, tomamos alrededor de 300 fotos del ara desde diferentes ángulos y distancias, asegurándonos de cubrir todos los detalles necesarios para el modelado 3D. Este exhaustivo proceso de fotografía garantizó la calidad y precisión del modelo generado posteriormente en el software fotogramétrico.



Figura 26 . Nivelación losas.



Figura 27. Colocación dianas.



Figura 28. Obtención de datos fotogrametría.

3.3.2.3 Procesamiento de los datos obtenidos

El procesamiento de los datos lo realizamos con el programa que describimos anteriormente Agisoft Metashape Profesional versión 1.76 Build 13779 (64 bit). Este software es una versión profesional.

Antes de importar las fotografías del ara se procedió a importar las fotografías de la calibración de la cámara. Importar las fotografías consiste en cargarlas dentro del software para que estas puedan ser procesadas. Una vez cargadas procedimos a convertir este proyecto en un archivo de calibración. Desde la opción “Tools”, “Lens Calibrations (using chessboard)”. Una cámara se calibra para encontrar sus parámetros internos, externos y posibles distorsiones. Por tanto, le estamos dando al programa todas las posibles distorsiones de la cámara para que cuando carguemos el proyecto del ara el programa corrija estas distorsiones.

Una vez cargado el archivo de calibración de la cámara que usamos procedimos a cargar el proyecto del ara que fueron 302 fotografías. Se pueden cargar los archivos de imagen por separado, o se puede seleccionar la carpeta que contenga todas las imágenes. Se ha optado por lo segundo.

Una vez cargado el conjunto de imágenes, se orientan y alinean las imágenes con el comando “align photos”. Alinear las fotografías es el proceso de determinar la posición y orientación espacial de la cámara para cada imagen. Para el proceso de alineamiento de las

fotos escogimos la precisión alta: Accuracy: High. Al establecer la calidad alta, el programa trabaja con fotografías en tamaño original y se obtienen estimaciones más precisas de la posición de la cámara.

Los otros parámetros fueron los siguientes:

- * Generic preselection.
- * Reference preselection: Sequential. Para facilitar el proceso de alineamiento, lo que hicimos fue acomodar las fotos secuencialmente antes de cargarlas al programa.
- * Key Point Limit: 40.000
- * Tie Point Limit: 4.000
- * Apply mask to: None.
- * Exclude stationary tie points.

Una vez terminado el proceso de alineamiento, utilizamos los comandos de redimensionar región y rotar región de la barra de herramientas para acomodar la región de trabajo a nuestro gusto y de esta forma poder eliminar de nuestra zona de trabajo aquellos elementos capturados por las imágenes que no nos interesa y que puede hacer que los siguientes procedimientos sean más lentos al estar cargados de información innecesaria.

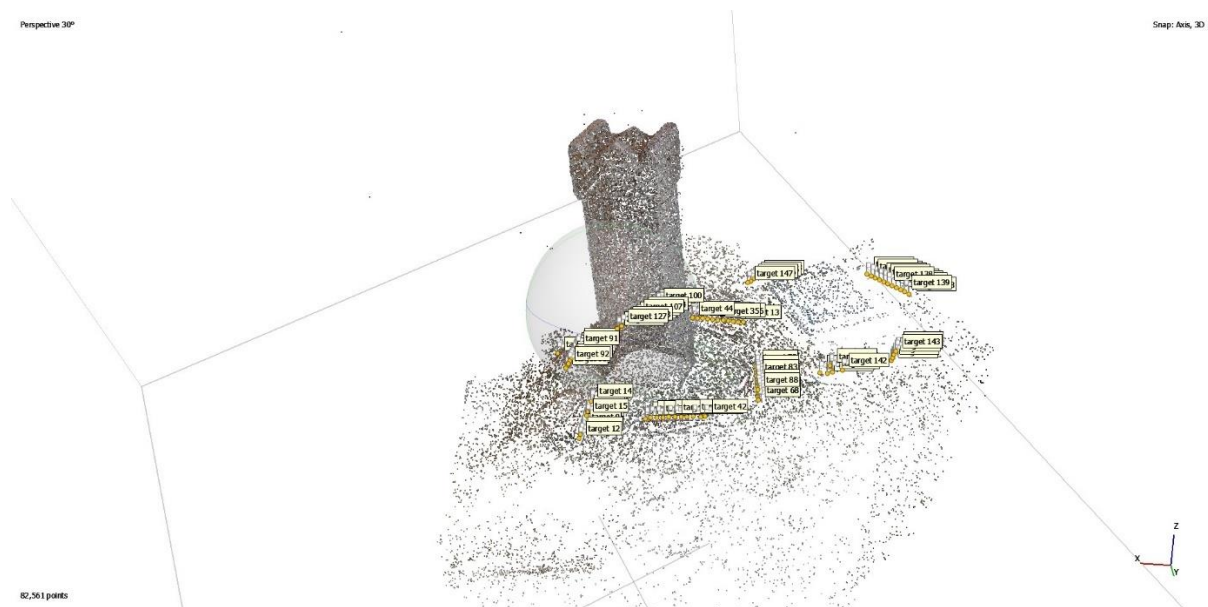


Figura 29. Nube de puntos dispersa de Metashape.

Tras obtener la nube de puntos poco densa (formada por tie points) se debe generar el modelo 3D del objeto mediante el comando “build mesh”, que sería el proceso para construir la malla.



Figura 30. Nubes de punto densa.

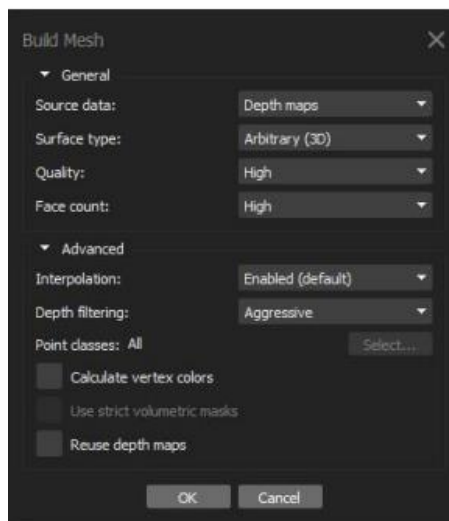


Figura 31. Parámetros establecidos en Metashape para crear la malla.

