

UNIVERSIDAD DEL VALE DE GUATEMALA  
Facultad de Ciencias Sociales



Registro de artefactos arqueológicos en Guatemala a través de  
técnicas tridimensionales

Trabajo de graduación presentado por Diego Miguel López García en  
modalidad de tesis para optar al grado académico de Licenciado en  
Arqueología

Guatemala  
2025



UNIVERSIDAD DEL VALE DE GUATEMALA  
Facultad de Ciencias Sociales



Registro de artefactos arqueológicos en Guatemala a través de  
técnicas tridimensionales

Trabajo de graduación presentado por Diego Miguel López García  
para optar al grado académico de Licenciado en Arqueología

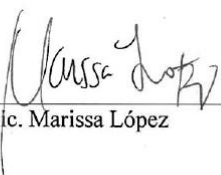
Guatemala  
2025

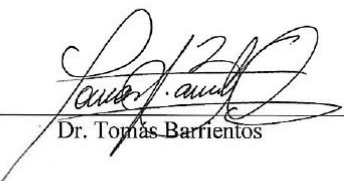
Vo.Bo.:

(f)   
M.A. Rubén Morales Forte  
Asesor

Tribunal:

(f)   
M.A. Rubén Morales Forte  
Asesor

(f)   
Lic. Marissa López

(f)   
Dr. Tomás Barrientos

Fecha de aprobación: Guatemala, 2 de diciembre de 2025

## PREFACIO

La realización de este trabajo de investigación ha sido posible gracias a la dirección y respaldo incondicional de Ernesto Arredondo y Tomás Barrientos, cuya guía experta fue fundamental desde el inicio hasta la culminación de este proyecto. Asimismo, extendo mi profunda gratitud a Marissa López y Rubén Morales Forte, quienes me acompañaron con su valioso conocimiento durante el largo camino de esta tesis.

Dedico este logro a mi familia, el pilar fundamental de mi vida. De manera muy especial a mi madre, Rocío Marysol García Dávila, por su amor incondicional, a mi padre, José Miguel López Marroquín; a mis abuelos Leonel Jorge García Ávila y Ana Susana Marroquín Jiménez; y a la honrosa memoria de mis abuelos Miguel López Pineda y Zoila Dávila, cuyo legado perdura en mí. Agradezco también a hermana, Rocío Michelle López García, por su constante apoyo moral.

Finalmente, gracias a las amistades que estuvieron conmigo durante todo este tiempo, en especial a Marcia Palacios y Katheryn Hernández, por su soporte incondicional. Hago extensivo este agradecimiento a todas aquellas personas que, aunque no he mencionado por nombre, han sido parte vital de este proceso.

## ÍNDICE

<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	1
<b>2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA</b> .....	2
<b>3. JUSTIFICACIÓN</b> .....	4
<b>4. HIPÓTESIS</b> .....	5
<b>5. OBJETIVOS</b> .....	6
<b>5.1. General</b> .....	6
<b>5.2. Específicos</b> .....	6
<b>6. MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL</b> .....	7
<b>6.1. Registro arqueológico</b> .....	7
<b>6.2. Arqueología digital</b> .....	7
<b>6.3. Métodos de digitalización</b> .....	8
<b>6.3.1. Aplicación en campo</b> .....	10
<b>6.3.2. Laboratorio</b> .....	11
<b>6.4. Almacenamiento de datos</b> .....	12
<b>6.5. Arqueología pública</b> .....	14
<b>6.5.1. Patrimonio digital</b> .....	17
<b>6.5.2. Uso y aplicación desde el ámbito legal guatemalteco</b> .....	17
<b>7. ANTECEDENTES</b> .....	19
<b>7.1. Métodos tradicionales de registro arqueológico</b> .....	19
<b>7.1.1. Dibujo</b> .....	19
<b>7.1.2. Fotografía</b> .....	27
<b>7.2. Métodos tridimensionales de registro Arqueológico</b> .....	29
<b>7.2.1. Fotogrametría</b> .....	29
<b>7.2.2. Escáner láser</b> .....	30

7.3.1	Universidad del Valle de Guatemala.....	34
7.4.	San Andrés Semetabaj.....	37
7.4.1.	Datos generales.....	37
7.4.2.	Ecomuseo de San Andrés Semetabaj .....	39
8.	<b>METODOLOGÍA</b> .....	43
8.1.	Revisión bibliográfica .....	43
8.2.	Proceso de registro tridimensional .....	43
8.2.1.	Fotogrametría.....	44
8.2.2.	Escaneo 3D.....	44
8.2.3.	Muestrario arqueológico .....	44
8.2.4.	Selección de piezas .....	45
8.2.5.	Espacios de trabajo .....	46
9.	<b>Análisis</b> .....	49
9.1.	Artefactos y procesos de digitalización .....	49
9.1.1.	Muestrario especial de figurillas, vasijas y lítica.....	50
9.1.2.	Muestrario especial cerámico .....	71
9.2.	Soluciones.....	72
9.2.1.	Superficies reflectantes (piedra verde, cerámica con engobe pulido) 72	
9.2.2.	Geometrías complejas (vasijas) .....	82
9.2.3.	Geometrías Complejas (piezas pequeñas) .....	94
9.2.4.	Problemática y soluciones en la digitalización de piezas con marcas de identificación y su organización en el proceso.....	105
9.3.	Almacenamiento de datos.....	108
9.4.	Accesibilidad y difusión.....	109
10.	<b>DISCUSIÓN E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS</b> .....	111
10.1.	Costos y ámbito legal de métodos fotogramétricos y Escaneo 3D .....	112
10.1.3.	Precisión y calidad de resultados.....	133
10.1.4.	Ámbito legal.....	134

<b>10.1.5. Accesibilidad</b> .....	136
<b>10.2. Muestrario final</b> .....	138
<b>11. CONCLUSIONES</b> .....	140
<b>12. BIBLIOGRAFÍA</b> .....	142
<b>13. ANEXOS</b> .....	150
<b>13.1. Tabla general de datos</b> .....	150
<b>13.2. Guía para realizar modelos 3D</b> .....	156
<i>13.2.1. Agisoft Metashape</i> .....	156
<i>13.2.2. Polycam</i> .....	164

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Muestra de 3 fotografías tomadas por Edward Curtis a pueblos aborígenes de Norteamérica en la bibliografía de este escrita por Oscar Colorado .....	11
Figura 2. Detalle del Codex Huamantla, 1592, donde se puede apreciar dos pirámides escalonadas (la del Sol y la Luna) mostrando con el color su estado en el tiempo .....	20
Figura 3. Mapa de la antigua Roma (1553) de Pirro Ligorio representa una reconstrucción que rescataba del olvido monumentos y edificios que ya no se conservaban, combinando el estudio de las fuentes clásicas y las ruinas con la interpretación humanista .....	22
Figura 4. Ejemplos de registro con puntillismo de la Piedra ceremonial de Santa Fe, Nuevo México.....	23
Figura 5. Ejemplos de dibujo de perfil digital hecho por Edwin Shook en el sitio arqueológico Semetabaj digitalizado por Ernesto Arredondo .....	25
Figura 6. Ejemplo de dibujo de perfil digital del mismo sitio de Semetabaj digitalizado por Ernesto Arredondo.....	26
Figura 7. Imagen del primer láser junto con su cristal de rubí, que emitió luz el 16 de mayo de 1960.....	31
Figura 8. Primeros intentos de escaneo 3D en piezas del laboratorio de la Corona.....	36
Figura 9. Ejemplo de un silbato creado a partir de fotogrametría impreso en 3D.....	37
Figura 10. Proceso de construcción del Ecomuseo de San Andrés Semetabaj.....	40
Figura 11. Vista previa a la culminación de la maqueta del sitio arqueológico Semetabaj .....	41
Figura 12. Piedra dona SAS-M12-154-4 en el proceso de fotogrametría.....	50
Figura 13. Vista desde el proceso de fotogrametría de la Vasija 1, Unidad SAS 144-4 ..	52
Figura 14. Vista de perfil de la vasija 2, Unidad SAS-144-4 en proceso de fotogrametría .....	53
Figura 15. Vista de la vasija 5, Unidad SAS-149-4 durante el proceso de fotogrametría	55
Figura 16. Vista de la vasija 3, Unidad SAS-144-4 durante el proceso de fotogrametría	56
Figura 17. Vista desde arriba de la Vasija 4, Unidad SAS-144-4 en el proceso de.....	57
Figura 18. Proceso de fotogrametría de la pieza SAS-165-2 (Fotografía por Diego López) .....	59
Figura 19. Vista de lado del fragmento SAS-160-7, donde se puede apreciar su ojo y su estructura que parece como un pico abierto.....	62
Figura 20. Vista de frente de la navaja prismática, durante el proceso de fotogrametría.	66

Figura 21. Vista de frente del cuenco SAS-195-3 y navaja prismática encontrada dentro del cuenco .....	68
Figura 22. Figurilla antropomorfa de la Unidad SAS-215-9 .....	69
Figura 23. Fragmento de mano de moler SAS-201-4 en proceso de fotogrametría .....	70
Figura 24. A) Proceso de orientación de las imágenes y generación de nube de puntos. B) Generación de nube de puntos densa y colocación de puntos de orientación digitales en Agisoft Metashape. ....	74
Figura 25. Proceso de orientación de las fotos en Agisoft Metashape, donde se observa las dos líneas de fotos utilizadas para realizar este modelo .....	80
Figura 26. Vista general de las piezas donde se ven los puntos para orientar y unir los dos lados de la pieza A) Vista de las 3 filas de fotos tomadas en la parte de arriba B) Vista de las 3 filas de fotos tomadas en la parte de abajo .....	85
Figura 27. A) Vista de arriba de los puntos de orientación de la pieza. B) Puntos que Metashape muestra desde una de las fotos del modelo. C) Vista de los puntos de orientación en la nube de puntos del modelo 3D .....	86
Figura 28. Vistas finales en <i>Meshlab</i> de la pieza, donde se puede apreciar perfectamente como los polígonos se adaptaron a la forma original de la pieza .....	95
Figura 29. A) Vista vertical del modelo final desde Meshlab. B) Vista horizontal del modelo final en Meshlab.....	96
Figura 30. A) Modelo 3D final del lado derecho de la figurilla. B) Modelo 3D final del lado izquierdo de la figurilla .....	98
Figura 31. A) Vista de la pieza en una de las fotos subidas en Metashape. B) Vista de la orientación fallida en el software .....	106

## **LISTA DE GRÁFICOS**

Gráfica 1. Cronología del muestrario cerámico de SAS.....	45
Gráfica 2. Tipo de materiales seleccionados para los muestrarios .....	46
Gráfica 3. Porcentaje de materiales escaneados, siendo en su mayoría cerámicos incluyendo tiestos, vasijas, figurillas, etc.....	139

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Lista de cerámica incluida en el muestrario 2.....	71
Tabla 2. Tiempo de las piezas más complicadas dependiendo del método de digitalización empleado. ....	116
Tabla 3. Desglose de inversión inicial para Arqueología 3D .....	137
Tabla 4. Resumen en qué tipo de pieza funciona mejor el método de escaneo 3D o de fotogrametría. ....	140
Tabla 5. Datos de las piezas escogidas para los muestrarios 3D de SAS, donde al final se muestra la versión con las cuales se produjeron finalmente los modelos.....	150

## **RESUMEN**

Esta investigación aborda un desafío en la arqueología guatemalteca. La preservación y divulgación del patrimonio cultural frente al riesgo de deterioro de artefactos en bodegas o exhibiciones limitadas, el estudio propone el uso de tecnologías tridimensionales (fotogrametría y escaneo 3D) para documentar, analizar y compartir piezas arqueológicas de manera accesible y precisa.

# 1. INTRODUCCIÓN

El registro arqueológico es un proceso de documentación sistemático y detallado que permite reconstruir e interpretar el pasado. Es una parte esencial del quehacer investigativo. Consiste en recopilar, organizar, documentar, preservar y proteger un objeto en un momento específico, desde su descubrimiento en campo hasta su análisis en el laboratorio (Schiffer 1991).

En la actualidad, las nuevas tecnologías han aportado nuevas técnicas de registro arqueológico que van más allá de las ilustraciones y las técnicas tradicionales. Entre estas, las herramientas de fotogrametría y escaneo 3D han experimentado un avance notable en los últimos años (Aparicio 2013). Se han vuelto cada vez más accesibles y de uso más intuitivo, lo cual ha permitido aumentar considerablemente su uso y aplicación en estos contextos. Por lo anterior, la presente investigación se centrará en la aplicación y uso de estas dos técnicas con el objetivo de implementar las nuevas tecnologías en el registro artefactos arqueológicos de Guatemala. Para ello se comparan los diferentes procesos de creación del modelo 3D, su almacenamiento, qué datos del artefacto se obtienen y cómo se comparte con el público y dentro de la comunidad arqueológica. Con esta información se podrá realizar un análisis de las ventajas y desventajas de la fotogrametría y el escaneo 3D.

Asimismo, la investigación explorará las diferentes aplicaciones que este tipo de registro pueda tener en relación con la difusión y divulgación del patrimonio cultural, tomando en cuenta que no se limita únicamente a la comunidad arqueológica, sino que también se extiende al público en general. Esto implica el uso de aplicaciones de realidad virtual, realidad aumentada, realidad mixta y plataformas como *Sketchfab*. Sin limitarse a lo virtual, la implementación de los métodos y técnicas de impresión 3D también ofrecen una nueva forma de mostrar el patrimonio cultural tangible que la arqueología tiene en sus manos. Por consiguiente, el estudio expone la implementación de ambas técnicas tridimensionales en el contexto de la colección de bienes culturales muebles resguardada en el laboratorio del Proyecto Arqueológico Semetabaj. Esto, para desarrollar un muestrario virtual interactivo compuesto por modelos 3D que puedan ser utilizados por expertos en la materia y exhibidos en el Ecomuseo de San Andrés Semetabaj.

## 2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El destino final de los artefactos arqueológicos es motivo de preocupación para los expertos en el campo. A menudo, estos objetos de valor histórico y cultural no llegan a ser vistos por el público en general, siendo relegados a informes y libros especializados que describen sus características. Los artefactos que no son exhibidos en museos corren el riesgo de terminar olvidados en bodegas, donde su deterioro es inevitable, incluso aquellos que tienen la suerte de ser expuestos en museos no están exentos de la erosión del tiempo, sufriendo daños por el paso natural de los años.

Esta situación plantea un desafío para la preservación del patrimonio arqueológico, ya que cada objeto contiene información invaluable sobre las sociedades y culturas del pasado. Es fundamental que se tomen medidas para garantizar la conservación y difusión de estos artefactos, de manera que puedan seguir siendo estudiados y apreciados por las generaciones futuras. La labor de los arqueólogos no solo consiste en descubrir estos vestigios del pasado, sino también en asegurar su legado para las próximas generaciones.

La adopción de nuevas tecnologías, como la fotogrametría, que consiste en capturar imágenes detalladas de un entorno, y el escaneo 3D, que recolecta datos sobre la forma y estructura de un objeto y su entorno, ha permitido un alcance más detallado y preciso en la documentación y registro que no era factible en la práctica arqueológica (Moyano 2017). Estas herramientas tecnológicas son capaces de almacenar una cantidad significativa de información sobre artefactos, facilitando la exploración de nuevos espacios tanto en entornos virtuales como en contextos académicos y de divulgación al público (Barceló et al. 2011).

A nivel global, se han desarrollado numerosos proyectos exitosos de registros tridimensionales. No obstante, en Guatemala, la implementación de esta tecnología ha dependido en gran medida de ayuda exterior, que, si bien ha permitido capacitar a personal local (Grigbsy et al. 2006), no ha generado una autonomía sostenible. A pesar de los avances tecnológicos que permiten un acceso más rápido y económico a esta tecnología, aún se percibe como un desafío en el país. Las cámaras digitales, especialmente las que se

encuentran en dispositivos portátiles como teléfonos celulares modernos y tabletas han simplificado y agilizado el proceso de registro de información. Estas nuevas tecnologías complementan y enriquecen las formas tradicionales de documentación, creando oportunidades para compartir información de manera más rápida y eficiente.

Partiendo de esta contextualización surgen las siguientes preguntas: ¿Es posible implementarlas en Guatemala, con respecto a costos y accesibilidad de tecnología? ¿Cómo pueden las nuevas tecnologías aportar a la documentación arqueológica en Guatemala? ¿Cómo pueden los modelos 3D ayudar a preservar artefactos frágiles o deteriorados? ¿Cómo pueden los modelos 3D ayudar a crear réplicas precisas de artefactos para exhibición y educación?