El programa primero realiza el proceso de “Depth maps” o mapas de profundidad, uno por cada fotografía y a partir de estos mapas reconstruye mediante algoritmos internos una malla o modelo tridimensional del objeto.

* Surface Type: Arbitrary. Es la opción del tipo de superficie. Este modo se utiliza para objetos como estatuas o edificios. También es posible seleccionar “Height field” para aquellos casos en que se busca reconstruir superficies planas.

Una vez creada la malla tiene diferentes formas de visualizarla: malla sombreada, malla color y malla alambre.



Figura 32. Malla del modelo en diferentes modos. Sombreado, alambre y nivel de confianza.

Una vez que el modelo tridimensional ha sido generado, se puede aplicar una textura a partir de las imágenes originales para obtener un modelo realista. Los parámetros para este proceso fueron los siguientes:

- * Tipo de textura: Mapa RGB
- * Origen de datos: Imágenes.
- * Modo de mapeado: Genérico.
- * Modo de mezcla: Mosaico (por defecto)
- * Tamaño de textura: 8192 (por defecto)
- * Ajustes avanzados: “Enable hole filings” y “enable gosting filter”



Figura 33. Modelo texturizado

Una vez obtenido el modelo 3D del ara, el siguiente paso fue escalarlo. Escalar un modelo se refiere a introducir medidas reales y conocidas para que el programa asigne las dimensiones correctas al modelo digital. Este paso es esencial para la comparación de los dos modelos que queríamos realizar con el software CloudCompare. Para cargar el modelo en este programa, fue necesario exportar el modelo ya escalado desde Metashape en un formato de archivo compatible. En este caso, utilizamos un archivo de tipo .las.

Con el objetivo de poder escalar el modelo 3D se introdujeron las dianas en la escena antes de realizar todas las fotografías. La distancia entre las dianas, como se explicó antes, están medidas con un calibre digital; estas medidas son las que trasladaremos al software para que escale nuestro modelo.

El proceso seguido para escalar el modelo fue el siguiente:

- 1- Se crearon puntos o markers en el centro de cada diana
- 2- Se seleccionaron los markers en pares y se creó una scale bar por cada par.
- 4- Con las scale bars creadas, se introdujo la distancia que miden en la realidad
- 5- Una vez todas las scale bars (medidas de diana a diana) que queríamos introducir como referencia estuvieron definidas con las distancias que les corresponde, se actualizó y el modelo quedó escalado.

3.3.3 CALIDAD DE MEDIDA DEL MODELO FOTOGRAMÉTRICO RESPECTO DEL MODELO ESCANEADO

Para realizar esta comparación utilizamos el software Cloudcompare, que es un software que sirve para comparar nubes de puntos y modelos 3D y se puede medir la distancia entre los mismos, es decir cuanto difiere uno modelo del otro. En esta comparación vamos a utilizar como referencia métrica el modelo creado por el escáner ya que debido a sus características instrumentales específicas asumimos que el error del laser escaner es de +/- 1mm.

Con los dos modelos creados por las dos técnicas, uno con fotogrametría y el software Metashape y el otro por medio del escáner y su software iReal, a la misma escala, la real, se procedió a exportarlos en formato compatible con el programa Cloudcompare y abrirlo en este software. Este procedimiento es sencillo, solo con arrastrar los dos archivos hasta el programa ya los tendríamos cargados en la interfaz.

Una vez tenemos los dos modelos en la interfaz del software del Cloudcompare tenemos que ponerlos uno sobre otro para poder hacer la comparación. El proceso sería el siguiente:

1. Ajustamos el centro de los cuadros con Tools – Registration – Match bounding box centres. Así haríamos coincidir los centros de los cuadros delimitadores. Ambos modelos estarían superpuestos, pero no orientados.
2. Para alinear los modelos, seleccionamos el modelo del escáner para dejarlo fijo y ajustamos la orientación del modelo del Metashape con Edit – Translate/Rotate, intentando dejarlo orientado de la misma forma que el modelo del escáner y lo más cerca posible de tenerlo totalmente solapado. Luego, seleccione ambos modelos y usamos Tools – Registration – Fine registration, para hacer el ajuste exacto.
3. Una vez están ajustados, seleccionamos Tools – Distances, para medir la distancia entre ambos modelos y seleccionamos el modelo del escáner como modelo de referencia.

3.3.4 CALIDAD DE MEDIDA DEL MODELO FOTOGRAMÉTRICO RESPECTO DE LAS PLANCHAS INTRODUCIDAS EN LA ESCENA

Para evaluar la precisión del modelo creado con fotogrametría utilizamos las planchas de vidrio que introdujimos en la escena. Los pasos fueron los siguientes:

1. El primer paso fue medir el espesor de las planchas con el calibre digital, y pegar pegatinas en las mismas para identificar que espesor tenían cada una en diferentes puntos.
2. Una vez teníamos escalado el modelo obtenido con Metashape procedimos a seleccionar distintos puntos de las superficies de las planchas en el modelo.
3. Como sabíamos la medida real que nos arrojó la medición con el calibre, comparamos las medidas del calibre con las medidas que nos daban los dos puntos escogidos en el modelo.

En las estimaciones de error se utilizaron las medidas del calibre como referencia.

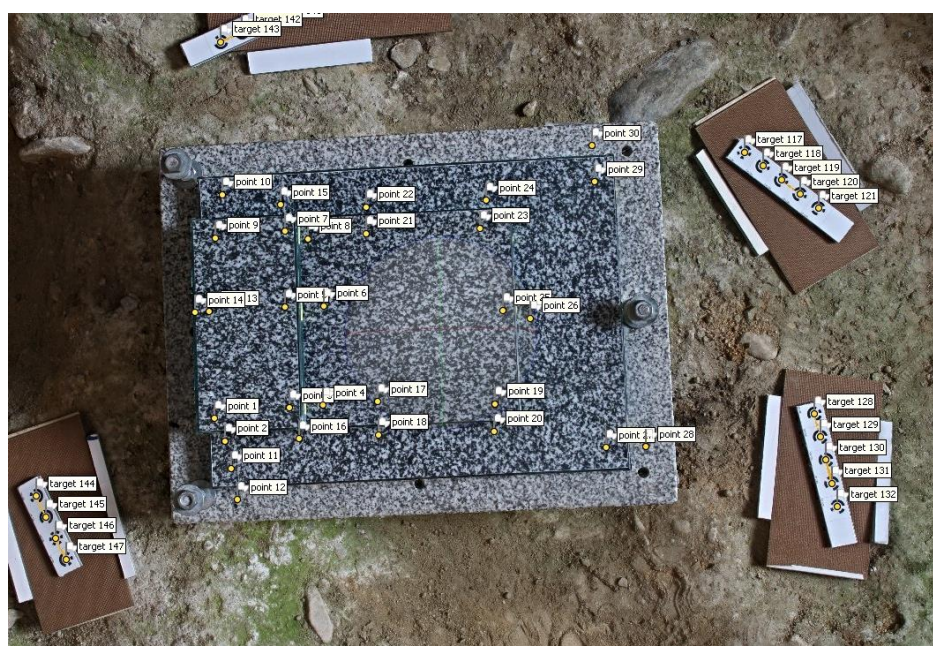


Figura 34. Modelo de las planchas en Metashape y puntos escogidos para verificar precisión.