Estas preguntas buscan ser resueltas mediante la aplicación del escaneo 3D y la fotogrametría, con el objetivo de comparar la precisión de sus escalas en la creación de modelos 3D, así como la calidad de su textura y otros detalles que no son perceptibles a simple vista. Además, se busca explorar formas efectivas de compartir estos modelos con expertos y entusiastas de la arqueología, facilitando la colaboración y el intercambio de conocimientos.

### **3. JUSTIFICACIÓN**

El uso de la nueva tecnología para el registro y divulgación de la arqueología en el mundo se ha hecho notar cada vez más, demostrando ventajas al aplicar las técnicas tridimensionales. Sin embargo, la falta de práctica, una guía y el miedo a los altos gastos ha impedido que en Guatemala se practiquen de manera constante. Por eso es necesario demostrar que se puede hacer un trabajo comparable a otras partes del mundo, con costos accesibles. Para ello se compararán los costos y resultados de dos procesos distintos, los cuales pueden abrir la puerta a nuevas investigaciones y difusión de la disciplina arqueológica.

## **4. HIPÓTESIS**

La aplicación combinada de las técnicas de fotogrametría y escaneo tridimensional de artefactos arqueológicos mejora la precisión y eficiencia en el registro, estudio, conservación y difusión del patrimonio prehispánico de Guatemala.

## **5. OBJETIVOS**

### **5.1. General**

Analizar el registro tridimensional de artefactos arqueológicos del sitio arqueológico Semetabaj mediante fotogrametría y escaneo 3D para identificar las ventajas de cada técnica como medio de divulgación a la comunidad académica y al público en general.

### **5.2. Específicos**

- Elaborar una guía para la implementación de la fotogrametría y escaneo tridimensional de artefactos en entornos de laboratorios arqueológicos, tomando en cuenta su eficiencia en recurso humano, equipo, tiempo y costo.
- Comparar las ventajas y desventajas de la fotogrametría y el escaneo tridimensional de artefactos arqueológicos.
- Crear un muestrario virtual de artefactos cerámicos del Proyecto Arqueológico Semetabaj, aplicando ambas técnicas de registro tridimensional.
- Explorar los beneficios y desafíos del registro tridimensional de artefactos, en el ámbito de la divulgación arqueológica guatemalteca.

## **6. MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL**

### **6.1. Registro arqueológico**

Desde los inicios de la investigación arqueológica se implementaron ilustraciones como medios de registro (Pillsbury 2012:6). Se puede realizar un análisis del trabajo arqueológico desde aproximadamente la mitad del primer milenio a.C., con las primeras excavaciones en la ciudad de Ur. También deben considerarse las investigaciones realizadas por los griegos en las ciudades mencionadas por Hippias Mayor, según Platón. Estas investigaciones requerían evidencia material para documentar la arqueología, término utilizado para reconstruir el pasado a través de relatos (Roskams 2001:20). La actividad arqueológica surge de una necesidad social, ya que al igual que ocurrió con los sumerios y los griegos en su época, la arqueología moderna busca recuperar los vestigios del pasado de una sociedad para ampliar el conocimiento de sus orígenes y comprender su historia (Roskams 2001). A través de ellas, se organizan conjuntos complejos de información, los cuales son fundamentales para el conocimiento sobre el pasado y el presente (Ibid:2). Estas ilustraciones, ya sean dibujos o fotografías, poseen una autoridad innegable al preservar los contextos arqueológicos como un momento fijo y único en el tiempo.

La documentación se enfoca en la interpretación y conceptualización de los artefactos y construcciones arqueológicas, que se realizan tanto en el campo como en el laboratorio a través de diversos métodos que facilitan la conservación, descripción, ejemplificación y estudio más detallado del pasado. Para lograr esto, se utilizan métodos como el dibujo, la fotografía, la descripción textual, entre otros (Patrikm 1985).

### **6.2. Arqueología digital**

La arqueología virtual y digital se ha consolidado como una subdisciplina con objetivos y métodos propios que ofrecen nuevas formas de investigación, conservación y comunicación en el ámbito de la arqueología. La distinción entre ambos términos es crucial, ya que la digitalización se refiere a la creación de documentación digital, mientras que la virtualización implica el desarrollo de entornos y recursos para la representación.

Tanto la arqueología digital como la virtual, han integrado tecnologías emergentes para la investigación y protección del patrimonio cultural, lo que permite la recuperación y comunicación de información de manera más eficiente. Esto ocasiona que se puedan utilizar nuevos métodos de conservación y difusión de los resultados en el marco del patrimonio cultural (Staropoli et al. 2023:120).

La arqueología digital se centra en la investigación y el desarrollo de métodos para aplicar la visualización asistida por tecnología en la gestión integral del patrimonio arqueológico (Staropoli et al. 2023). La digitalización y el uso de nuevas tecnologías en arqueología se ha implementado de manera masiva, aunque con diferentes niveles de aplicación. Un ejemplo de esto es el Programa de Arqueología Digital, la primera iniciativa institucional de este tipo, llevada a cabo en 2010 en Argentina, que también tenía como objetivo avanzar en el concepto de ciencia colaborativa y abierta.

A lo largo de su trayecto, la arqueología virtual y digital se ha desarrollado en el marco de cartas internacionales que establecen normas específicas para la investigación, documentación y conservación del patrimonio arqueológico. La Sociedad Española de Arqueología Virtual (SEAV) fue la que sentó las bases de esta disciplina, a través de la carta internacional “Los Principios de Sevilla”, que establece normas para la arqueología virtual, enfatizando la importancia de la interdisciplinariedad, la autenticidad, la explicitación de procedimientos y la rigurosidad científica (Staropoli et al. 2023:121).

Por otro lado, el ámbito que abarca la arqueología virtual también integra nuevas tecnologías para la documentación, preservación y difusión del patrimonio arqueológico. Su objetivo es recrear de manera fiel el aspecto original de conjuntos y objetos de valor patrimonial, tanto de gran escala como monumentos, objetos de uso cotidiano, vasijas o juguetes (Grande 2015: 46). Este nuevo entorno digital y las bases de datos en la arqueología y la conservación del patrimonio cultural implican la creación de nuevas imágenes y representaciones que se transforman en algo novedoso, denominado patrimonio virtual (Staropoli et al. 2023:123).

### **6.3. Métodos de digitalización**

Los métodos de digitalización se clasifican en activos y pasivos. Los métodos activos, como los escáneres láser y la tecnología de luz estructurada (TLE), emiten una fuente de energía para capturar la forma geométrica del objeto. Por otro lado, los métodos pasivos,

como la fotogrametría y la estructura desde el movimiento (EFM), utilizan la energía reflejada por el objeto para crear un modelo 3D (Milosz et al. 2022:2).

La práctica arqueológica actual se fundamenta en el uso de infraestructuras físicas y digitales que facilitan la conservación y el acceso a la información. Por lo tanto, se debe hacer un análisis de los nuevos métodos emergentes que afectan la disciplina arqueológica; es esencial comprender la nueva infraestructura digital para la investigación, que se define como un conjunto de información, experiencia, estándares, políticas, herramientas y servicios desarrollados para propósitos académicos específicos (Izela et al. 2020:99).

Para esto, es necesario reflexionar sobre la imagen como representación, ya que es fundamental para comprender su papel en la sociedad y su capacidad para comunicar conocimiento y significado. Este ámbito es propio de la antropología visual, que se refiere al estudio de la comunicación gráfica y visual en diversas culturas y contextos (Ruby y Jay, 2007). Esto incluye la producción y análisis de imágenes fijas y en movimiento, como fotografías y películas, así como la exploración de nuevas tecnologías digitales para la creación y difusión de la etnografía. La antropología visual también se centra en la teoría y la crítica de las representaciones visuales, buscando comprender cómo las imágenes pueden ser utilizadas para transmitir ideas y datos antropológicos. Así, se entiende que la imagen es una construcción que conlleva una idea y un conocimiento que se transmiten a través de convenciones sociales, culturales y tecnológicas (Staropoli et al. 2023:121).

Una foto o representación digital, aunque carece de la presencia del ente u objeto material, captura la esencia de este (Staropoli et al. 2023). La llegada de lo digital y las innovaciones en las técnicas digitales, así como el uso de nuevos programas de libre acceso como los sistemas de información geográfica (SIG), reconstrucciones 3D y procesamiento digital de imágenes, han ampliado el panorama de estudio de la antropología visual y su labor de recuperación de datos. Dentro de todo este marco entra la conservación preventiva. La digitalización es una herramienta crucial para la conservación y mantenimiento de los artefactos, permitiendo la generación de datos y documentos que facilitan la preservación del patrimonio cultural. La reconstrucción 3D y digitalización logran detectar daños y características no visibles al ojo humano (Staropoli et al. 2023:127).

La conservación preventiva será uno de los temas principales que se abarcarán en el presente estudio, especialmente por la justificación de por qué se debe invertir en recursos

para digitalizar los artefactos que se estudian y protegen. La fotogrametría y escaneo 3D facilitan crear grandes archivos de datos de temas de estudio importantes, logrando dividirlos en tipologías de artefactos. También permite proteger los artefactos de forma digital ante eventos que no se pueden prevenir, como terremotos o acontecimientos históricos como guerras o cambios políticos que pueden amenazar el patrimonio cultural tangible.

### **6.3.1. Aplicación en campo**

Los métodos de imagen 3D, como el escaneo de superficie y la tomografía computarizada por rayos X (CT), se utilizan cada vez más para obtener información sobre la fabricación, la estructura interna, el origen y el estado actual de conservación de los objetos. Estos métodos ofrecen datos complementarios sobre la superficie y la estructura interna de los objetos (Bossema et al. 2023).

Las nuevas tecnologías permiten ampliar la comprensión de los vestigios *in situ* y la espacialidad de los yacimientos a través de aplicaciones de realidad aumentada. Por otro lado, las réplicas virtuales de los artefactos encontrados posibilitan una manipulación extensa como objetos digitales.

La aplicación en campo ha variado con el tiempo. Los estudios antropológicos de las imágenes destacan que su significado es negociado y no fijo, variando según el contexto sociocultural en el que se producen y/o consumen. Por ejemplo, las fotografías de Edward Curtis de 1968-1952 (Figura 1) pueden ser vistas como un producto de una visión romántica del siglo XIX sobre los indígenas norteamericanos, pero también pueden ser valoradas por los nativos norteamericanos actuales como una herramienta para la reconstrucción de su identidad cultural (Raso 2002).

En la arqueología se lleva a cabo la reconstrucción cultural de los espacios donde las personas habitaron y convivieron de manera constante, lo que plantea la posibilidad de una reconstrucción digital total de los espacios excavados y protegidos. La fotogrametría, el escáner láser y el radar son métodos de documentación no invasivos que se suman al conjunto de herramientas de la arqueología. La evaluación del estado de conservación y la gestión de riesgos son dos aspectos cruciales en la conservación del patrimonio arquitectónico que pueden beneficiarse de la digitalización y la realidad virtual.

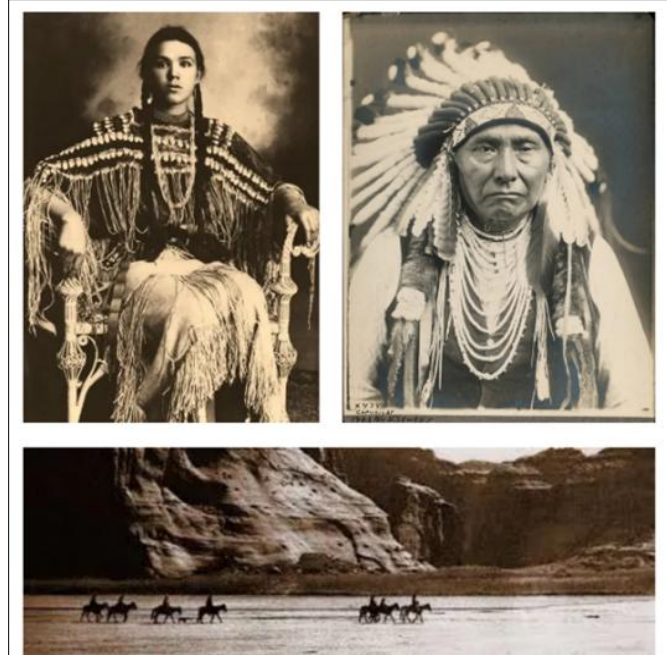


Figura 1. Muestra de 3 fotografías tomadas por Edward Curtis a pueblos aborígenes de Norteamérica en la bibliografía de este escrita por Oscar Colorado (Colorado. R 2019)

### 6.3.2. Laboratorio

En el laboratorio, se lleva a cabo un registro, análisis y restauración con mayor precisión, y de igual forma, su difusión apoya la investigación y el estudio. Este entorno permite integrar metodologías tradicionales de análisis arqueológico con tecnologías, digitales avanzadas, como la fotogrametría y el escaneo tridimensional. Diversos autores señalan que el uso de los modelos 3D en el laboratorio deben entenderse como una metodología complementaria al análisis tradicional de artefactos, y no como un sustituto de los sistemas clásicos de los sistemas clásicos de documentación arqueológica (Molloy y Milic 2018; Pendic y Molloy, 2018). La digitalización 3D facilita la comparación y el análisis de las piezas, ya que permite la creación de modelos 3D precisos y detallados que pueden ser utilizados para examinar la tecnología y la funcionalidad de las piezas (Martínez y Rodríguez, 2015:38). No obstante, la efectividad de estos modelos depende de una adecuada documentación durante el proceso de creación y de la correcta codificación de datos métricos, especialmente cuando se emplea para análisis comparativos (Molloy y Milic 2018). Se requiere una comprensión profunda del material del artefacto que se desea

registrar para determinar el enfoque metodológico. Este proceso exige, por lo tanto, una observación detallada de las cualidades físicas del objeto y una solución crítica de las técnicas disponibles (Hallot y Gil 2019).

Además, puede facilitar la interpretación de las piezas, ya que permite la creación de modelos 3D precisos y detallados. Estos modelos facilitan la visualización de los elementos que pueden pasar desapercibidos en el análisis bidimensional. Permite que un artefacto u objeto pueda ser examinado desde múltiples perspectivas sin riesgo de deteriorar el objeto original. De este modo, en el laboratorio o en el campo, la documentación 3D se convierte en una herramienta para la evaluación del estado de conservación, la gestión de riesgos, la comunicación y la coordinación entre diferentes disciplinas.

#### **6.4. Almacenamiento de datos**

La conservación del patrimonio cultural es una preocupación global que ha dado lugar a la creación de documentos internacionales y leyes de protección en numerosos países de Europa, Asia, África, Oceanía y América. En el caso de la documentación tridimensional, esta preocupación se extiende también a la gestión, reutilización y control de las copias digitales de los bienes culturales (Borissova 2017). A través de la infraestructura digital, se pueden establecer repositorios, que consisten en espacios físicos o digitales para almacenar datos como imágenes, videos, códigos o cualquier tipo de información, permitiendo su acceso al público y reutilización de archivos. La reutilización de contenido 3D constituye uno de los principales aportes de esta metodología a la investigación arqueológica, siempre que exista transparencia sobre el origen de los datos y los procesos técnicos empleados (Molley y Milic 2018).

De esta forma, la gestión de datos arqueológicos digitales requiere trascender el almacenamiento convencional para adoptar sistemas que garanticen tanto la preservación a largo plazo como el acceso público. El diseño del almacenamiento debe responder a las necesidades heterogéneas de los usuarios del patrimonio digital. Siguiendo el análisis de requisitos propuesto por Kruse y Schöenberger (2024: 2011), se identifican tres perfiles de usuario con demandas técnicas distintas:

- Usuarios cotidianos (acceso simple): el público general requiere examinar los modelos tridimensionales para obtener una impresión espacial objetiva sin la barrera de software especializado o complejo. Para este fin, los datos deben almacenarse y presentarse en formatos de fácil navegación (Kruse y Schöneberger 2024: 211)
- Especialistas (alta resolución): para la investigación arqueológica, es imperativo poder exportar mallas de alta resolución con sus texturas correspondientes, permitiendo análisis detallados fuera del entorno del archivo web (Kruse y Schöneberger 2024: 211).
- Mediación (datos específicos): la visualización con fines educativos o museográficos requiere la capacidad de exportar mallas y texturas en resoluciones adaptables al medio específico, como la realidad virtual o la impresión 3D (Kruse y Schöneberger 2024: 211).

Para satisfacer estas demandas sin comprometer la integridad de los datos, se debe implementar una estrategia de “paquetes de información” que diferencia los datos brutos, los de preservación y de los de difusión:

- Paquete de información en envío (SIP): constituye la ingesta inicial de datos generados. En caso de modelos 3D, esto incluye los archivos de proyectos propietarios y datos brutos que, una vez procesados y asegurados en el archivo maestro, pueden ser eliminados (Kruse y Schöneberger 2024: 214).
- Paquete de información de Archivo (AIP): es el núcleo de la preservación a largo plazo. Aquí se almacenan los modelos en formatos normalizados y neurales (como OBJ para geometría) con la máxima resolución posible, asegurando que la información completa esté disponible para futuras migraciones o nuevas aplicaciones tecnológicas (Kruse y Schöneberger 2024: 214).
- Paquete de información de Difusión (DIP): comprende los archivos derivados del AIP para facilitar el acceso diario o usos específicos. Dado que son derivados, estos archivos no requieren un archivo a largo plazo estricto y

pueden ser reemplazados o actualizados según evolucionen las tecnologías de visualización web o móvil (Kruse y Schönenberger 2024: 215).

## **6.5. Arqueología pública**

Como menciona el arqueólogo británico Sir Mortimer Wheeler, es responsabilidad de los arqueólogos difundir sus hallazgos al público (Richardson 2013: 1). En las últimas décadas, la comunicación entre la arqueología y el público ha evolucionado. Influenciada por el pensamiento postprocesual, la disciplina ha pasado de considerar la comunicación como un mero ejercicio técnico de difusión, a reconocerla como un tema importante en el estudio académico de la arqueología.

La arqueología pública se define como el examen de la relación entre las actividades humanas pasadas y la sociedad contemporánea o el público. El "público" se refiere tanto al Estado, que trabaja en interés público para proteger, excavar e investigar la arqueología de la sociedad, como al "público en general", es decir, aquellos que no son arqueólogos profesionales (Richardson 2013: 1). No obstante, la arqueología pública no es un concepto monolítico, teniendo dos distinciones cruciales entre dos enfoques: el educativo y el pluralista (Matsuda2004). El enfoque educativo asume que el arqueólogo posee el conocimiento y debe "iluminar" al público, mientras que el enfoque pluralista reconoce que existen múltiples formas de relacionarse con el pasado y que la arqueología debe facilitar un diálogo entre estas diversas perspectivas. En el contexto de la arqueología digital, este enfoque pluralista es vital, ya que las herramientas 3D no deben servir solo para que el experto "muestre" el objeto, sino debe permitir que la comunidad interactúe con él y genere sus propias narrativas.

Dada su naturaleza extensa, la arqueología pública hoy se define por el estudio de las diversas interacciones entre la disciplina y la sociedad. Esto incluye analizar el papel del público como espectador, usuario de servicios o socio activo en la investigación (SAA 2025). La expansión de Internet ha generado oportunidades para nuevas aplicaciones de la práctica de la arqueología pública, con contenido cultural accesible, sostenible y diverso en línea.

Los archivos digitales no son meras entidades estáticas que almacenan datos, sino que también funcionan como espacios sociales donde se crea y se comparte conocimiento. Se enfatiza la importancia de considerar la "vida social" de los archivos digitales y cómo se

utilizan e interpretan los datos. El concepto de “vida social” en el contexto arqueológico contemporáneo se define por la interacción que el artefacto mantiene con las personas tras su recuperación (Richardson 2013). Inicialmente, este vínculo es exclusivo con el investigador; sin embargo, en la mayoría de los casos, esta relación culmina abruptamente cuando las piezas son relegadas al almacenamiento en bodegas. Incluso aquel reducido porcentaje destinado a la exhibición experimenta una interacción limitada al ser confinado tras una vitrina donde su función social se reduce a la mera contemplación. Esta estática realidad contrasta drásticamente con la dinámica “vida social” que estos objetos poseían en su origen, especialmente en el caso de instrumentos musicales, sellos y elementos rituales, los cuales fueron concebidos para ser manipulados, escuchados y utilizados activamente.

Dentro de este paradigma, surge el tema de la ciencia abierta (*open science*), cuyo objetivo es transformar la manera en que la ciencia colabora, se abre y participa junto y con la sociedad en el proceso de investigación (Anglada et al. 2018). Se fundamenta en tres criterios básicos:

1. Acceso abierto: todos los resultados de la investigación, incluidos artículos, datos y herramientas, deben ser de acceso libre y gratuito.
2. Colaboración: la investigación debe llevarse a cabo de manera colaborativa entre científicos y con la participación de la sociedad.
3. Investigación para la sociedad: la investigación se orienta hacia las necesidades y desafíos sociales, buscando responder a las demandas de la sociedad.

La revolución digital ha transformado la manera en que la sociedad interactúa y accede a la información. Las tecnologías digitales ofrecen un potencial sin precedentes para la arqueología pública, así como para la práctica de la ciencia abierta (Richardson 2013: 1-8). La expansión de Internet y las redes sociales ha democratizado el acceso a la información y ha facilitado la colaboración y el diálogo entre personas con intereses similares, sin importar su ubicación, educación o nivel social.

La utilización de técnicas de fotogrametría, escaneo y realidad virtual permite crear una experiencia inmersiva y detallada del artefacto. La implementación de la experiencia de realidad virtual en motores de juego como *Unity* y el software *VR Interaction Framework*

facilita una interacción fluida y natural con el modelo 3D del monumento. La publicación de los datos del modelo 3D y la experiencia de realidad virtual en repositorios abiertos y plataformas de descarga directa proporciona un acceso remoto y gratuito a la experiencia para el público en general.

La creación de páginas web y el uso de redes sociales permiten a la disciplina difundir su investigación de manera efectiva y atractiva. A su vez, se destaca la importancia de tener una presencia en Internet para acceder a la información arqueológica y organizar visitas a sitios patrimoniales. En este aspecto, la adopción de la Carta de la UNESCO sobre la Preservación del Patrimonio Digital en 2003 marcó un punto de inflexión en la relevancia de la presencia en Internet para la conservación del patrimonio cultural (Richardson 2013).

La divulgación científica es esencial para que la sociedad entienda y aprecie el trabajo de los arqueólogos. Asimismo, el uso de redes sociales y herramientas en línea puede facilitar un diálogo con el público y promover la participación y el debate en torno a la investigación. Las tecnologías digitales pueden utilizarse para conectar a personas con intereses similares en arqueología, sin importar su ubicación, educación, afiliación académica o estatus social.

La arqueología pública en el contexto guatemalteco debe trascender la mera divulgación académica para convertirse en un ejercicio de colaboración comunitaria. El uso de tecnologías interactivas y exhibiciones ampliadas en museos regionales, como el Museo Juan Pedro Laporte Molina en Dolores, Petén, no solo incrementa la afluencia de visitantes, sino que enriquece la experiencia educativa y transforma positivamente la percepción de los estudiantes locales sobre las poblaciones mayas antiguas y contemporáneas (Morales Forte et al. 2021)

La arqueología de Guatemala y el área Maya ha transitado desde una visión puramente académica hacia una práctica que debe involucrarse con las comunidades vivas, reconociendo la continuidad cultural entre el pasado prehispánico y las poblaciones mayas actuales (Barrientos y Arredondo 2014). Asimismo, la gestión del patrimonio no puede limitarse a la conservación física, sino que debe promover la apropiación social del mismo. En este sentido, la tecnología no es un fin en sí mismo, sino una herramienta para superar las barreras físicas y económicas que a menudo separan a las comunidades de su propio

patrimonio material, el cual suele estar resguardado en bodegas o museos (Morales Forte et al. 2021).

### **6.5.1. Patrimonio digital**

El patrimonio digital se refiere a recursos únicos de carácter cultural, educativo, científico o administrativo, así como a expresiones artísticas, literarias y otras creaciones humanas que se generan de forma digital o se convierten a formato digital a partir de recursos analógicos (UNESCO 2003: 6). Estos recursos pueden incluir textos, bases de datos, imágenes, audios, software, páginas web y otros materiales digitales que tienen un valor duradero para la sociedad.

En la Carta sobre la Preservación del Patrimonio Digital de 2003, se enfatiza que el patrimonio digital es vulnerable debido a la rápida obsolescencia de las tecnologías y, especialmente, de los formatos, lo que hace esencial su preservación para garantizar el acceso futuro. El patrimonio digital es crucial para la herencia cultural de la humanidad. Su conservación asegura que las generaciones venideras puedan acceder a la diversidad de expresiones culturales, científicas y sociales, colocándolo en un lugar destacado para la conservación del patrimonio cultural de la humanidad. Esto representa no solo un desafío técnico, sino también una responsabilidad ética y cultural.

La incorporación de lo digital en la arqueología no es meramente técnica; representa un cambio epistemológico o un “giro computacional”. La arqueología pública digital tiene la capacidad de democratizar la producción de conocimiento, rompiendo la estructura jerárquica tradicional donde solo el académico tiene acceso a los datos primarios. Al liberar modelos 3D de alta resolución, se transforma al usuario pasivo en un participante activo que puede manipular, analizar y reinterpretar el objeto arqueológico sin la intermediación física de la institución (Richardson 2013).

### **6.5.2. Uso y aplicación desde el ámbito legal guatemalteco**

En Guatemala, el marco legal es extenso y se fundamenta en principios constitucionales, leyes específicas y tratados internacionales. Comenzando con la Constitución Política de la República de Guatemala, el artículo 61 establece la obligación del Estado de proteger el patrimonio cultural de la Nación, incluyendo los bienes

arqueológicos. Este artículo, en particular, sienta las bases para toda la legislación secundaria en materia de patrimonio cultural.

El decreto legal institucional más importante en materia de protección del patrimonio cultural en Guatemala es la Ley para la Protección del Patrimonio Cultural de la Nación (Decreto 26-97). Sus disposiciones definen los bienes culturales como aquellos “muebles e inmuebles que tengan valor histórico, artístico, científico o técnico”. Con base en esta definición, los artefactos arqueológicos digitalizados quedan explícitamente incluidos.

También existe el Reglamento de la Ley para la Protección del Patrimonio Cultural (Acuerdo Gubernativo 275-68), el cual desarrolla las disposiciones del Decreto 26-97. Aunque no se mencionan explícitamente metodologías digitales como el escaneo 3D o la fotogrametría, contiene aspectos relevantes para el trabajo de digitalización, como el artículo 37 (Reproducción de bienes culturales), que permite la reproducción de bienes culturales “por todos los medios técnicos disponibles”, siempre que no se dañe el objeto original. Para los métodos que impliquen contacto directo con el objeto, se requiere previamente la autorización de la Dirección del Patrimonio Cultural y Natural. También incluye una parte importante el Artículo 70, autorizando a las instituciones competentes a emitir reglamentos y disposiciones técnicas, lo que permite incluir metodologías digitales en el futuro.

En el ámbito internacional, Guatemala es parte de varios acuerdos, comenzando con la Convención de la UNESCO de 1970 sobre las medidas que deben adoptarse para prohibir e impedir la importación, exportación y transferencia de propiedad ilícitas de bienes culturales. También ha suscrito la Convención de UNIDROIT de 1995 sobre los bienes culturales robados o exportados ilícitamente, así como la Convención sobre la Protección del Patrimonio Cultural Subacuático, esta última especialmente relevante para proyectos de digitalización de artefactos subacuáticos.

## **7. ANTECEDENTES**

### **7.1. Métodos tradicionales de registro arqueológico**

#### **7.1.1. Dibujo**

Desde los tiempos de los anticuarios hasta la actual formación universitaria en arqueología, ha sido fundamental para todos los arqueólogos/as tener la habilidad de dibujar. Esto se basa en la idea de que al dibujar se está interpretando, analizando y estudiando en primera fila. A lo largo del tiempo, esta práctica no ha sido descartada, lo que ha llevado a que los nuevos métodos, como la fotografía, se consideren un complemento al dibujo (Roskams 2001).

El avance del registro material ha sido de interés evolutivo, al igual que la arqueología misma. Comienza con un interés por el otro en la antigüedad, evolucionando hacia la preservación del pasado frente al progreso. A medida que la población crecía y ocurrían desastres naturales, esto provocaba frecuentemente la demolición de viejas viviendas y su reemplazo por edificaciones que albergaban a más personas. Posteriormente, surge un despertar del nacionalismo y la protección de la historia propia, siendo esta una de las características principales de la arqueología hasta el día de hoy (Pillsbury 2012:14).

Los anticuarios han existido en esencia desde la antigua Grecia y Roma, desarrollándose a lo largo de la Edad Media (Fernández et al. 2022). En el año 1283, en lo que hoy es la ciudad de Padua, se encontró la tumba de un gigante, según las descripciones de su descubridor, el juez Lovato Lovati. Esto despertó el interés por el pasado de la ciudad. Cuatro décadas después, se halló una inscripción con el nombre de Detitus Livius, lo que causó un revuelo entre las personas, pensando que pertenecía a la tumba de un gran historiador. Sin embargo, las investigaciones mostraron que en realidad se trataba de la tumba de un liberto (Fernández et al. 2022). La emoción por estos descubrimientos marcó el desarrollo de un tipo de investigación que involucraba el análisis de objetos. Aquí destaca el trabajo del famoso intelectual y poeta Petrarca, quien, en lugar de coleccionar artefactos históricos, comenzó a estudiar los monumentos del Foro Romano, los cuales teorizó en su tiempo que podían utilizarse para distinguir etapas históricas (Pillsbury et al 2012: 50). Sin embargo, no es hasta el periodo del Renacimiento Italiano que surge el

interés por descubrir el pasado desde una perspectiva material de manera sistemática, extrayendo artefactos y estudiando la estructura de los edificios (Pillsbury et al. 2012:8).

El enfoque en el desarrollo del sistema de registro se centró en Italia, en el corazón del antiguo Imperio Romano. Los investigadores siguieron los métodos y enseñanzas que Petrarca había legado, como Flavio Biombo, estableciendo así las bases de un enfoque de estudio del pasado que fundamenta la disciplina del anticuarismo (Roskams 2001). Las ciudades romanas experimentaban constantes renovaciones y gradualmente perdían rasgos de su antigüedad. Esto llevó a que miembros de la realeza y el papado promovieran la preservación y estudio de edificaciones del pasado. Este interés se evidencia en 1515, cuando el Papa León X encomendó a Rafael la tarea de organizar y conservar los artefactos de valor resguardados en el Vaticano, al mismo tiempo que pintaba tapices que representaban la vida de San Pedro y San Pablo (Pillsbury 2012:50). En esta línea de desarrollo, por ejemplo, a finales del siglo XVII el arquitecto y dibujante francés, Antoine Desgodetz, descubrió dibujos arqueológicos anteriores imprecisos y se propuso crear unos nuevos extremadamente precisos de edificios y monumentos romanos antiguos que servirían en el futuro como referencias (Pillsbury 2012).



Figura 2. Detalle del Codex Huamantla, 1592, donde se puede apreciar dos pirámides escalonadas (la del Sol y la Luna) mostrando con el color su estado en el tiempo (Imagen extraída de Pillsbury 2012: fig. 1.2)

En el otro lado del mundo, describir los restos y ciudades del área mesoamericana ha sido un trabajo interminable desde el siglo XVI. Sin embargo, los pueblos originarios ya dibujaban sitios en ruinas de manera "arqueológica", como Teotihuacán, brevemente descrita y dibujada con dos glifos en forma de pirámides escalonadas en el Códice de Humantla (Pillsbury 2012; 5). Lo fascinante es que estas tenían un color verde, lo que sugiere que la vegetación ya había invadido las construcciones (Figura 2).

En Europa, los artistas de finales del Siglo XV comenzaron una carrera que se extendería durante los siguientes tres siglos para dibujar artefactos históricos, especialmente aquellos pertenecientes a los antiguos romanos. También se sumaron a esto los arquitectos, quienes se enfocaron en las grandes estructuras, como lo muestra el arquitecto Giuliano da Sangallo (1445-1516), buscando preservar los monumentos antes de que fueran destruidos, un aspecto que aún persiste en la arqueología de la actualidad (Pillsbury 2012: 7). A pesar de que la moda en esos tiempos era lo romano, los obeliscos y construcciones egipcias traídas a Europa se lograron registrar a través del dibujo. El objetivo principal era capturar un momento en el tiempo, pero también surgió la idea de interpretar cómo era y cómo se formó anteriormente. Esto se puede observar en el mapa de Roma hecho por Ligorio de 1553, el cual incluye edificios que ya no existían en esa época (Pillsbury 2012: 7). Su intención era reconstruir la ciudad basándose en descripciones textuales de la misma (Figura 3).



Figura 3. Mapa de la antigua Roma (1553) de Pirro Ligorio representa una reconstrucción que rescataba del olvido monumentos y edificios que ya no se conservaban, combinando el estudio de las fuentes clásicas y las ruinas con la interpretación humanista (Imagen extraída de Pillsbury 2012: 7)

El avance del dibujo arqueológico continuó en los siglos posteriores, con un fervor aun mayor en el siglo XVIII, que tiene un propósito cultural más profundo en la historia de la humanidad, en el surgimiento y declive de las civilizaciones (Bernal 2010). Es frecuente que las primeras descripciones y dibujos del nuevo mundo provengan de expediciones militares o de estudios botánicos y geográficos. En ellas, académicos como Lisa Trever, Byron Hamann, entre otros, ocasionalmente mencionaban los monumentos y aspectos de la cultura nativa, tomándose el tiempo de dibujarlos (Pillsbury 2012:10).