3.3.5. COMPARACIÓN DE LOS MODELOS OBTENIDOS EN ESTE ESTUDIO CON EL MODELO DEL CATALOGO ARQUEOLOGICO LUCUS AUGUSTI DEL CONCELLO DE LUGO

Finalmente, se compara el relieve de los modelos 3D obtenidos en el presente estudio con el relieve de otro modelo 3D del mismo objeto, disponible en el catálogo arqueológico Lucus Augusti del Concello de Lugo (<https://sketchfab.com/3d-models/ara-a-mitra-fe4cfc77da4c4fd3b3d868955b42c95d>). Para realizar esta comparación cargamos los dos modelos obtenidos a la plataforma Sketchfab, que es la misma plataforma en la que se encuentra el modelo con el que queremos hacer la comparación.

4. RESULTADOS

4.1. EXPOSICIÓN DE RESULTADOS

4.1.1. PREPARACIÓN PREVIA AL TRABAJO DE CAMPO

Respecto a la preparación previa al trabajo de campo, el escáner presenta una preparación mínima. Lo único necesario para tener el equipo a punto antes de dirigirse a la escena de trabajo o comenzar a escanear un objeto es la calibración del escáner. Este proceso es bastante sencillo y se realiza utilizando una tablilla incluida con el equipo. La tablilla contiene figuras geométricas que deben ser escaneadas de manera suave, mientras el software guía al usuario indicando los movimientos que se deben hacer con el escáner. Todo el tiempo invertido antes del trabajo de campo se centra en el aprendizaje sobre la forma de trabajar con el escáner y cómo utilizar el programa asociado.

Durante el desarrollo de este estudio, se llevó a cabo un exhaustivo proceso de ensayo y error que resultó fundamental para comprender el manejo del escáner, así como para adquirir destrezas en la utilización de los diferentes modos de escaneado y las configuraciones del programa Ireal3D. Estas configuraciones, adaptables según las características del objeto a escanear y las condiciones ambientales, se diseñaron para optimizar tanto el proceso de escaneado como el posterior procesamiento de los datos obtenidos para la generación del modelo 3D.

Un aspecto positivo destacable en este proceso de aprendizaje fue la disponibilidad de recursos didácticos, tales como videos y manuales, fácilmente accesibles en la página web del fabricante del escáner. Estos materiales no solo abordaron el uso del escáner, sino también el manejo del software asociado, lo que significativamente facilitó y agilizó el proceso de aprendizaje. Sin embargo, existe una carencia de tutoriales en español, ya que es un programa de uso exclusivo por aquellos que adquieren el escáner. Aparte de los videos y tutoriales proporcionados por los fabricantes del escáner, la información disponible en internet es escasa.

Con el software Metashape, por el contrario, además de los tutoriales y manuales que se encuentran en la página oficial, existen numerosos tutoriales, videos y blogs que pueden ayudar a resolver dudas. El uso de este programa está más extendido que el del escáner y se puede considerar que tiene una interfaz más intuitiva, lo que facilita el aprendizaje.

La existencia de estos recursos adicionales ha permitido la resolución de dudas específicas y la adopción de procedimientos recomendados con mayor eficacia en ambas técnicas. No obstante, la preparación previa al trabajo de campo en la fotogrametría es más meticulosa. Para obtener resultados de buena calidad y precisión que puedan competir con el escáner, se requiere una preparación previa del equipo más cuidadosa. Sin embargo, debemos tener en cuenta que, con la repetición de estas tareas, los tiempos y la dedicación se pueden ir reduciendo, convirtiéndose en una rutina eficiente.

4.1.2 TRABAJO DE CAMPO

A pesar de que existía una práctica previa con el equipo y el software, el proceso de escaneo del ara presentó múltiples desafíos. Este proceso de aprendizaje fue crucial, pero no garantizaba que todo fuera sin contratiempos en el trabajo de campo. Los problemas incluyeron errores en la selección adecuada del modo de alineamiento y resolución de escaneo, la superposición de imágenes y dificultades para mantener la fluidez del escaneo en tiempo real, entre otros.

El escaneo del ara, a pesar de la preparación previa, demostró ser un proceso que demandó paciencia y meticulosidad. Cada ajuste en los parámetros de escaneo influyó de manera significativa en la calidad y el tiempo requerido para completar la tarea. Para lograr capturar el ara de manera fiel, detallada y precisa, fue necesario realizar múltiples pruebas hasta encontrar los ajustes óptimos que permitieran trabajar de manera fluida sin comprometer la calidad del modelo.

En un primer momento se optó por el modo de alineamiento mixto (mixed), que es recomendable para objetos con figuras geométricas y que a su vez sea rico en texturas. Además, seleccioné una resolución de 0.7, consciente de que una mayor resolución (número más pequeño) implica obtener una mayor cantidad de datos. Esto, sin embargo, ralentiza el proceso de escaneo, ya que los movimientos del escáner deben ser mucho más lentos para asegurar la precisión y detalle.

Inicialmente, el escáner reconocía la parte superior sin problemas, pero luego empezó a crear dobles fondos. Además, surgieron muchos problemas para escanear las letras: a medida que avanzaba de la parte superior hacia abajo, comenzaban a aparecer errores de escaneo. Al mover el escáner en paralelo, hacía una especie de barrido y superponía las imágenes. De la mitad hacia arriba, el escaneo del ara se completaba sin problema, pero de la mitad hacia abajo empezaban los errores. En una ocasión, aunque parecía que todo estaba bien y había escaneado

la ara por completo, al revisar la imagen en el programa, se notó que faltaban tres líneas de la inscripción del ara.

Se intentó alejar el escáner para capturar un campo de visión más amplio y que así el escáner reconociera la dimensión completa del ara, pero entonces el escáner indicaba que estaba demasiado lejos. Otra dificultad es que, con esta configuración, el programa que muestra la pieza escaneada en el ordenador en tiempo real se quedaba congelado, lo más probable, debido a la resolución escogida, ya que esto implica más manejo de datos.

Finalmente se probó con otro modo de alineamiento, utilizando la configuración de textura y una resolución de 0.1. Con estos ajustes, el escáner comenzó a funcionar mejor, de manera más fluida, y capturó la estructura del ara sin problemas. Sin embargo, al intentar detener el proceso y luego continuarlo, surgieron nuevos desafíos. En este modo, el escáner tenía dificultades para reconocer las figuras geométricas del ara, aunque identificaba bien las letras (textura).

Para comprobar la calidad del escaneo, se utilizó la opción "Data Quality Color Map". Esta herramienta permite identificar las partes del objeto que necesitan ser repasadas. Sin embargo, cada vez que intentaba reparar una sección del ara en este modo, surgían complicaciones similares a las que había encontrado anteriormente. Se debía empezar a escanear por la parte donde se encontraban las letras, ya que el escáner las reconocía mejor, al estar en modo "Texture" y desde allí moverse lentamente hasta el área que se necesitaba reparar. Este desplazamiento presentaba dificultades, especialmente en áreas homogéneas del ara, donde el escáner daba errores al no encontrar suficientes marcas o texturas distintivas.

Entre las dificultades encontradas al utilizar el escáner, estaban la necesidad de realizar movimientos lentos sobre la superficie del ara mientras miraba el ordenador y prestaba atención al terreno, que era irregular; lo que provocó caídas. Escanear la base del ara fue especialmente complicado. Para hacerlo, se debía girar el escáner y posicionarlo horizontalmente en lugar de verticalmente, lo que causaba que las imágenes de las diferentes cámaras se superpusieran. Si el escáner se mantenía en posición vertical, llegaba un momento en que perdía la visibilidad de alguna de las cámaras, complicando aún más el proceso de escaneo.

Durante este estudio, se exploró la función de escanear en diferentes momentos y guardar los resultados progresivamente, en lugar de realizar un escaneo completo de una sola vez. Sin embargo, descubrimos que esta tarea no siempre resulta tan sencilla como se muestra en los tutoriales. Diversos factores, como la capacidad del ordenador y la falta de experiencia, pueden

influir en la efectividad de esta función. En el caso específico del ara, al intentar guardar una parte escaneada para continuar más tarde, se encontraron problemas de superposición incorrecta de las imágenes, lo que generó nuevas complicaciones en el proceso.

El trabajo de campo con la técnica de fotogrametría, aunque sencillo en cuanto a la toma de fotografías, requirió una meticulosidad considerable para asegurar que todos los detalles del ara fueran capturados con precisión. Al final, el tiempo dedicado al trabajo de campo con ambas técnicas fue equivalente, abarcando desde las 9 de la mañana hasta las 2:30 de la tarde.

En comparación, el proceso de escaneo del ara resultó ser más arduo que el de tomar las fotos en la fotogrametría. Aunque al hacer las fotos se requiere ser meticuloso, con el escáner se necesita probar y repetir continuamente el proceso de escaneo para asegurarse de que todos los datos se capturen correctamente. Esta repetición y ajuste constante hacen que el escaneo sea más laborioso y consume más tiempo en comparación con la fotogrametría.

Una ventaja significativa de la fotogrametría es la capacidad de evaluar la calidad de las imágenes en el momento de la captura. Al revisar las fotografías in situ, se puede verificar su nitidez y asegurarse de que todos los detalles del objeto estén correctamente capturados. Aunque con el escáner también se puede visualizar el objeto y la calidad de las imágenes durante el proceso de adquisición, aún pueden surgir problemas imprevistos, como los que experimentamos durante este estudio, cuando durante el procesamiento de los datos se descubrió que la parte posterior del ara necesitaba ser escaneada de nuevo. Y esto representa un problema difícil de resolver si no tenemos acceso al objeto que estamos modelando nuevamente, tal y como fue nuestro caso.

Otro punto a favor de la fotogrametría es que, si se cuenta con fotos de calidad, esta técnica no sufre de problemas de superposición de imágenes, a diferencia del escáner. Esto garantiza que lo capturado de manera nítida no se vea afectado negativamente. Esta precisión y confiabilidad hacen que la fotogrametría sea una técnica más robusta en este aspecto.

4.1.3 PROCESAMIENTO DE DATOS

Una vez en el despacho, durante el procesamiento de los datos obtenidos con el escáner, surgió un inconveniente significativo: la falta de información en la parte trasera del ara al crear la nube de puntos. Durante el trabajo de campo, al utilizar la opción "Data Quality Color Map" en la interfaz de escaneo, el ara aparecía completamente en verde, lo que indicaba que teníamos suficiente información para crear la nube de puntos. Este es un aspecto negativo de trabajar

con el escáner: aunque el programa indique que la calidad del escaneo es perfecta, al intentar crear el modelo pueden surgir errores que solo se hacen evidentes en etapas posteriores del modelado y que son difíciles de corregir sin acceso directo al objeto físico. Este problema se agravó al generar la malla, evidenciando una de las debilidades del escaneo.

Se procesaron los datos obtenidos para llegar a la nube de puntos y luego a la malla, en esta interfaz se eliminaron todos los puntos superpuestos para dejar el modelo del ara sin distorsiones. Este proceso de limpieza fue esencial para mejorar la precisión y la calidad del modelo 3D final.

Por otra parte, la fotogrametría requiere considerablemente más tiempo para el procesamiento de los datos obtenidos. Este es un aspecto a favor del escáner. Una vez cargadas las fotos en Metashape, pasar a la nube de puntos puede tardar todo un día, dependiendo de la potencia del ordenador, particularmente de la memoria RAM y de la tarjeta gráfica. La conversión de la nube de puntos a malla toma menos tiempo, pero sigue siendo un proceso intensivo. Aunque debemos tener en cuenta que en este estudio se eligieron parámetros de alta calidad para la creación de la nube de puntos, lo que ralentiza aún más el proceso. Un aspecto importante por considerar en la fotogrametría es que el tiempo de procesamiento es tiempo de ordenador, por lo que no requiere la intervención continua de un operario. En la práctica, un operario puede iniciar un nuevo proyecto y obtener nuevos datos mientras el ordenador procesa la información del proyecto anterior. Esto permitiría una mayor eficiencia en la gestión del tiempo y los recursos.