A mediados del Siglo XVIII, el periodo de la Ilustración aumenta el interés por el pasado y las diferencias culturales. Ya se observan investigadores profesionales como Antonio de León y Gama, el primer arqueólogo mexicano (Bernal 2010). A partir de este punto, el desarrollo del registro gráfico arqueológico ve la necesidad de contratar artistas para las ilustraciones y sigue una línea de mejora constante. La evolución se puede apreciar desde la primera exploración en Palenque por Antonio Solís (1784), que presenta el primer

informe formal del sitio, hasta la segunda realizada por Antonio Bernasconi (1785) (Pillsbury 2012: 10).

El registro muestra la objetividad de la investigación en diferentes periodos históricos alrededor del mundo, algo que es común tanto en la arqueología pasada como en la moderna. Las expediciones europeas del siglo XIX a México ofrecen una perspectiva cultural y militar que se puede comparar con la expedición de Napoleón Bonaparte a Egipto. A lo largo del tiempo, se ha desarrollado la integración de diferentes ramas de la ciencia, lo que enriquece el registro arqueológico y requiere cuidado al interpretar un objeto o estructura (Pillsbury 2012).

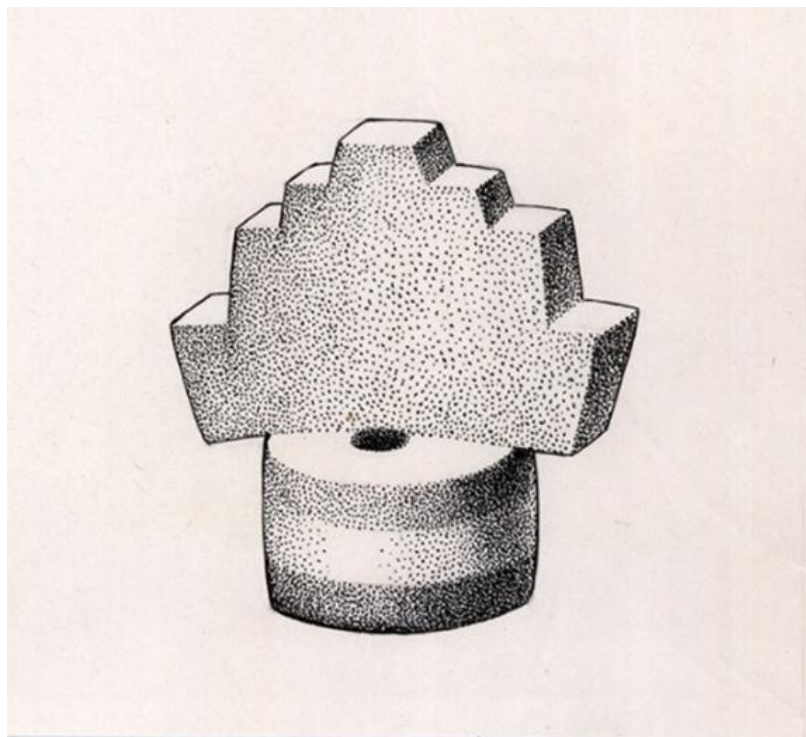


Figura 4. Ejemplos de registro con puntillismo de la Piedra ceremonial de Santa Fe, Nuevo México (fotografía tomada de Catarina.udlap.mx, 2024)

En las últimas seis décadas, el dibujo arqueológico ha buscado representar los hallazgos con mayor realismo, incorporando nuevas técnicas que son especialmente útiles para documentar artefactos, estructuras y contextos arqueológicos de manera detallada. Entre ellas, el puntillismo, inspirado en el arte tradicional, utiliza puntos para crear sombras y texturas, logrando efectos más realistas (Figura 4). Es especialmente útil para superficies

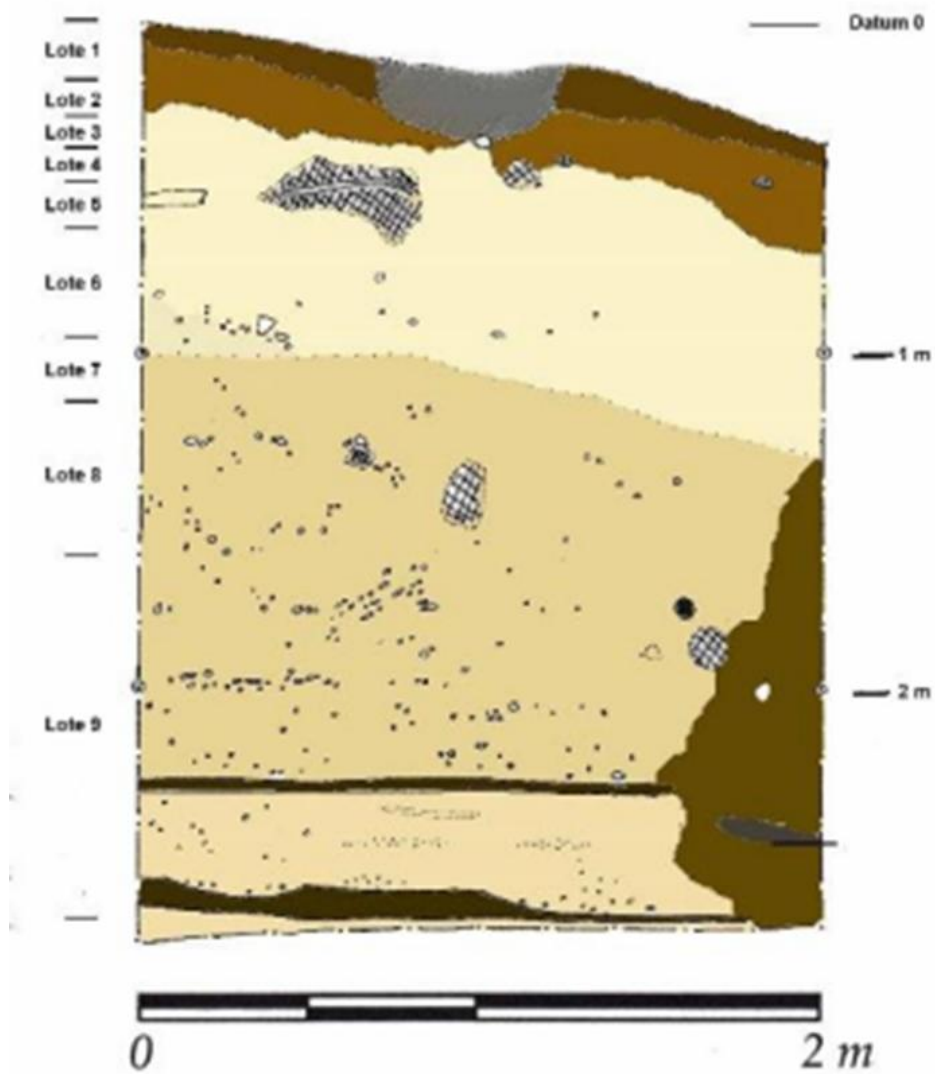
irregulares o materiales con texturas complejas, como cerámica o piedra (Adkins et al. 2008).

También ha mantenido técnicas más esquemáticas y codificadas, especialmente en el registro de perfiles estratigráficos y planos de excavación. Estas técnicas son fundamentales para la interpretación de los contextos (Figura 5). Los perfiles son representaciones codificadas de las capas estratigráficas de un yacimiento, empleando diversas convenciones gráficas para indicar distintos tipos de suelo, materiales y estructuras (Harris 1989).

Más recientemente se ha integrado en el dibujo la incorporación de herramientas digitales que combinan realismo y codificación (Figura 6). Para esto se utiliza software especializado para crear dibujos a partir de los mismos dibujos realizados a mano, programas como *Adobe Illustrator* y *AutoCAD* permiten crear dibujos técnicos precisos (Reilly 1990).



## PERFIL SUR



**SAS 5A-4**  
**Perfiles Sur**  
**Escala 1:20**  
**Dibujo por: E. Arredondo**  
**17 Junio 2022**

Figura 6. Ejemplo de dibujo de perfil digital del mismo sitio de Semetabaj digitalizado por Ernesto Arredondo (Arredondo 2022: 114)

### 7.1.2. Fotografía

En 1806, William Hyde Wollaston patentó la cámara lúcida, un método que lograba retratar desde personas hasta estructuras de forma detallada (Figura 7). Para 1826, Joseph Nicéphore Niépce creó la primera fotografía conocida, “Vista desde la ventana en Le Gras” (Figura 8), utilizando una técnica conocida como heliografía. Posteriormente, Louis Daguerre perfeccionó el proceso con el daguerrotipo en 1839, que permitía capturar imágenes con mayor claridad y detalle (Marien 2015).

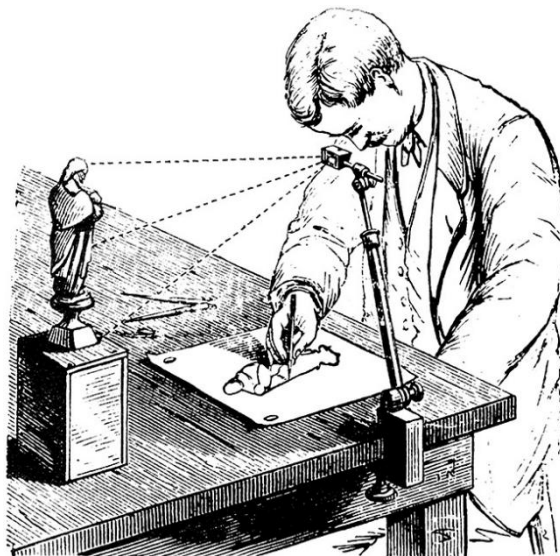


Figura 6. Ilustración de cómo funcionaba una cámara lúcida (Elizondo: 2025)

En 1851, Frederick Scott Archer presentó al mundo el método del colodión húmedo, que permitió tomar fotos más nítidas y en menos tiempo. Este método fue el preferido para la fotografía hasta la década de 1880. George Eastman desarrolló las placas secas y, un tiempo después, el rollo de película flexible, lo que popularizó la fotografía en todo el mundo (Newhall 1982).

A principios del Siglo XX, comienza a desarrollarse la fotografía en color. El primer proceso práctico para capturar imágenes a color fue creado por los hermanos Lumière, conocido como *Autochrome*. Sin embargo, el método más utilizado durante décadas fue la película *Kodachrome*, lanzada por la empresa Eastman Kodak Company en 1935 (Hirsch 2017).

A finales del siglo XX, la revolución digital transformó la fotografía. En 1975, Steven Sasson de Kodak desarrolló la primera cámara digital (Figura 9), pero no fue hasta la última década del siglo pasado que estas cámaras se hicieron accesibles al público. En el siglo XXI, los teléfonos inteligentes con cámaras digitales integradas han democratizado la fotografía, permitiendo que muchas personas capturen y compartan imágenes instantáneamente (Goldberg 1991).



Figura 7. Primera fotografía permanente (1826), de Joseph Nicéphre (Sánchez 2024)

Desde su creación, la cámara fotográfica ha desempeñado un papel importante en la documentación y el registro de hallazgos arqueológicos. Desde entonces la fotografía se ha utilizado en proyectos de campo y restauración (La Mouri 2018). Sin embargo, no fue hasta finales del siglo XIX, cuando la fotografía arqueológica se convirtió en una práctica común y sustituyó a los costosos grabadores. Durante este período, muchos fotógrafos documentaron los diferentes descubrimientos arqueológicos, lo que tuvo una importancia capital en el desarrollo de la arqueología moderna. Desde entonces, la fotografía arqueológica se ha convertido en una de las herramientas básicas de la arqueología y la tecnología de las cámaras por teléfonos celulares ha facilitado aún más la labor (Molinos et al. 2023).



Figura 8. Primera cámara digital presentada por Sasson para Kodak (fotografía tomada de ámbito.com, 2024).

Fue hasta mediados del siglo pasado que se comenzó a analizar con un ojo más crítico el sistema de registro utilizado en el campo, incluyendo los dibujos, la fotografía, la descripción escrita y la llegada de fotos aéreas, lo cual, junto al surgimiento de nueva tecnología, mostraba un panorama prometedor para la Nueva Arqueología (Pillsbury 2012: 404).

## **7.2. Métodos tridimensionales de registro Arqueológico**

### **7.2.1. Fotogrametría**

El ser humano, para orientarse en el espacio y calcular distancias, utiliza los ojos para registrar dos imágenes ligeramente diferentes, las cuales son procesadas por el cerebro para generar una imagen 3D. Basándose en este principio, la fotogrametría funciona de manera similar; si se utilizan dos o más fotografías de un mismo objeto tomadas desde diferentes puntos, es posible orientarlas tridimensionalmente (Doménech 2016:139). Esta técnica comenzó a utilizarse en Alemania en el año 1859, cuando el arquitecto Meydenbauer la utilizó para el levantamiento de edificios (Moyano 2017:335). A sus inicios se convirtió en una herramienta cartográfica (Castañeda 2020). Se le dio mayor importancia cuando se comenzó a hacer fotografía aérea, utilizándose para obtener rasgos

cartográficos más precisos. Con este mismo objetivo llegó a Guatemala, por lo que se empleó desde 1935 para crear un mapa aerofotográfico y desde entonces fue utilizada principalmente en el país en los campos de arquitectura y geografía (Castañeda 2020).

En el ámbito de la arqueología, la aplicación de la fotogrametría se había contemplado incluso antes de la llegada de las cámaras digitales y las computadoras modernas. En 1976, el arquitecto y experto en conservación y restauración Antonio Almagro publicó un trabajo en el que experimentó con la tecnología disponible en ese periodo (Doménech 2016:139). Con la llegada de la era digital a finales del Siglo XX, el uso de la fotogrametría permitió emplear softwares para crear modelos 3D de sitios arqueológicos. En Mesoamérica, esta técnica se utilizó por primera vez en 1997, se utilizó esta técnica para generar un modelo digital del Palacio de Xtampak en México, siendo uno de los primeros ejemplos de registro y difusión del patrimonio material de una estructura prehispánica (Guirola 2009). Eso sólo fue el comienzo, ya que un año más tarde se creó el modelo 3D de la ciudad de Teotihuacán. En Guatemala, esta práctica comenzó a principios del siglo XX. Uno de los primeros proyectos se realizó en 1935, cuando se elaboró un mapa aerofotográfico que mostraba las fronteras de Guatemala, Honduras y El Salvador. Las primeras prácticas de fotogrametría aérea en Petén fueron llevadas a cabo por la petrolera Shell entre 1937 y 1938 con el objetivo de obtener un mapa geológico de la región (Cuque 2020). En el ámbito de la arqueología, uno de los primeros proyectos en utilizar fotogrametría fue Copán en el año 2004 (Guirola, 2009; 4).

La fotografía digital moderna utiliza varios tipos de softwares que permiten crear modelos 3D, por lo que se ha convertido en el principal recurso para el registro en 3D, permitiendo realizar una excelente recopilación de artefactos, edificios y sitios arqueológicos en 3D. Un buen ejemplo es la colección europea (europeana 2025), una de las páginas que alberga una de las mayores colecciones 3D de arqueología en la actualidad, fruto de un esfuerzo conjunto de todos los países de Europa. Incluye modelos 3D pequeños, como fragmentos, así como edificaciones completas, como castillos, cementerios e iglesias.

### **7.2.2. Escáner láser**

La tecnología de escaneo 3D tiene una larga y rica historia que se remonta a la década de 1950. Los primeros escáneres utilizaban luces, cámaras y proyectores para

capturar la forma de los objetos, pero tenían limitaciones y requerían mucho tiempo y esfuerzo para escanear objetos con precisión (Ebrahim 2014). En la década de 1960, el LiDAR (*Light Detection and Ranging*) surgió tras la invención del láser en 1960 (Figura 10), utilizándose inicialmente para medir la densidad de las nubes. Entre 1970 y 1980, se desarrollaron los primeros escáneres láser para aplicaciones industriales, como la medición de piezas mecánicas (Cyberware 1995).

En la década de 1990 a 2000, el LiDAR se popularizó en la cartografía y la arqueología, integrándose también en sistemas de navegación para vehículos automáticos (Wehr et al. 1999). En la década de 2000, el escaneo 3D se volvió más accesible gracias al desarrollo de tecnologías como la fotogrametría y los escáneres portátiles. En 2020, el iPhone 12 marcó un hito en la democratización de esta tecnología para aplicaciones cotidianas.