Por tanto, podemos afirmar que, aunque la fotogrametría asegura una mayor precisión y evita problemas de superposición de imágenes, su procesamiento es más intensivo en tiempo y recursos, especialmente cuando se buscan resultados de alta calidad. El escaneo láser, aunque más lento durante la obtención de datos, permite un procesamiento posterior mucho más rápido. Por lo tanto, en proyectos con limitaciones de tiempo, es crucial considerar en qué parte del proceso se dispone de ese tiempo limitado: si en el procesamiento posterior en el ordenador o en las etapas iniciales donde la accesibilidad al objeto es reducida.

Inicialmente, se intentó realizar el procesamiento de datos del Metashape en un ordenador portátil, pero su capacidad no fue suficiente. Crear una nube de puntos podía tardar alrededor de tres días y, al final, se producía algún fallo. En cambio, procesar los datos con el software del escáner puede llevar no más de 15 minutos, ya que parte de este proceso se realiza simultáneamente con la obtención de los datos. Esta es una de las razones por las que el escaneo

es un proceso más lento en el campo, pero el tiempo de procesamiento posterior es significativamente menor.

Una diferencia notable es que el resultado final en la fotogrametría es mucho más vistoso, ya que la textura que se añade al modelo se toma directamente de las fotos. Sin embargo, esta ventaja estética viene con el costo de un procesamiento más largo y exigente. En comparación, el escáner produce resultados de procesamiento de datos muchos más rápidos, pero la calidad de la textura del modelo puede no ser tan detallada como la obtenida mediante fotogrametría.

Aunque el software facilitado con el escáner permite la opción de utilizar otro programa para crear texturas a partir de fotos del objeto, obteniendo así un texturizado igual de realista, este estudio se centra en comparar exclusivamente cada técnica por separado, sin mezclar procedimientos. Por lo tanto, esta capacidad adicional del escáner no se considera en la evaluación.

4.1.4 CALIDAD DE MEDIDA DEL MODELO FOTOGAMÉTRICO RESPECTO DEL MODELO ESCANEADO

La comparación de los modelos obtenidos, realizada utilizando el software Cloudcompare, muestra que las desviaciones entre los diferentes modelos son mínimas y, en su mayoría, están por debajo de un milímetro, como lo indica el color azul en la visualización. Este resultado destaca que ambas técnicas, escaneo y fotogrametría, son altamente fiables y precisas para la creación de prototipos.

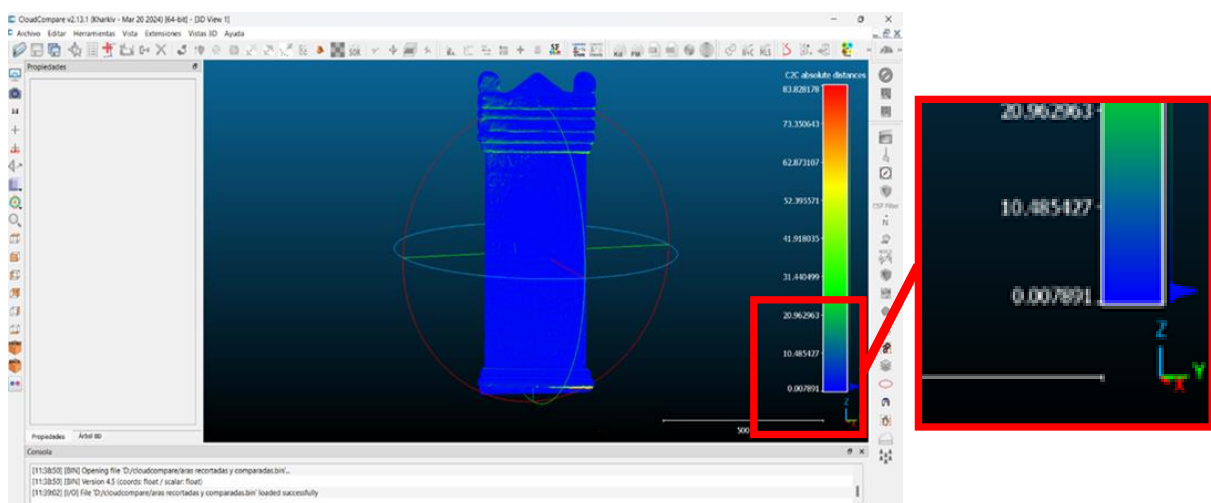


Figura 35. Modelos 3D comparados con Cloudcompare (cotas en mm).

Los modelos de las 2 aras fueron recortados en la base para poder compararlos con más exactitud, y no obtener resultados que pudieran estar sesgados. Las distancias absolutas entre ambos modelos está medida en milímetros. Podemos observar que entre ambos modelos apenas hay diferencias. La mayoría de las diferencias entre ambos modelos no llegan a 1 milímetro.

Esta comparación de los dos modelos evidencia que es posible obtener copias fiables y con costes limitados, sin necesidad de tener contacto físico con el objeto estudiado. Además, demuestra que, si se realiza un trabajo previo meticuloso con los instrumentos utilizados en el levantamiento fotogramétrico, se puede obtener un modelo que compita en precisión y detalle con el obtenido mediante el escáner laser.