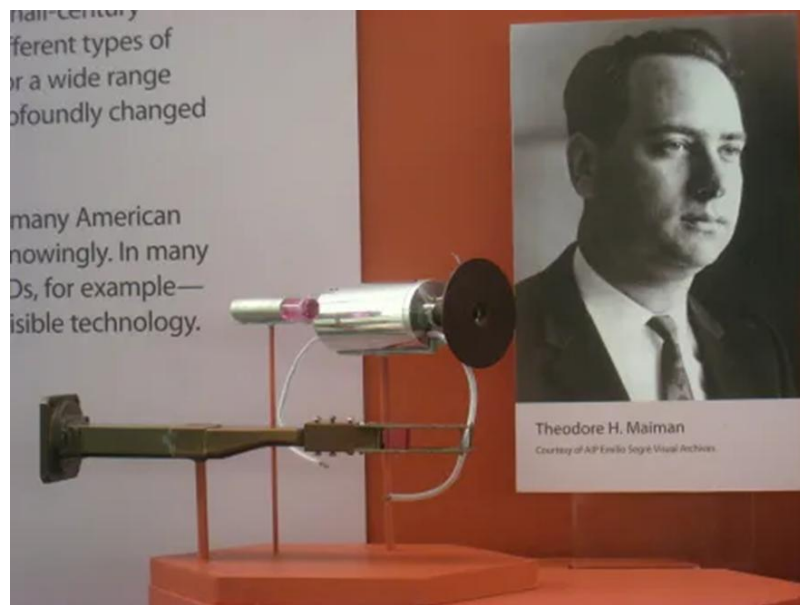


Figura 7. Imagen del primer láser junto con su cristal de rubí, que emitió luz el 16 de mayo de 1960 (fotografía tomada de ztfnews.com, 2024)

El uso del escaneo 3D en arqueología es un desarrollo relativamente reciente. Se utilizó por primera vez en 2005 en Tikal, mediante el Escáner Láser Cyrax utilizado por la institución CyArk, generando 160 elementos multimedia y un mapa arqueológico de la acrópolis norte (Guirola 2009:4).

En Guatemala, la arqueología ha experimentado un importante desarrollo en las últimas décadas, con la formación profesional de arqueólogos a partir de 1975. La carrera de arqueología se estableció en la Escuela de Historia de la Universidad de San Carlos de Guatemala (USAC), y posteriormente en la Universidad del Valle de Guatemala (UVG) en 1982 (Aroche, 2021).

En un avance significativo, los investigadores han empleado la tecnología láser conocida como LiDAR. En Europa se utiliza por primera vez esta tecnología en 2005 para mapear paisajes culturales como bosques ingleses y romanos (Bewley et al. 2005). Los primeros en utilizarla en el área maya fueron los arqueólogos estadounidenses Arlen y Diane Chase en Caracol, Belice, en el año 2009, publicando sus resultados un año después en el *Journal of Archaeological Science* (Chase 2010). Posteriormente se empleó por la Fundación PACUNAM en un esfuerzo impresionante para descubrir y preservar la rica historia de la civilización maya en Guatemala, que dio como resultado la identificación de más de 60,000 estructuras prehispánicas (Canuto et al. 2018). Este descubrimiento ha desafiado las suposiciones occidentales sobre las civilizaciones complejas en los trópicos, abriendo nuevas perspectivas sobre las sociedades antiguas de la región (Clynes 2018). En Honduras para el 2021 se realiza un mapeo de Copán y su área geográfica (Awe et al 2021).

### **7.3. Registro tridimensional en Guatemala**

La aplicación de escaneo 3D y fotogrametría en las piezas arqueológicas en Guatemala se impulsó gracias al estudio epigráfico en diversas regiones del país. Un referente inicial es Alexandre Tokovinine, quien entre 2012 y 2013 realizó el escaneo del friso de Holmul (Edificio A, Grupo II). Este trabajo marcó un hito al utilizar escáneres de luz estructurada para registrar un hallazgo reciente en riesgo de erosión (Tokovinine 2013). Este trabajo se puede apreciar en el Atlas Epigráfico de Petén, Fase I página 200 (Fialko y Tokovinine 2016: 200). Posteriormente, un aporte clave fue la creación en 2016 de su perfil en *Sketchfab* (<https://sketchfab.com/tokovinin3d>), donde ha difundido modelos de alta resolución de sitios como Holmul, Naranjo y Tikal.

Simultáneamente en la Costa Sur, entre 2010 y 2012, Oswaldo Chinchilla colaboró con investigadores como William Collins para realizar los primeros escaneos laser de monumentos masivos en Santa Lucía Cotzumalguapa y el Baúl (Chinchilla 2012). El

objetivo principal de este esfuerzo fue revelar el “Estilo Cotzumalguapa” en relieves que se encontraban muy bajos y erosionados.

En el ámbito de la documentación monumental, entre 2014 y 2015, Camilo Luin, actual curador del Museo Popol Vuh, trabajó en las temporadas de campo del Proyecto Quiriguá (Looper et al 2016). Actualmente, Luin gestiona un repositorio digital donde comparte modelos fotogramétricos tanto del Museo Popol Vuh como de otras instituciones (<https://sketchfab.com/arqueoluin>). Finalmente, surge una nueva ola de experimentación con métodos tridimensionales, ejemplificada e el trabajo liderado por Mary Kate Kelly en la Estela 51 de Perú-Waka´. Este proyecto integró el análisis de epigrafía con la evaluación del estado de conservación del monumento (Kelly et al 2023).

Un referente fundamental y reciente en la aplicación de tecnologías de documentación 3D en el área maya es el Proyecto de Preservación Digital de Quiriguá, liderado por el Center for *Digital Heritage and Geospatial information* de la Universidad de South Florida (USF). Aunque las labores de captura de datos iniciaron en 2019, la publicación de los modelos y resultados finales se consolidaron entre 2021 y 2022. La importancia de este proyecto radica no solo en la precisión técnica, sino en el enfoque de acceso abierto, permitiendo que los artefactos arqueológicos sean estudiados de forma remota y preservados digitalmente ante el deterioro ambiental del sitio. Este esfuerzo internacional demuestra la viabilidad de crear repositorios digitales de alta fidelidad para el patrimonio guatemalteco.

Un caso contemporáneo de gran relevancia en el ámbito nacional es el proyecto desarrollado en el sitio arqueológico La Blanca, en el departamento de Petén. Durante el año 2022, se implementaron técnicas de documentación digital avanzada para el registro de la arquitectura monumental y relieves expuestos del sitio (Vidal et al 2020). El uso de fotogrametría aérea mediante drones y el escaneo láser terrestre ha permitido generar modelos de elevación digital y reconstrucción 3D que son vitales para el monitoreo de la conservación estructural de los palacios del Clásico Terminal.

Asimismo, en años recientes han surgido iniciativas locales que integran el uso de tecnologías 3D en la arqueología guatemalteca, destacando la colaboración con el Departamento de Monumentos Prehispánicos y Coloniales (DEMOPRE). Un ejemplo relevante es el proyecto PatrimonioDroneexplorer, iniciando hacia el año 2021. Esta

iniciativa se ha centrado en la documentación digital de sitios arqueológicos y rasgos específicos, como pozos de sondeo, mediante el uso de fotogrametría aérea y terrestre en contextos de proyectos de rescate.

Si bien este proyecto ha comenzado a incluir digitalización de artefactos, su naturaleza permanece estrechamente vinculada a las actividades de campo y la respuesta inmediata ante el rescate arqueológico. Como se puede observar en su repositorio de *Sketchfab*, el flujo de trabajo está orientado a la documentación del hallazgo en su contexto primario.

### 7.3.1 Universidad del Valle de Guatemala

En 2021, la Universidad de Kanazawa lanzó un curso de capacitación en registro arqueológico 3D, dirigido por el Dr. Atsuchi Noguchi, en el que estudiantes de diversas partes de América se instruyen en el tema. La Universidad del Valle de Guatemala (UVG) junto con su Proyecto Regional Arqueológico La Corona, ya que varios estudiantes y miembros del proyecto participaron en el curso.

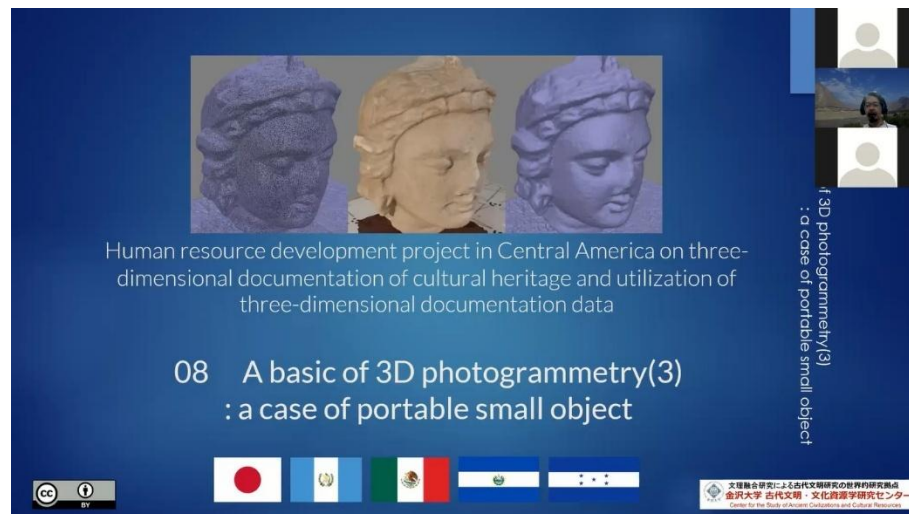


Figura 10. Vista por zoom del curso de capacitación en registro arqueológico 3D, dirigido por el Dr. Atsuchi Noguchi

Las primeras prácticas de técnica 3D en la UVG comenzaron con la fotogrametría en piezas del laboratorio La Corona, la cual demostró en este proceso que se requerían más conocimientos prácticos y teóricos de los adquiridos en el curso inicial (López et al. 2022). Como resultado, se identificó un fuerte potencial en la arqueología 3D lo que llevó a la

adquisición de un escáner 3D, el *EinScan-SP* (Figura 11 y 12). El escaneo 3D, al ser más rápido y eficiente para el trabajo de impresión, ha resultado ser la técnica más utilizada por el Departamento de Arqueología desde el año 2022. Ese mismo año, a través del proyecto “Participación comunitaria en la protección de sitios arqueológicos en la cuenca del lago de Atitlán y la Costa del Pacífico de Guatemala” (CPAIG), se imprimieron varias piezas escaneadas y de fotogrametría en el laboratorio *Makerpace D-Hive* (Figura 13), un espacio que dispone de impresoras 3D de la marca *Ulimaker Cura* para el uso general de la Universidad del Valle de Guatemala. El objetivo fue utilizar estas piezas impresas para educar y enseñar sobre las culturas prehispánicas de la región del lago de Atitlán.



Figura 11. Proceso de escaneo en el escáner EinScan-SP  
(Fotografía por: Diego López)



Figura 8. Primeros intentos de escaneo 3D en piezas del laboratorio de la Corona

En el año 2023, la UVG recibió la visita del Dr. Noguchi, quien impartió el curso nuevamente, pero esta vez de forma presencial. En este curso, se practica con el escáner de la universidad y con iPads para utilizar la aplicación *Scanivers*. Para el año 2024, el Dr. Noguchi impartió el mismo curso a estudiantes interesados en arqueología 3D.

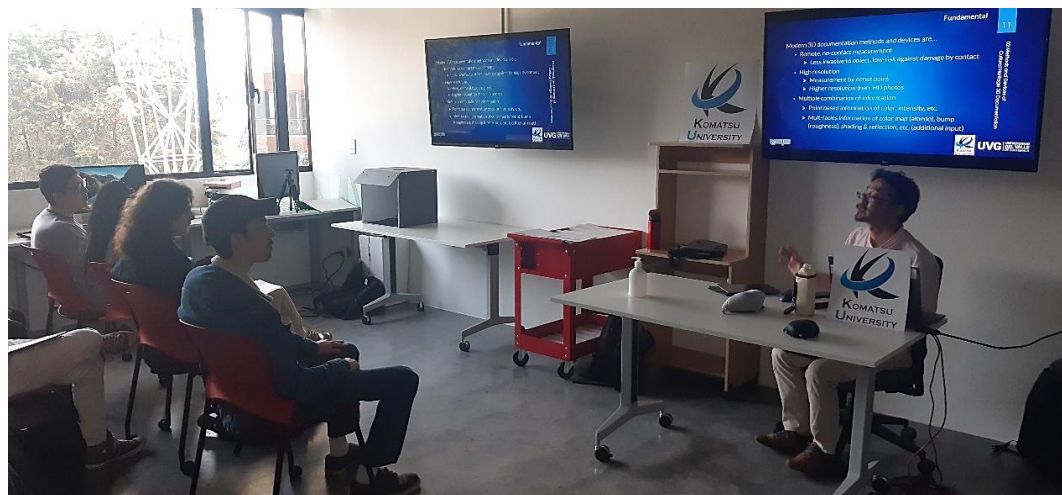


Figura 13. Primer curso presencial impartido por el Dr. Noguchi en instalaciones de la Universidad del Valle de Guatemala (fotografía por: Tomas Barrientos)

En 2024 también se contó con la visita del Dr. Akira Ichikawa y el estudiante de Maestría Wataru Tatsuda de la universidad de Kanazawa, quienes compartieron sus métodos y el trabajo que han realizado en Mesoamérica. En esta ocasión, trajeron consigo su escáner marca *Einstar*, un dispositivo portátil práctico para laboratorio y campo en arqueología.



Figura 9. Ejemplo de un silbato creado a partir de fotogrametría impreso en 3D (Fotografía por: Diego López)

A principio del año 2025 se inició la segunda fase del proyecto CPAIG, titulada “Participación comunitaria en la protección de sitios arqueológicos amenazados en el sur de Guatemala”; esta vez con nuevas metas, que incluyeron el escaneo e impresión de esculturas de la Costa sur.

Fue así como a partir de mediados de la pandemia de covid-19 en adelante, la UVG ha introducido estos métodos de registro y divulgación mediante la tecnología 3D.

## **7.4. San Andrés Semetabaj**

### **7.4.1. Datos generales**

San Andrés Semetabaj es un municipio del departamento de Sololá y el nombre Semetabaj posiblemente proviene de los términos *kaqchikeles tzemet* (“altar” o “mesa”) y *abaj* (“piedra”), lo que significa "altar de piedra". Su cabecera es el poblado del mismo nombre, el cual se asienta sobre una antigua población prehispánica que data del periodo Preclásico Medio (800-400 a.C.) (Ivic et al. 2011; 8). La primera mención del sitio arqueológico fue realizada por Samuel Lothrop en 1933 durante una gira de investigación por el Altiplano de Guatemala, patrocinada por la Carnegie Institución (Alvarado 2015:6).

En 1977 se llevó a cabo una investigación en el sitio bajo la dirección de Edwin M. Shook, con la colaboración de Marion Popenoe de Hatch y Jamie K. Donaldson (Shook et al. 1977). El objetivo era establecer una secuencia cronológica del sitio para evidenciar el periodo de ocupación al norte del Lago de Atitlán (Ivic et al, 2011: 9). Después de un proyecto de rescate por encargo del Departamento de Monumentos Prehispánicos y Coloniales en el año 2000, en 2003 la Universidad de Stanford y la Universidad del Valle de Guatemala, junto con la familia Mack (propietarios originales de la finca donde se encuentran la mayoría de las estructuras del sitio), iniciaron el Proyecto Arqueológico Semetabaj, realizando un reconocimiento del área para definir las dimensiones reales de las estructuras y del sitio en general (Ivic et al. 2011:11).

Fue hasta 2005 que comenzó la primera temporada de excavaciones en Semetabaj, pero se suspendieron por problemas con la comunidad. En 2007 (Ivic et al. 2011) se llevó a cabo un rescate que consistió en pozos de sondeo en la periferia norte del sitio arqueológico, iniciando la implementación de un programa de arqueología comunitaria. Posteriormente, en 2009, se realizó una investigación arqueológica dentro del área urbana, por medio de un rescate cerca del antiguo templo colonial de San Andrés Semetabaj (Ivic et al. 2011:12).

Entre 2011 y 2018 se realizaron diversas investigaciones arqueológicas en San Andrés Semetabaj, iniciando con un rescate en 2011, previo a la construcción del Ecomuseo, donde se hallaron vestigios de la antigua municipalidad y se elaboró el primer resumen histórico del pueblo. Entre 2012 y 2013, en el contexto del 13 Baktun, se fortaleció el enfoque comunitario y se reiniciaron las excavaciones, desarrolladas en dos etapas por arqueólogos de la Universidad de Stanford y la Universidad del Valle de Guatemala. Posteriormente, se llevaron a cabo nuevas temporadas de campo en 2013, 2014, 2016-2017 y 2018, enfocándose en la delimitación y estudio de estructuras arquitectónicas, la Plaza Central y áreas habitacionales, así como en la historia del asentamiento y sus espacios religiosos y residenciales.