4.1.5 CALIDAD DE MEDIDA DEL MODELO FOTOGAMÉTRICO RESPECTO DE LAS PLANCHAS INTRODUCIDAS EN LA ESCENA

Los resultados obtenidos son los siguientes:

Puntos modelo	Plancha	calibre	Modelo	Error mm	Error absoluto
1 y 2	1 y 2	37.03	37.014	0.016	0.289837
3 y 4	1	18.57	17.226	1.344	1.038163
5 y 6	1	18.57	16.923	1.647	1.341163
7 y 8	1	18.57	17.714	0.856	0.550163
9 y 10	1 y 2	37.03	36.505	0.525	0.219163
11 y 12	2	18.55	18.733	0.183	0.122837
13 y 14	1,2,3	55.6	55.602	0.002	0.303837
7 y 15	1 y 2	37.02	37.115	0.095	0.210837
3 y 16	1 y 3	37.02	36.9839	0.0361	0.269737
17 y 18	2 y 3	18.47	18.4888	0.0188	0.287037
19 y 20	2 y 3	18.51	18.5287	0.0187	0.287137
21 y 22	2 y 3	18.47	18.4883	0.0183	0.287537
23 y 24	2 y 3	18.51	18.5279	0.0179	0.287937
25 y 26	2 y 3	18.52	18.5373	0.0173	0.288537
27 y 28	3 y base	18.44	18.3601	0.0799	0.225937
29 y 30	3 y base	18.45	18.4684	0.0184	0.287437
				0.305837	
Error Medio	0.305837				
Desviación típica	0.521739				

Tabla 5. Mediciones obtenidas con las planchas de vidrio.

* Error medio(exactitud): El valor promedio de los errores es de aproximadamente 0.306 mm. Esto significa que, en promedio, las mediciones del modelo están muy cerca de las mediciones reales con un error medio muy pequeño.

* Desviación típica (precisión): La variabilidad de los errores es de aproximadamente 0.522 mm. Esto indica que los errores individuales están generalmente bastante cerca del error medio, sugiriendo una alta consistencia en las mediciones.

Estos resultados indican que el modelo creado con la técnica de la fotogrametría es bastante preciso y consistente, con errores relativamente bajos y poco dispersos.

4.1.6 COMPARACIÓN DE LOS MODELOS OBTENIDOS EN ESTE ESTUDIO CON EL MODELO DEL CATALOGO ARQUEOLOGICO LUCUS AUGUSTI DEL CONCELLO DE LUGO

Como ya se ha citado, hemos comparado el relieve de los modelos 3D del ara que hemos obtenido con ambas técnicas, subidos a la página de Sketchlab y disponibles en los siguientes enlaces: <https://skfb.ly/oXAwP>, para el modelo fotogramétrico y <https://skfb.ly/oXPXJ>, para el modelo del escáner; con el modelo 3D disponible en el catálogo arqueológico Lucus Augusti del Concello de Lugo, que se encuentra disponible en el siguiente enlace: <https://sketchfab.com/3d-models/ara-a-mitra-fe4cfc77da4c4fd3b3d868955b42c95d>.

Hemos comprobado a simple vista y sin la utilización de ningún otro método o software, que el modelo obtenido en este proyecto presenta una mayor calidad.



Figura 36. Comparación de modelos con textura MatCap (que muestra el relieve registrado). En el lado izquierdo se compara con el modelo fotogramétrico y en el derecho con el modelo del escáner

En ambas figuras a la izquierda nos encontramos con el modelo disponible en el catálogo arqueológico Lucus Augusti, mientras que a la derecha lo comparamos con el modelo obtenido mediante fotogrametría y el modelo del escáner respectivamente. En ambos casos el modelo de la derecha muestra un mayor nivel de detalle y precisión en las inscripciones y las texturas de la superficie del ara, lo que resalta la calidad superior de cualquiera de los dos modelos obtenidos en este estudio.



Figura 37. Comparación de modelos con texturización completa. En el lado izquierdo se compara con el modelo fotogramétrico y en el derecho con el modelo del escáner.

Al igual que en el caso anterior tenemos a la izquierda de ambas comparaciones el modelo disponible en el catálogo arqueológico Lucus Augusti. A la derecha de cada imagen tenemos los modelos obtenidos mediante fotogrametría y el escáner respectivamente.

En esta comparación, el modelo de la derecha fotogrametría destaca por su textura más realista y detallada, lo que ofrece una representación más fiel del objeto original. Las inscripciones y los relieves se presentan con mayor claridad y definición, lo que subraya la efectividad de la técnica de la fotogrametría frente a los otros dos modelos.

4.2 DISCUSIÓN ACERCA DE LOS RESULTADOS

Ambas técnicas, escáner 3D y fotogrametría, requieren un tiempo inicial de aprendizaje. Sin embargo, el escáner 3D tiene una preparación previa más sencilla, limitada a la calibración del dispositivo, mientras que la fotogrametría exige una preparación más meticulosa del equipo. La amplia disponibilidad de recursos didácticos y tutoriales para ambas tecnologías facilita el proceso de aprendizaje, aunque la fotogrametría cuenta con una mayor cantidad de material en español y una comunidad de usuarios más extensa.

Aunque el proceso de captura de datos con el escáner de luz estructurada resultó ser más laborioso y exigente en comparación con la fotogrametría, ambos métodos requirieron una

dedicación considerable durante el trabajo de campo. La fotogrametría se destacó por su facilidad para verificar la calidad de las capturas en tiempo real y su menor susceptibilidad a problemas de superposición de imágenes, lo que la convierte en una técnica más robusta y confiable para ciertos tipos de trabajos.

Es aconsejable utilizar la fotogrametría cuando se trata de objetos de difícil acceso o de gran tamaño que superan el campo de trabajo del escáner. Sin embargo, esta técnica no se recomienda para objetos reflectantes, translúcidos o con superficies muy lisas, ya que pueden inducir errores en el modelo. Por otro lado, el escáner es más adecuado cuando las condiciones de luz no son favorables y no es posible tomar fotografías de buena calidad

El procesamiento de datos obtenidos con el escáner es menos exigente en términos de hardware, sin embargo, la fotogrametría, aunque más lenta y demandante, produce modelos finales con texturas más realistas y detalladas.

También se demuestra que un meticuloso trabajo previo con los instrumentos fotogramétricos puede resultar en modelos de alta precisión y detalle, comparables a los obtenidos mediante escaneo láser.

En cuanto a la precisión, los resultados apoyan la conclusión de que la fotogrametría es una técnica robusta y efectiva para la captura de datos tridimensionales, ofreciendo una alternativa viable y precisa al escaneo láser en la creación de prototipos y otros usos que requieran alta precisión dimensional.

Por otra parte, las comparaciones hechas del modelo fotogramétrico con el modelo expuesto en el catálogo arqueológico Lucus Augusti del Concello de Lugo, evidencian una superioridad del modelo 3D obtenido en este proyecto en términos de precisión y detalle, lo que refuerza la utilidad de esta técnica para proyectos arqueológicos y de documentación patrimonial.