En 2020, el proyecto, además de continuar con la excavación arqueológica, reforzó los trabajos relacionados a la “arqueología abierta”, que Carlos Alvarado Galindo inicio, buscando que los miembros de la localidad se involucren y conozcan más sobre el trabajo arqueológico en el sitio. Esto se benefició aún más a raíz de que el proyecto ha servido

como escuela de campo para los estudiantes de UVG por más de una década, los cuales practican no sólo las técnicas tradicionales, sino también más novedosas como el uso de drones. Se han agregado más disciplinas al estudio del área, ya que además de la arqueología y la antropología, se ha incluido estudios de etnobotánica, medio ambiente, cambio climático, turismo, desarrollo y comunicación (Arredondo 2020). El impacto de la pandemia Covid-19 afectó la temporada de campo de 2021, por lo que ese año se realizó un breve mapeo de dos sectores del sitio y capacitaciones al personal del Ecomuseo de San Andrés Semetabaj (Arredondo 2021). La última temporada de campo en el sitio se llevó a cabo durante el año 2022, consistiendo en pozos de sondeo y excavaciones centradas en la investigación de la Estructura 4. También se trabajó en la habilitación de dos salas de exposición en el Ecomuseo, que se abrieron al público.

#### **7.4.2. Ecomuseo de San Andrés Semetabaj**

El Ecomuseo de San Andrés Semetabaj se ubica en el costado norte del Parque Central de San Andrés Semetabaj. El concepto de ecomuseo se refiere a un espacio donde las comunidades pueden exhibir sus manifestaciones culturales y su conexión con el entorno natural (Caná et al. 2024: 51). El terreno destinado para este tiene 59.17 m de largo por 7.30 m de fondo, resultando en un área de 431.94 m<sup>2</sup>. Originalmente, en este terreno se encontraba el edificio de la antigua Municipalidad, que fue severamente afectado por el terremoto de 1976. Es importante destacar que los archivos locales se perdieron durante un incendio en la década de 1980. El terreno quedó sin un uso específico tras el terremoto, aunque las excavaciones realizadas en 2011 revelaron varias modificaciones orientadas a la nivelación de la plaza y la instalación de tuberías de PVC (Ivic et al. 2011).



Figura 10. Proceso de construcción del Ecomuseo de San Andrés Semetabaj (Fotografía consultada por: José Menéndez)

En el año 2009, el Municipio de San Andrés Semetabaj se estableció como el Centro de Visitantes y Sede Administrativa del Proyecto Ecomuseo del Lago Atitlán, comenzando su construcción en 2010. La alianza entre UVG y el Ecomuseo se inició en 2012, con el objetivo de posicionar el proyecto a través de iniciativas arqueológicas y la formación y capacitación (Caná et al. 2024: 52).

A mediados de 2012, la organización institucional del proyecto se consolidó con la formación de una mesa de diálogo y la elaboración de una agenda de trabajo con la participación de las siguientes instituciones:

- Gobernación de Sololá
- Municipalidad de San Andrés Semetabaj
- Universidad del Valle de Guatemala
- Ministerio de Cultura y Deportes
- INGUAT

El resultado fue la elaboración de una agenda de trabajo llamada *Oxlajuj Baktun*, que alude al final de un periodo e inicia otro basado en el calendario de los pueblos originarios (Caná et al. 2024). A partir de la creación de esta agenda, el proyecto Ecomuseo del Lago Atitlán y la Universidad del Valle de Guatemala, a través del

Proyecto Arqueológico Semetabaj, unieron fuerzas para fortalecer y recuperar el patrimonio cultural y natural en San Andrés Semetabaj (Caná et al. 2024).

A partir del 2013 las nuevas instalaciones del edificio se utilizaron para realizar capacitaciones orientadas a la etnohistoria, arqueología, ecología y vida silvestre (Caná et al. 2024). Desde 2015 hasta el presente año, esta alianza ha sido pionera en la formación y capacitación de la comunidad. Al inicio, se implementó el Jardín Etnobotánico, logrando cultivar especies de plantas comestibles y medicinales encontradas alrededor del sitio arqueológico y que se han utilizado de forma tradicional en el municipio.

El periodo de la pandemia de covid-19 no detuvo el avance del ecomuseo; se continuaron los trabajos en diseño museográfico, la creación de las salas de exposición, la instalación de medidas de seguridad adecuadas y se avanzó en la materialización de la exposición (Caná et al. 2024). En 2021, se inició el proyecto para la planificación de la primera exhibición del ecomuseo, a cargo de la Magíster Flory Pinzón, cuyo objetivo fue mostrar a la comunidad el proceso de excavación en el sitio arqueológico (Pinzón et al. 2022:922).



Figura 11. Vista previa a la culminación de la maqueta del sitio arqueológico Semetabaj (Fotografía por: Diego López)

Gracias a las capacitaciones impartidas por el Dr. Atsuchi Noguchi, comenzaron a aplicarse los métodos que él enseñó. Como primer paso, en 2022 se llevó a cabo el proceso de fotogrametría de las piezas expuestas en el Ecomuseo de San Andrés Semetabaj. Ese mismo año, siguiendo las indicaciones y descripciones proporcionadas por Ernesto Arredondo sobre las principales edificaciones del sitio arqueológico, se logró recrearlas en modelos 3D. Una vez digitalizadas, se iniciaron las pruebas de impresión 3D y corte láser para elaborar una maqueta que representara la geografía del sitio, incluyendo las pirámides. Estas reproducciones forman parte actualmente de la exposición permanente del Ecomuseo que se encuentra en el edificio desde el 2022.



Figura 17. Acto inaugural de la exposición del Ecomuseo titulada “Mi pasado, Mi historia” (Barrera 2023)

## **8. METODOLOGÍA**

### **8.1. Revisión bibliográfica**

Se realizó una recopilación y síntesis de literatura relacionada a la evolución del registro arqueológico, con énfasis en las nuevas tecnologías aplicadas en este ámbito. Centrado primordialmente en el registro 3D a través de los métodos de fotogrametría y escaneo 3D, tomando como base la documentación disponible en línea enfocada en temas de arqueología virtual. Además, incluye los documentos consultados en la Biblioteca de la Universidad del Valle de Guatemala y sus recursos digitales, así como las investigaciones publicadas por parte de la Dirección General del Patrimonio Cultural y Natural y la Asociación Tikal.

### **8.2. Proceso de registro tridimensional**

Este proyecto se originó con el propósito de profundizar en el dominio de la técnica de fotogrametría, adquirida durante la pandemia de COVID-19. Su fase inicial consistió en la documentación fotográfica de piezas arqueológicas procedentes de Semetabaj, realizada en el año 2022. Posteriormente, la incorporación del escáner 3D *Einscan SE V2.0* permitió expandir el alcance metodológico del estudio. De este modo, la iniciativa evolucionó desde un ejercicio de consolidación de conocimientos hacia un proyecto mayor, orientado a la creación de dos muestrarios digitales que cumplen con un doble objetivo: (1) exhibir las piezas más representativas del sitio arqueológico y (2) demostrar las aplicaciones y el potencial de la arqueología digital en la investigación contemporánea de piezas pequeñas como vasijas, tiestos cerámicos y elementos líticos prehispánicos.

El registro 3D arqueológico abarcó dos fases. La primera fase incluye el registro de piezas arqueológicas dentro del contexto de laboratorio y de museo. El registro de piezas de museo se llevó a cabo en las instalaciones del Ecomuseo de San Andrés Semetabaj (SAS), en Sololá, donde se seleccionaron cinco artefactos de la exhibición. Estas piezas incluyen cuatro vasijas cerámicas y un objeto lítico. Para el contexto de laboratorio se incluyeron tiestos cerámicos y objetos líticos que conforman parte del material obtenido de las investigaciones de campo del Proyecto Arqueológico Semetabaj desde el año 2016 al 2022. La digitalización de todos estos elementos se realizó a través de técnicas de escaneo 3D y fotogrametría.

Los modelos se guardaron en formato OBJ, STL, PLY y 3MF utilizando herramientas como *Meshlab*, *Cloud Compare* y *Blender* para crear un muestrario de piezas y artefactos en formato digital. Posteriormente, se creó la guía de los procesos de generación para el muestrario. Finalmente, se expone las diversas herramientas disponibles en la Universidad del Valle de Guatemala para la difusión de los resultados, tales como la realidad virtual, realidad aumentada, sitios web e impresión 3D.

### **8.2.1. Fotogrametría**

Para generar los modelos a partir de la fotogrametría se usó una cámara Canon T7 y se trabajó en una laptop Acer Nitro 7, con procesador Intel (R) Core™ i7-9750H CPU 2.60Hz, una memoria RAM de 12 GB, una tarjeta gráfica *NVIDIA GeForce GTX 1650* y un *Intel (R) UHD Graphics 630* para realizar los modelos, donde se utilizó la aplicación de *Agisoft Metashape*, así como las aplicaciones *Polycam* y *MagiScan*.

En el caso de los modelos generados desde el laboratorio, se contó con una caja fotográfica profesional donde se colocaron los artefactos en una base giratoria automática, para generar las fotos de 360 grados de cada objeto. Los puntos de control fueron pequeñas bolas de plastilina que son fáciles de transportar y obtener. En este caso se utilizaron colores complementarios al material: para cerámica, plastilina azul o verde de diferentes tonalidades; para la lítica, se utilizó plastilina naranja o roja; y para obsidiana, se utilizó el color amarillo.

### **8.2.2. Escaneo 3D**

Para el trabajo de escaneo se utilizó el *Einscan SE V2.0*, un escáner de escritorio que funciona a partir de luz blanca visible, sin láser. Se usó la aplicación *EXScan S\_v3.1.3.0*, en la computadora Acer Nitro 7 y también se usó la misma caja de luz fotográfica empleada en la fotogrametría.

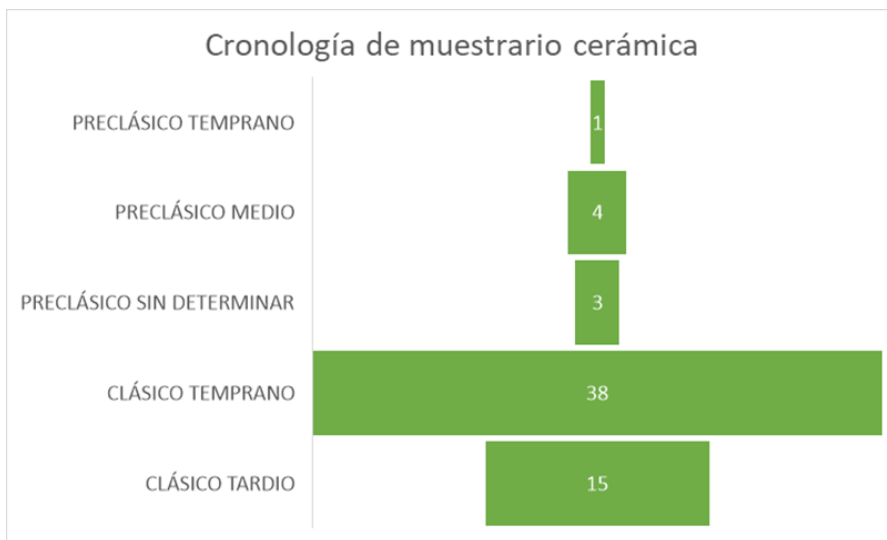
### **8.2.3. Muestrario arqueológico**

Los modelos 3D se procesaron con las aplicaciones *Meshlab* y *Blender* para refinarlos y reducir el tamaño de los archivos, lo que facilitara su carga en diversas plataformas y sitios después de terminarse cada muestrario. El objetivo principal es mostrar las ventajas de crear un muestrario virtual que se pueda compartir libremente con otros investigadores. Además, se busca demostrar los beneficios de las nuevas tecnologías al

publicarlas en páginas de realidad virtual como ARKIO, que están disponibles en el salón especial de realidad virtual de la Universidad del Valle de Guatemala. Se desarrollará una discusión sobre otros sitios web que se investigarán durante el proceso de publicación del muestrario, pasando por un proceso de autorización y que será auspiciado por el Departamento de Arqueología de la Universidad del Valle de Guatemala.

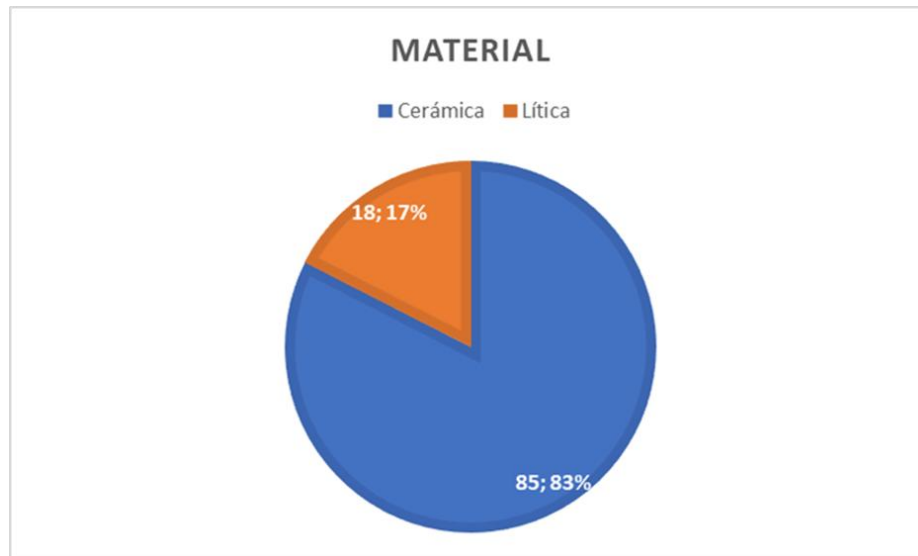
#### 8.2.4. Selección de piezas

Gracias a la variedad de artefactos disponibles en el laboratorio de San Andrés Semetabaj (SAS), se decidió crear dos muestrarios. El primero incluye figurillas, vasijas y objetos líticos que fueron hallados en el sitio arqueológico entre los años 2016 y 2022, teniendo un total de 45 piezas. Este primer muestrario fue organizado a partir de las piezas especiales guardadas en el laboratorio y 5 piezas expuestas en el ecomuseo, como una dona de piedra verde, vasijas, figurillas, un sello, etc. El segundo Muestrario consta únicamente de tiestos cerámicos ubicados en el laboratorio de SAS, con el propósito de realizar uno exclusivamente de la cerámica hallada en el sitio. Estos están ordenados desde los más antiguos, datados del Preclásico Temprano, hasta los más tardíos, datados del Clásico Tardío. De estos, uno pertenece al Preclásico Temprano, cuatro al Preclásico Medio, treinta y ocho al Clásico Temprano, quince al Clásico Tardío y veintiséis no se logró determinar su periodo, dando un total de 76 piezas en este muestrario (Gráfica 1).



Gráfica 1. Cronología del muestrario cerámico de SAS.

De los ciento veinte un artefacto seleccionado para ambos muestrarios, ciento tres son de material cerámico y dieciocho de material lítico (Gráfica 2). El material lítico incluye piedra verde, obsidiana y fragmentos líticos encontrados en la recolección de superficie del año 2023. El material cerámico está compuesto por vasijas completas, en su mayoría restauradas, y fragmentos que serán clasificados para mostrar su tipo de engobe y otros datos relevantes que contribuirán a la exposición de los modelos 3D de cada pieza seleccionada.



*Gráfica 2. Tipo de materiales seleccionados para los muestrarios*

### **8.2.5. Espacios de trabajo**

El proceso de documentación digital mediante fotogrametría y escaneo tridimensional se implementó en dos locaciones estratégicas. La primera fase de trabajo se desarrolló en las instalaciones del ecomuseo localizado en el municipio de San Andrés Semetabaj (SAS), donde se ejecutó con éxito la captura digital de las seis piezas arqueológicas principales que conforman la exhibición de dicho recinto (Figura 18).



Figura 18. Área de trabajo en el ecomuseo de San Andrés Semetabaj  
(Fotografía por: Ernesto Arredondo)

El resto del proceso se realizó en el laboratorio de SAS, donde se empleó equipo especializado para la fotogrametría: una cámara Canon T7 del Departamento de Arqueología de la Universidad del Valle de Guatemala, complementada con una caja de luz para iluminación uniforme, una base giratoria automática para capturar todos los ángulos del objeto, fondo intercambiable negro y blanco para optimizar el contraste, un trípode estabilizador y una tableta Samsung S7+ con un procesador Snapdragon 865+, aplicaciones de control remoto en dispositivos iPhone y Samsung, para agilizar la captura con la cámara Canon T7 se utilizaron dos memorias SD de 32 GB que fueron exportadas posteriormente a un disco duro externo (Figura 19). Para el escaneo tridimensional se utilizó el escáner EinScan Pro, perteneciente al mismo Departamento, el cual requirió el uso exclusivo de una computadora portátil Acer Nitro 7 con el software especializado *EXScan* (el cual es proporcionado por el fabricante del escáner para su operación). Como se aprecia en la Figura 19, esta configuración permitió ejecutar de manera simultánea tanto en fotogrametría como el escaneo tridimensional, optimizando así el tiempo de captura digital.



*Figura 19. Área de trabajo en el laboratorio de SAS (Fotografía por: Ernesto Arredondo)*

## 9. Análisis

### 9.1. Artefactos y procesos de digitalización

El presente análisis tiene como objetivo examinar un conjunto representativo de piezas arqueológicas digitalizadas mediante técnicas de fotogrametría y escaneo 3D, seleccionadas por su capacidad para ilustrar los rasgos morfológicos, tecnológicos y decorativos característicos de los materiales estudiados en este proyecto. A través de su estudio, se busca:

1. **Identificar patrones comunes** en la manufactura, uso y conservación de los artefactos, reflejados en sus modelos digitales.
2. **Evaluar las soluciones técnicas** implementadas para superar los desafíos documentados durante el proceso de digitalización (reflectancia, geometría compleja, escala reducida).
3. **Sistematizar las mejores prácticas** derivadas de la experiencia acumulada, optimizando los protocolos para futuros trabajos con materiales similares.

A continuación, se presentan dos secciones que corresponden a los tipos de muestrarios creados para este estudio. El primero corresponde al muestrario especial, el cual consta de 45 artefactos y el segundo corresponde al muestrario de tiestos, el cual comprende un total de 76 tiestos.

### 9.1.1. Muestrario especial de figurillas, vasijas y lítica

#### 1. SAS-M12-154-4

- **Tipo de Artefacto:** piedra dona (objeto lítico)
- **Material:** piedra verde (mica)
- **Estado de Conservación:** buen estado
- **Ubicación:** exhibido en el ecomuseo de SAS
- **Tiempo de generación de Modelo 3D:** 3 hrs y 30 min

El artefacto lítico en forma de dona (comúnmente denominado "piedra verde") fue documentado mediante técnicas de fotogrametría digital. Este enfoque metodológico se seleccionó debido a las limitaciones que presentan los escáneres 3D convencionales, como el *EinScan Pro* utilizado en este estudio, para capturar superficies altamente reflectantes. Las propiedades ópticas de este tipo de materiales generan distorsiones en la nube de puntos durante el escaneo láser, lo que dificulta la obtención de modelos tridimensionales precisos mediante dicha tecnología. La fotogrametría representa una metodología avanzada que puede acompañar el registro fotográfico tradicional en contextos arqueológicos. Sin embargo, su aplicación en artefactos con superficies reflectantes y morfologías circulares presenta desafíos técnicos (Figura 20), particularmente en la interpretación algorítmica del software, como se evidenció en el procesamiento con *Agisoft Metashape*.



Figura 12. Piedra dona SAS-M12-154-4 en el proceso de fotogrametría (Fotografía por: Diego López)

## 2. Vasija 1, Unidad SAS 144-4

- **Tipo de Artefacto:** cuenco trípode con decoración modelada en efigie (posiblemente zoomorfa, con rasgos de mono)
- **Material:** cerámica con engobe pulido y decoración Usulután (Alvarado, 2015:161)
- **Periodo Cultural:** Probablemente del Preclásico Tardío, asociado a Kaminaljuyú fase Verbena (Ávalos 2019)
- **Estado de Conservación:** restaurada, con 22 fragmentos y algunas áreas faltantes
- **Ubicación:** exhibido en el Ecomuseo de SAS
- **Tiempo de generación de Modelo 3D:** 5 hrs

La pasta es de color rosado pálido con núcleo gris, con una cocción medianadura y una textura mediana fina. Tiene engobe pulido con decoración Usulután, la cual consiste en líneas paralelas de color naranja pálido en juegos cruzados que cubre la vasija sobre el interior y exterior (Alvarado, 2015:161). La vasija tiene una silueta compuesta, con una pared inferior del cuerpo recta-divergente, la superior es curva-divergente hacia un borde vertical con labio plano y la base es plana con cuatro soportes que hacen alusión a garras (Figura 21). De frente consta de una cara de animal modelada, con forma de mono, aunque las cuatro patas parecen garras (Figura 22). La cola se ubica del lado opuesto a la cara y a cada lado de la cara tiene una fila con punzones. Según el informe de 2013-2014 la vasija puede provenir de Kaminaljuyu durante la fase Verbena

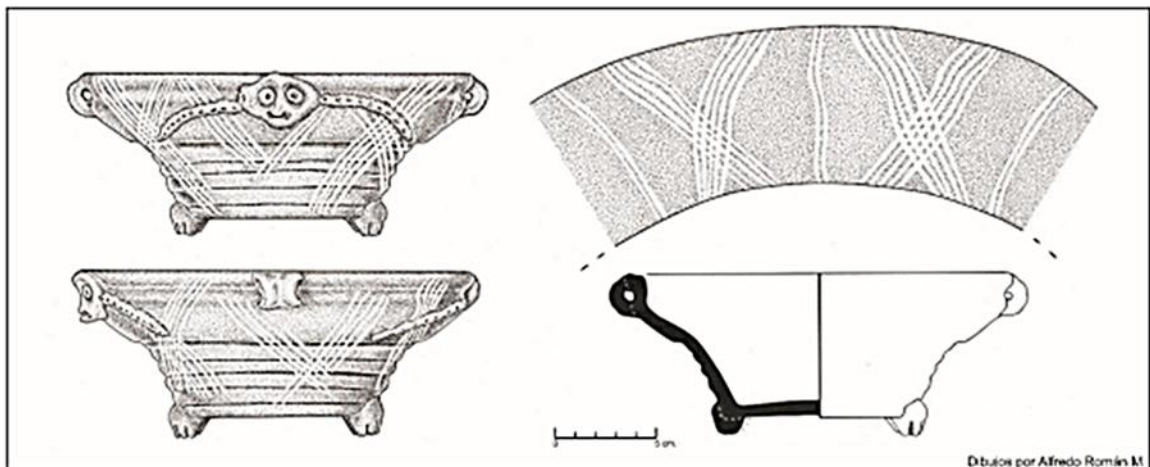


Figura 21. Reconstrucción realizada por Alfredo Román M. de la vasija 1 de la Unidad SAS-144-4 (Galindo 2015:162)

En el escaneo 3D, la curvatura invertida del borde horizontal (Figura 22) provocó ambigüedades en la interpretación espacial de los planos, comprometiendo la correcta orientación de las superficies y generando inconsistencias en el modelo resultante. Paralelamente, el proceso fotogramétrico enfrentó limitaciones análogas, donde el algoritmo de orientación automática mostró dificultades para diferenciar entre las superficies cóncavas y convexas de la pieza, particularmente en la transición entre los sectores interno y externo. Esta confusión algorítmica derivó en errores de correspondencia durante la generación de la nube de puntos, afectando consecuentemente la precisión topológica del modelo final.



Figura 13. Vista desde el proceso de fotogrametría de la Vasija 1, Unidad SAS 144-4 (Fotografía por: Diego López)

### 3. Vasija 2, Unidad SAS-144-4

- **Tipo de Artefacto:** cuenco apachado con modelado en efígie
- **Material:** cerámica con engobe naranja pulido y decoración Usulután (Alvarado, 2015;163)
- **Periodo Cultural:** preclásico Tardío (Contemporánea a la Vasija 1)
- **Estado de Conservación:** restaurada, con algunas piezas faltantes
- **Ubicación:** exhibido en el Ecomuseo de SAS
- **Tiempo de generación de Modelo 3D:** 4 hrs y 30 min

Tiene un cuello vertical y bajo, tiene una base levemente recurvada, sostenida por cuatro soportes pequeños en forma de botón (Alvarado, 2015;163). En uno de los lados tiene una cabeza viendo hacia arriba con los ojos y boca cerrados, tiene una tira de “cuentas” o bolitas alrededor de la cara. Los brazos y piernas en los lados están moldeados de forma rudimentaria, pertenece al mismo periodo de la Vasija 1 de la misma unidad (Figura 23).



Figura 14. Vista de perfil de la vasija 2, Unidad SAS-144-4 en proceso de fotogrametría (Fotografía de: Diego López)

El cuenco generó dos problemas principales durante el proceso de escaneo 3D. El primero consistió en la preservación de la textura superficial. Dado que el objeto presenta

propiedades reflectantes y colores brillantes, el escáner 3D registró áreas oscuras o distorsionadas en las zonas más reflectivas, lo que afectó la calidad de la digitalización. El segundo problema estuvo relacionado con las dimensiones y la morfología de la pieza. Debido a que el cántaro excedía los límites de la base giratoria del escáner, ciertas secciones, como el rostro, las manos y los brazos, no pudieron capturarse con precisión, lo que resultó en una representación incompleta del modelo 3D.

#### 4. Vasija 5, Unidad SAS-149-4

- **Tipo de Artefacto:** cántaro Semetabaj Rojo
- **Material:** cerámica pasta café hacia rojizo, común del área del Lago de Atitlán y forma parte del inventario local (Alvarado, 2015;166)
- **Periodo Cultural:** preclásico Tardío (Contemporánea a la Vasija 1)
- **Estado de Conservación:** restaurada, con algunas piezas faltantes
- **Ubicación:** exhibido en el Ecomuseo de SAS
- **Tiempo de generación de Modelo 3D:** 4 hrs y 30 min

La vasija en forma de zapato (Figura 24) presentó problemáticas similares a los casos anteriores, particularmente en cuanto a orientación espacial y reflectancia superficial. Sin embargo, su engobe café con pigmentaciones rojizas introdujo complicaciones adicionales que requirieron un enfoque metodológico distinto. El análisis técnico determinó que el procesamiento convencional en *Photoshop* (efectivo para piezas con reflectancia homogénea) resultaba insuficiente para este caso específico debido a:

- **Variabilidad cromática:** la combinación de tonos cafés y rojizos generaba inconsistencias en la detección automática de puntos clave
- **Reflectancia diferencial:** distintos niveles de reflectancia según los componentes minerales del engobe
- **Complejidad geométrica:** la forma irregular dificultaba la aplicación de correcciones estandarizadas



Figura 15. Vista de la vasija 5, Unidad SAS-149-4 durante el proceso de fotogrametría (Fotografía por: Diego López)

## 5. Vasija 3, Unidad SAS-144-4

- **Tipo de Artefacto:** vaso Kaminaljuyu Café-Negro Inciso Fino
- **Material:** cerámica con engobe y pasa color Café-Negro
- **Periodo Cultural:** preclásico Tardío (Contemporánea a la Vasija 1)
- **Estado de Conservación:** restaurado, con algunas piezas faltantes
- **Ubicación:** exhibido en el Ecomuseo de SAS
- **Tiempo de generación de Modelo 3D:** 5 hrs

El vaso tiene una pared vertical, curvándose hacia la base plana, el interior de la base está muy poco engrosada en el centro. Es una forma muy común en la Tumba I de Kaminaljuyu de la fase Verbena descritas por Shook y Kidder en 1952 (Alvarado, 2015;163). El vaso presentó múltiples complicaciones durante el proceso de modelado en *Agisoft Metashape* (Figura 25). El principal desafío radicó en la orientación automática, la cual no se completó de manera satisfactoria debido a las características geométricas del objeto: una pared completamente vertical y un borde recto. Estas condiciones dificultaron el reconocimiento de puntos de referencia por parte del software, lo que requirió la implementación de una orientación manual mediante el marcado de puntos de control. Al igual que el problema del reflejo generado por el engobe, impidió un modelo confiable.



Figura 16. Vista de la vasija 3, Unidad SAS-144-4 durante el proceso de fotogrametría (Fotografía por: Diego López)

## 6. Vasija 4, Unidad SAS-144-4

- **Tipo de Artefacto:** cuenco apachado con pasta café-rojiza a café oscura
- **Material:** cerámica con engobe y pasa color Café-Negro
- **Periodo Cultural:** preclásico Tardío (Contemporánea a la Vasija 1)
- **Estado de Conservación:** restaurado, con algunas piezas faltantes
- **Ubicación:** exhibido en el Ecomuseo de SAS
- **Tiempo de generación de Modelo 3D:** 6 hrs

Cuenco apachado con pasta café-rojiza a café oscura (Figura 26), textura mediana fina y cocción mediana. El engobe es del mismo color de la pasta bien bruñido sin llegar a una textura suave. El cuerpo tiene forma globular, más ancho que alto con decoración de una banda incisa fina sobre el hombro. Proveniente de Kaminaljuyu y mismas características de la vasija 3, unidad SAS-144-4 (Alvarado, 2015;166). Debido a su morfología marcadamente curva con bordes curvo-convergentes de geometría convergente, presentó problemas significativos durante el proceso de digitalización. Estas características estructurales no solo replicaron las dificultades ya observadas en las vasijas 3 y 5, sino que también generaron nuevos desafíos técnicos. La superficie reflectante del engobe, con su tonalidad variable entre café-rojizo y café oscuro, requirió un procesamiento más riguroso de las imágenes en *Adobe Photoshop* para corregir distorsiones lumínicas y cromáticas.

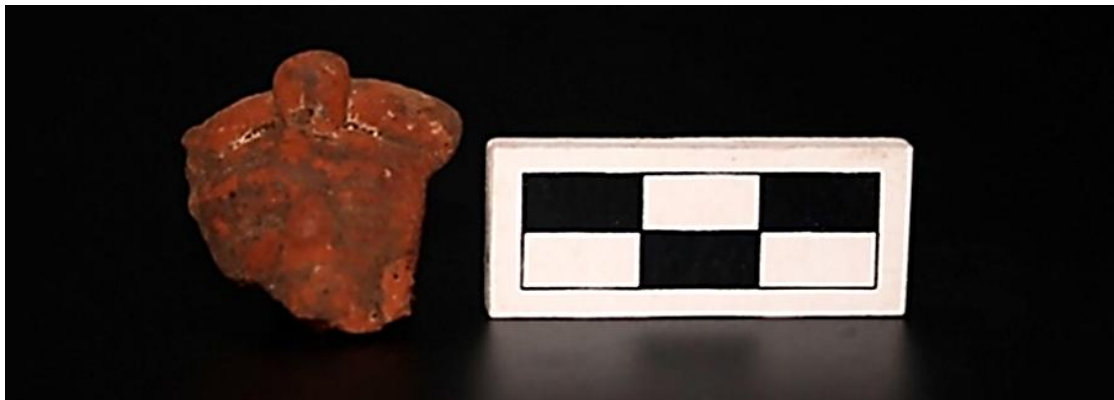


Figura 17. Vista desde arriba de la Vasija 4, Unidad SAS-144-4 en el proceso de fotogrametría (Fotografía por: Diego López)

## 7. SAS-172-4

- **Tipo de Artefacto:** fragmento de figurilla
- **Dimensiones:** 4.2x3.8x2.1 cm
- **Material:** pasta Café-amarillenta con inclusiones de cuarzo.
- **Periodo Cultural:** clásico Tardío (Alvarado, 2018).
- **Estado de Conservación:** fragmentada con partes faltantes.
- **Ubicación:** laboratorio de SAS
- **Tiempo de generación de Modelo 3D:** 45 min

La morfología reducida del artefacto presentó desafíos significativos durante el proceso de fotogrametría, particularmente en la alineación eficiente de las imágenes para la generación del modelo 3D. Las dimensiones limitadas del fragmento ( $4.2 \times 3.8 \times 2.1$  cm) dificultaron la captura óptima de detalles superficiales, lo que inicialmente resultó en una reconstrucción digital con resolución insuficiente (Figura 27). Para solucionar los problemas presentados con las fotos originales del 2022, en el año 2023 se tomaron fotografías macro especializadas (resolución 0.03 mm/píxel) con iluminación polarizada, superando las limitaciones técnicas del registro inicial. También se realizó un escaneo 3D donde se requirió el diseño de una base inclinada personalizada (ángulo  $35^\circ$ ) para garantizar la captura completa de la geometría. Esta solución técnica fue necesaria ya que la posición convencional (acostado) generaba áreas ciegas en el escaneo debido a la curvatura característica del fragmento.