5. CONCLUSIONES

En este estudio, se obtuvieron modelos 3D de un ara votiva de la Domus do Mitrteo de Lugo, mediante el método de fotogrametría y escaneo 3D. A partir del análisis de la utilización de estas dos técnicas se pueden extraer las siguientes conclusiones:

* Respecto de la facilidad de uso y accesibilidad: Ambas técnicas presentan diferentes niveles de complejidad operativa y accesibilidad para usuarios no especializados. La fotogrametría, aunque requiere un proceso de configuración inicial meticuloso, demostró ser más intuitiva una vez establecidos los parámetros adecuados. Por otro lado, el escáner láser demanda un aprendizaje más técnico y específico, lo que podría limitar su uso efectivo por personal no especializado en tecnologías de modelado 3D.

* Respecto de la eficiencia y practicidad: En términos de eficiencia temporal, la fotogrametría mostró desventajas significativas. El proceso de captura de datos es más rápido y flexible, permitiendo múltiples puntos de vista sin necesidad de repetición directa sobre el objeto. Sin embargo, el tiempo de procesamiento de los datos es alrededor de 15 veces más lento que con el escáner, sin dejar de matizar que este tiempo se refiere a tiempo de ordenador, sin necesidad de intervención de un operario.

* Respecto de la calidad de las imágenes y precisión de los modelos 3D: Ambas técnicas ofrecen resultados de alta calidad, pero con matices distintos. La fotogrametría puede capturar detalles finos y texturas con precisión, especialmente en condiciones controladas de iluminación. Por otro lado, el escáner láser proporciona mediciones precisas incluso en condiciones adversas de iluminación, además se pueden escanear, aunque con complejidad, superficies que se encuentran fuera del alcance de la fotogrametría, como superficies lisas o reflectantes. Se puede afirmar que para objetos de tamaño escultórico ambas técnicas proporcionan una calidad de medida y realismo similares, siendo capaces ambas de registrar correctamente inscripciones talladas de profundidad en torno a dos milímetros.

* Respecto de la limitaciones y desafíos: La fotogrametría puede enfrentar desafíos significativos en entornos con iluminación variable o espacios confinados, donde la visibilidad y la consistencia de las imágenes pueden ser comprometidas. Por otra parte, aunque la inversión inicial en fotogrametría puede ser menor, se requiere un ordenador potente y una cámara fotográfica de alta calidad para procesar los datos de manera eficiente, esta inversión es más flexible y escalable en el tiempo. La fotogrametría permite beneficiarse de mejoras continuas

en software sin necesidad de cambiar el hardware principal, a diferencia del escáner láser, donde las mejoras suelen requerir una nueva inversión en hardware más avanzado, con el desembolso que esto conlleva. En el caso que nos ocupa ambos equipos fueron capaces de registrar correctamente el objeto in situ, sin necesidad de contar con medios especiales de iluminación ni instrumental específico de ningún tipo.

* Selección Informada de Técnicas de Escaneo 3D: La elección entre fotogrametría y escáner láser depende de las características específicas del objeto y las necesidades del proyecto. Para esculturas del tamaño de la estudiada gestionada por museos y otras instituciones culturales con limitaciones económicas y de recursos humanos no especializados, la fotogrametría emerge como una opción más viable y económica, sin comprometer la calidad de los resultados. Sin embargo, no podemos descartar la opción del escáner ya que hoy en día en el mercado podemos encontrar modelos asequibles que después de un tiempo de aprendizaje y con práctica puede ser también accesible a personal no especializado.

La fotogrametría se posiciona como una técnica eficaz y accesible para la creación de modelos 3D precisos y detallados. Los escáneres, gracias a los avances tecnológicos y la reducción de costos, también se presentan como una alternativa viable en objetos de tamaño escultórico como el que se ha utilizado en este proyecto. Este estudio ofrece información útil para que los responsables de la toma de decisiones en museos y otras instituciones culturales puedan elegir la técnica de modelado 3D más adecuada para sus necesidades específicas. Con una comprensión clara de los costos, la facilidad de uso, la eficiencia y las limitaciones de cada técnica, los gestores culturales pueden tomar decisiones informadas que permitan integrar estas tecnologías de manera sostenible y efectiva en sus actividades cotidianas, mejorando así la preservación y difusión de su patrimonio.

6. BIBLIOGRAFIA

- * Agencia EFE. (2024, abril 5). La Domus do Mitreo, un tesoro arqueológico en Lugo reconocido por la revista National Geographic. Agencia EFE. Recuperado el 8 de junio de 2024, de <https://efe.com/galicia/2024-04-05/domus-do-mitreo-lugo-national-geographic/>
- * Atik, M. E., Duran, Z., Yanalak, M., & Seker, D. Z. (2022). Cultural Heritage and Science. *Org.tr.*, 3(1), pp. 25-29. Recuperado el 19 de junio de 2024, de <https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/2456747>
- * Balletti, C., Ballarin, M., Guerra, F. 2017. 3D printing: State of the art and future perspectives. *Journal of Cultural Heritage*, Vol. 26, pp. 172-182. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2017.02.010>.
- * Barberà Giné, Aleix. (2017). Fotogrametría para la conservación-restauración de bienes culturales. *Unicum*, núm. 17. 153-162. Recuperado el 22 de junio de 2024, de https://www.researchgate.net/publication/332766679_Fotogrametria_para_la_conservacion-restauracion_de_bienes_culturales
- * Colmenero Fdez, A. (2017). A methodology to adapt photogrammetric models to virtual reality for oculus gear vr. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-4/W6, 35–37. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-xlii-4-w6-35-2017>
- * Chalmers, Alan & Rhyne, T. & Rocchini, Claudio & Cignoni, Paolo & Montani, Claudio & Pingi, Paolo & Scopigno, Roberto. (2001). A low-cost 3D scanner based on structured light. *Computer Graphics Forum*. 20. <https://doi.org/10.1111/1467-8659.00522>. Recuperado 6 de junio de 2024, de https://www.researchgate.net/publication/2377692_A_low_cost_3D_scanner_based_on_structured_light.
- * Duran, Z., Ozcan, K., & Atik, M. E. (2021). Classification of Photogrammetric and Airborne LiDAR Point Clouds Using Machine Learning Algorithms. *Drones*, 5(4), 104. <https://doi.org/10.3390/drones5040104>
- * Gil-Docampo, M., Ortiz-Sanz, J., Rego-Sanmartin, T., & Arza-Garcia, M. (2019). A World wide web-based practice that disseminates photogrammetry: Inspiring secondary students to

pursue geomatics careers [education]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine, 7(1), 86-97.

* Guidi, G., Gonizzi Barsanti, S., Micoli, L.L., Russo, M., 2015. Massive 3D Digitization of Museum Contents. Built Heritage: Monitoring Conservation Management. Research for Development. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-08533-3_28

* Ireal 3D user manual. Working parameters, (Fotografía). Scantech. (2023). Recuperado el 12 de junio de 2024. de <https://www.ireal3dscan.com/main/3skill/mode.html>

* La domus del mitreo: 2000 años de historia en 700 m2. (Fotografía). Diputación de Lugo. (s. f.). Recuperado el 9 de junio de 2024, de <https://turismo.deputacionlugo.gal/es/conece/lugoinedito/domusmitreo>

* Megri, A. C., & Hamoush, S. (2020, June). Teaching high school students innovative topics related to advanced manufacturing and 3-D printing. In 2020 ASEE Virtual Annual Conference Content Access.

* Ortiz-Sanz, J. P., Gil-Docampo, M., Rego-Sanmartín, T., Arza-García, M., Tucci, G., Parisi, E. I., ... & Mugnai, F. (2020). D3mobile metrology world league: training secondary students on smartphone-based photogrammetry. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 43, 235-241.

* Pavlidis, G., Koutsoudis, A., Arnaoutoglou, F., Tsioukas, V., & Chamzas, C. (2007). Methods for 3D digitization of Cultural Heritage. Journal of Cultural Heritage, 8(1), 93–98. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2006.10.007>

* Qiu, Junzhe & Xie, Xiaowen. (2023). Methodology and evaluation of digital assets reconstruction of cultural heritage with visitor participation in museum. <https://doi.org/10.26530/9789401496476-127>. Recuperado el 6 de junio de 2024, de <https://library.oapen.org/bitstream/handle/20.500.12657/85920/127.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

* Rodríguez, C. (s.f.). [Página web oficial de la Domus do Mitreo]. Adomusdomitro. Recuperado el 8 de junio de 2024, de <https://adomusdomitreo.com/piezas-destacadas/>

* Rodríguez Cao, C. (2020). La Domus del Mitreo (Lucus Augusti). [Tesis doctoral, Universidad Santiago de Compostela]. Minerva Repositorio Institucional de la USC. <http://hdl.handle.net/10347/24047>

*SCANTECH (HANGZHOU) CO., LTD. (2022). iReal 3D User Manual V3.2.0. Obtenido del programa de ordenador iReal Handheld Color 3D Scanner.

*Schmalz, C., Forster, F., Schick, A., & Angelopoulou, E. (2012). An endoscopic 3D scanner based on structured light. *Medical image analysis*, 16(5),1063-1072 Recuperado el 22 de junio de 2024, de <https://www.semanticscholar.org/paper/An-endoscopic-3D-scanner-based-on-structured-light-Schmalz-Forster/de74c2f1c3ae59ed6dd7cdddd2368a2f04d7fce5>

7. ANEXOS

7.1 ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Figura 1. Mitreo. La Domus del Mitreo: 2000 Años de Historia En 700 M2. (Diputación de Lugo, s. f.). Tomado de https://turismo.deputacionlugo.gal/es/conece/lugoinedito/domusmitreo	10
Figura 2. Ara votiva.	11
Figura 3. Descripción del escáner. Scantech (s.f). Tomado de https://www.ireal3dscan.com/products/ireal-2e-3d-scanner/	13
Figura 4. Escáner Scantech iReal 2E 3D Color	14
Figura 5. Escena de trabajo para utilización de escáner.....	14
Figura 6. Calibre digital.....	15
Figura 7. Levantamiento fotogramétrico.....	16
Figura 8. Planchas de vidrio.....	17
Figura 9. Planchas de vidrio en escena.	17
Figura 10. Proceso de calibración. Scantech ((2022). Tomado de iReal 3D User Manual V3.2.0. Obtenido del programa de ordenador iReal Handheld Color 3D Scanner.....	19
Figura 11. Pruebas con dianas.....	19
Figura 12 Pruebas con distintas texturas	19
Figura 13. Nube de puntos de la prueba con material similar al ara y la losa.	20
Figura 14. Pruebas recreando ara y losa.	20
Figura 15. Distintos modos de escaneo. working parameters. Ireal 3D user manual. (05/29/2023)	21
Figura 16. Trabajo de campo con el escáner.	22
Figura 17. Interfaz de escaneado.	23
Figura 18. Data Quality Color Map	23
Figura 19. Interfaz de malla.....	24
Figura 20. Interfaz de mapa. Malla editada.	25
Figura 21. Trabajo con dianas.	26
Figura 22. Trabajo con planchas de vidrio.	26
Figura 23. Pruebas de profundidad de campo.....	27
Figura 24. Parámetros lente.	27
Figura 25. Calibración de cámara	27

Figura 26. Nivelación losas.....	28
Figura 27. Colocación dianas.. ..	28
Figura 28. Obtención de datos fotogrametría.	29
Figura 29. Nube de puntos dispersa de Metashape.....	30
Figura 30. Nubes de punto densa.	31
Figura 31. Parámetros establecidos en Metashape para crear la malla.	31
Figura 32. Malla del modelo en diferentes modos. Sombreado, alambre y nivel de confianza.	32
Figura 33. Modelo texturizado	33
Figura 34. Modelo de las planchas en Metashape y puntos escogidos para verificar precisión.	35
Figura 35. Modelos 3D comparados con Cloudcompare (cotas en mm).	41
Figura 36. Comparación de modelos con textura MatCap (que muestra el relieve registrado). En el lado izquierdo se compara con el modelo fotogramétrico y en el derecho con el modelo del escáner	43
Figura 37. Comparación de modelos con texturización completa. En el lado izquierdo se compara con el modelo fotogramétrico y en el derecho con el modelo del escáner.	44

7.2 ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Características del material utilizado para escanear el ara.	13
Tabla 2. Características del equipo utilizado para el levantamiento fotogramétrico.	15
Tabla 3. Características planchas de vidrio y placa de granito.....	16
Tabla 4. Ordenadores y otros softwares utilizados en el procesamiento de datos.....	18
Tabla 5. Mediciones obtenidas con las planchas de vidrio.	42