*Figura 27. Vista frontal del fragmento de figurilla SAS-172-4 (Fotografía por: Diego López)*

## 8. SAS-165-2

- **Tipo de Artefacto:** lítico
- **Material:** piedra verde
- **Estado de Conservación:** buen estado
- **Ubicación:** laboratorio de SAS
- **Tiempo de generación de Modelo 3D:** fallido

La documentación digital de piezas arqueológicas miniaturizadas continúa presentando dificultades metodológicas significativas, particularmente cuando se trata de materiales líticos con superficies reflectantes. En el caso específico de esta pieza de piedra verde, se enfrentaron limitaciones técnicas insuperables: el escáner 3D no logró reconocer el objeto debido a su tamaño reducido, mientras que la fotogrametría convencional resultó igualmente inefectiva por la combinación de tres factores críticos (Figura 28): Las dimensiones mínimas del artefacto, su geometría particular y las propiedades reflectantes de su superficie pulida.



Figura 18. Proceso de fotogrametría de la pieza SAS-165-2 (Fotografía por Diego López)

Esta situación problemática evidencia la necesidad de desarrollar protocolos especializados para la captura digital de micro artefactos líticos, particularmente cuando presentan características superficiales que generan interferencias en los sistemas de digitalización convencionales. Pero también el trabajo realizado no es en vano, las fotos

2D quedan como registro y se pueden usar para mejoras que los software utilizados o nuevos puedan tener en un futuro, aparte de demostrar que el registro tradicional con fotografías sigue siendo esencial (Figura 29). Este conjunto de imágenes constituye un archivo digital primario que, lejos de ser descartable, permanece disponible para ser reprocesado con futuras actualizaciones de software capaces de interpretar con mayor eficiencia las superficies reflectantes. De ese modo, se asegura que la información morfológica y textural del artefacto no se pierda ante las limitaciones tecnológicas actuales, permitiendo una reinterpretación digital más precisa a medida que las herramientas informáticas evolucionen.

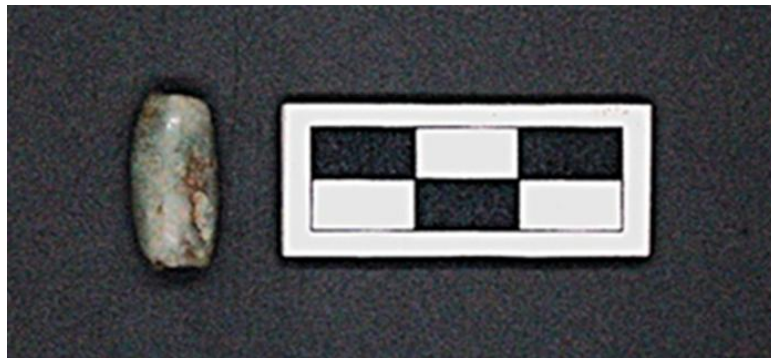


Figura 29. Vista de pájaro de la pieza (Fotografía por: Diego López)

## 9. SAS-161-2

- **Tipo de Artefacto:** lítico con forma ovoide
- **Material:** basalto
- **Estado de Conservación:** buen estado.
- **Ubicación:** laboratorio de SAS
- **Tiempo de generación de Modelo 3D:** 50 min

Los objetos cilíndricos presentan dificultades particulares para su documentación digital (Figura 30), aunque estas fueron resueltas satisfactoriamente mediante escaneo 3D. Sin embargo, al trasladar la metodología a materiales líticos, surgen nuevos retos técnicos. Cuando la fotogrametría no genera resultados óptimos (ya sea por modelos deficientes o tiempos de procesamiento excesivos), la integración con escaneo 3D se vuelve inevitable. En estos casos, para un registro rápido y eficiente, se recomienda emplear el escaneo 3D con difusores de luz, los cuales mitigan significativamente los artefactos en la malla (como superficies reflejantes) y mejoran la calidad del modelo final.



Figura 30. Vista de pájaro del artefacto de lítica SAS-161-2 (Fotografía por: Diego López)

## 10. SAS-160-7

- **Tipo de Artefacto:** fragmento cerámico zoomorfo
- **Material:** cerámico.
- **Estado de Conservación:** buen estado. Fragmentado, con gran parte faltante
- **Ubicación:** laboratorio de SAS
- **Tiempo de generación de Modelo 3D:** 35 min

Como se ha podido apreciar, el proceso de fotogrametría presenta desafíos técnicos significativos cuando se aplica a piezas de reducidas dimensiones, particularmente en la reconstrucción de áreas con detalles complejos o cavidades (Figura 31). En el caso específico de esta pieza, el software fotogramétrico mostró limitaciones notables al interpretar la geometría del orificio presente en lo que es el ojo, generando tanto deformaciones en la malla 3D como artefactos digitales (representados como áreas negras en el modelo final) que distorsionan la representación fiel del artefacto.

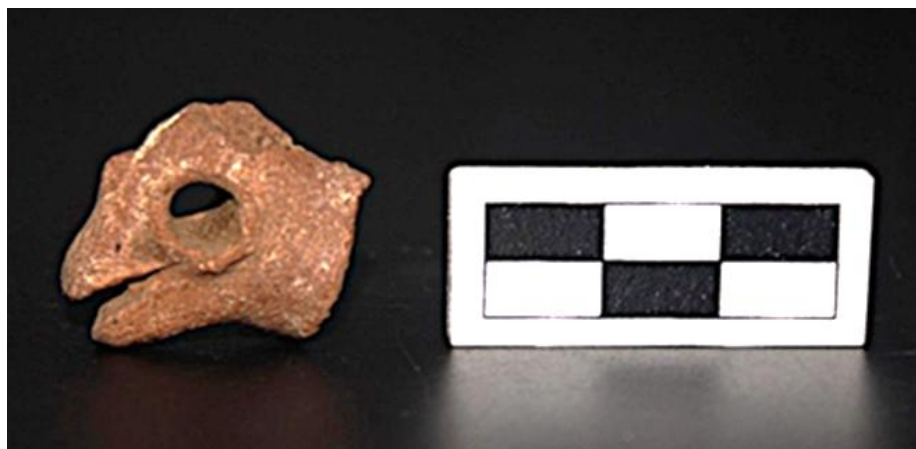


Figura 19. Visa de lado del fragmento SAS-160-7, donde se puede apreciar su ojo y su estructura que parece como un pico abierto

## 11. SAS-178-3

- **Tipo de Artefacto:** fragmento cerámico circular con protuberancia central (posible orejera o adorno)
- **Material:** cerámico
- **Estado de Conservación:** buen estado. Fragmento con parte faltante
- **Ubicación:** laboratorio de SAS
- **Tiempo de generación de Modelo 3D:** 30 min

La geometría circular del objeto, combinada con su relieve central, generó sombras pronunciadas bajo condiciones de iluminación estándar en la fotografía (Figura 32). Estas variaciones lumínicas provocaron problemas en el proceso de fotogrametría, ya que las zonas con sombras presentaron una pérdida de detalle y distorsiones en la textura, resultando en áreas oscuras y deformaciones en el modelo reconstruido.

Viendo el problema generado por las fotos de 2022, en 2023 se solucionó este problema, se tomaron múltiples fotografías desde diferentes ángulos y posiciones, optimizando la captura de datos. Sin embargo, las limitaciones inherentes de la fotogrametría en condiciones de alto contraste lumínico persistieron. En contraste, el escaneo 3D mostró mayor eficacia al minimizar el impacto de las sombras, proporcionando una representación más precisa y consistente de la superficie.

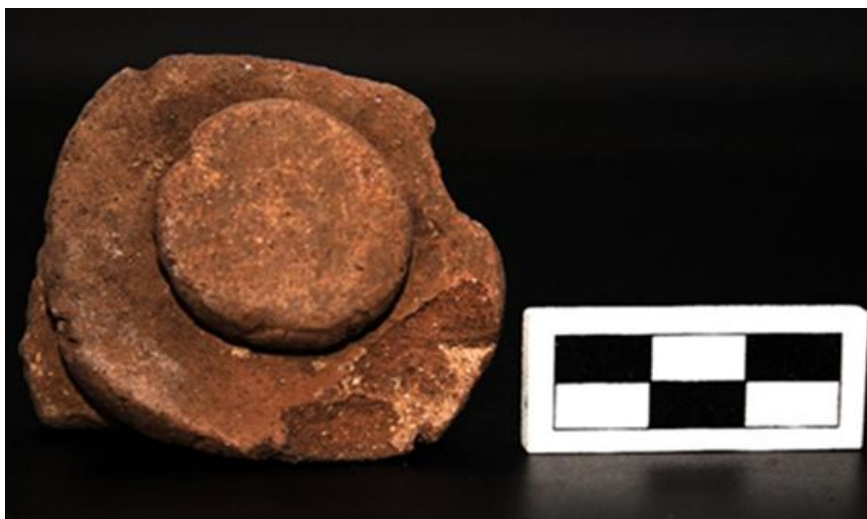


Figura 32. Vista de frente del artefacto SAS-178-3 (Fotografía por: Diego López)

## 12. SAS-194-04

- **Tipo de Artefacto:** fragmento cerámico Zoomorfo
- **Material:** cerámico
- **Estado de Conservación:** buen estado. Fragmento con parte faltante
- **Ubicación:** laboratorio de SAS
- **Tiempo de generación de Modelo 3D:** 1 hrs y 35 minutos (fotogrametría) y 40 min (scanner 3D)

El escaneo 3D demostró ser una técnica efectiva para capturar con precisión la geometría compleja. Esta metodología permitió documentar adecuadamente los detalles morfológicos y las proporciones exactas del objeto, superando las dificultades que normalmente plantean este tipo de piezas arqueológicas miniaturizadas (Figura 33). Los resultados obtenidos confirman que el escaneo 3D puede aplicarse exitosamente en artefactos de reducidas dimensiones cuando se cuenta con equipos de suficiente resolución y precisión.

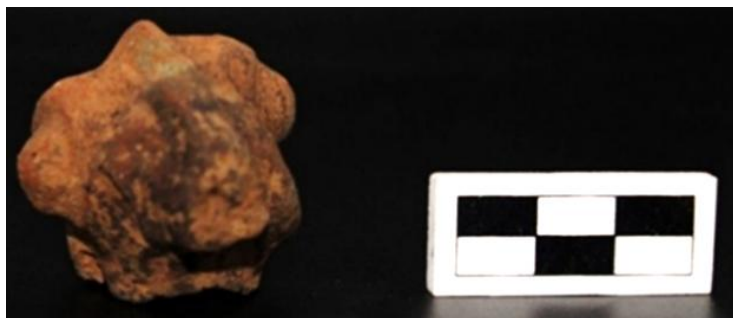


Figura 33. Perspectiva frontal de la pieza SAS-194-04 (Fotografía por: Diego López).

El estudio comparativo evidenció que, si bien la fotogrametría fue empleada en el proceso de digitalización, el escaneo 3D demostró ventajas significativas al generar resultados más precisos en la captura geométrica, más completos en la cobertura superficial y considerablemente más rápidos en el tiempo de procesamiento. Esta técnica logró registrar eficientemente las complejas curvaturas y detalles morfológicos característicos de estas piezas cerámicas de pequeñas dimensiones. Los hallazgos sugieren que el escaneo 3D constituye una solución técnicamente superior para la documentación de objetos con

geometrías intrincadas, confirmando su aplicabilidad incluso en artefactos de reducido tamaño como las figurillas cerámicas analizadas.



*Figura 34. Perspectiva de perfil de la pieza SAS-194-04 (Fotografía por: Diego López)*

### 13. SAS-193-7

- **Tipo de Artefacto:** navaja prismática
- **Material:** lítica (obsidiana)
- **Estado de Conservación:** buen estado
- **Ubicación:** laboratorio de SAS
- **Tiempo de generación de Modelo 3D:** 5 hrs y 35 min (fotogrametría) y fallido (scanner 3D)

La obsidiana es un material que presenta propiedades únicas, combinando reflectancia y translucidez (Figura 35). Su apariencia física depende de su pureza y composición química, lo que puede conferirle características reflejantes. Por lo mismo, la digitalización de artefactos de obsidiana mediante escaneo 3D resultó problemática. Los puntos láser generados por la máquina no se reflejaban en su totalidad, y la generación de texturas dejaba vacíos en las zonas translúcidas, afectando la calidad del modelo final.



Figura 20. Vista de frente de la navaja prismática, durante el proceso de fotogrametría (Fotografía por: Diego López)

#### 14. SAS-187-11

- **Tipo de Artefacto:** sello cilíndrico
- **Material:** cerámico
- **Estado de Conservación:** buen estado
- **Ubicación:** laboratorio de SAS
- **Tiempo de generación de Modelo 3D:** 2 hrs y 10 minutos (fotogrametría) y 1 hrs (scanner 3D)

Los objetos cilíndricos (Figura 36) representan un desafío particular para la fotogrametría debido a la necesidad de un extenso procesamiento manual, que incluye la colocación de puntos de control y un tiempo considerable de cálculo. En contraste, el escaneo 3D demuestra ser una alternativa técnicamente superior, eliminando la dependencia de puntos de control manuales y reduciendo el tiempo de procesamiento a menos tiempo para obtener resultados de calidad comparable o superior. Está marcada diferencia en eficiencia operativa (una reducción del 90% en tiempo de procesamiento) posiciona al escaneo 3D como la metodología preferible para la documentación de piezas con geometrías cilíndricas, particularmente cuando se requiere agilidad en el flujo de trabajo sin comprometer la precisión dimensional.



Figura 36. Vista del sello SAS-187-11 (Fotografía por: Diego López)

## 15. SAS-195-3

- **Tipo de Artefacto:** cuenco y lítica
- **Material:** cerámico y obsidiana
- **Estado de Conservación:** buen estado, con partes faltantes
- **Ubicación:** laboratorio de SAS
- **Tiempo de generación de Modelo 3D:** 3 hrs y 20 min (fotogrametría) y fallido (scanner 3D)

A diferencia de las piezas exhibidas en el Ecomuseo, este cuenco presenta una fractura considerable, lo que afectó la captura de datos tanto en su interior como en el exterior durante el escaneo 3D (Figura 37). Este problema se agravó por la presencia de engobe, cuya textura y reflectividad irregular interfirieron con la precisión del escáner. Además, la forma curva del objeto ocasionó que no se mantuviera estable en la base giratoria sin apoyo manual, lo que generó imperfecciones en el modelo final. Debido a estas limitaciones, el escaneo 3D resultó poco viable para este caso específico. Como alternativa, se optó por generar el modelo 3D mediante fotogrametría en *Metashape*, obteniendo resultados aceptables desde el primer intento, a pesar de las dificultades iniciales.



Figura 21. Vista de frente del cuenco SAS-195-3 y navaja prismática encontrada dentro del cuenco (Fotografía por: Diego López)

## 16. SAS-215-9

- **Tipo de Artefacto:** figurilla antropomorfa
- **Material:** cerámico
- **Estado de Conservación:** buen estado, con partes faltantes
- **Ubicación:** laboratorio de SAS
- **Tiempo de generación de Modelo 3D:** 2 hrs y 30 min c/u (fotogrametría) y 50 min c/u (scanner 3D)

A diferencia de otras piezas analizadas, esta figurilla se encontraba fracturada, resultando en dos fragmentos claramente diferenciables (lado derecho e izquierdo) (Figura 38). Esta particularidad permitió evaluar comparativamente la eficacia de ambas técnicas de digitalización en el registro de artefactos fragmentados y separados para restaurarlos digitalmente. El proceso de escaneo demostró una notable eficiencia al capturar ambas mitades de manera independiente y posteriormente unirlos digitalmente dentro del propio software *EXScan*. La precisión geométrica del escáner facilitó la alineación automática de los fragmentos, conservando la integridad morfológica de la pieza original. Para la fotogrametría se generaron modelos separados de cada fragmento en *Agisoft Metashape*, los cuales fueron exportados a *Blender* para su unión manual.



Figura 22. Figurilla antropomorfa de la Unidad SAS-215-9  
(Fotografía por: Diego López)

## 17. SAS-201-4

- **Tipo de Artefacto:** fragmentada de mano de moler
- **Material:** lítica
- **Estado de Conservación:** buen estado
- **Ubicación:** laboratorio de SAS
- **Tiempo de generación de Modelo 3D:** 4 hrs y 30 min c/u (fotogrametría) y 1 hr (scanner 3D)

Para artefactos líticos de dimensiones considerables, tanto la fotogrametría como el escaneo 3D constituyen metodologías efectivas, sin embargo, hay que considerar que cuenta con un límite de tamaño en el escáner utilizado, debido a la base giratoria (Figura 39). Se debe considerar que el proceso de escaneo aumentará al tener que escanear en varias ocasiones varias partes y tener que unirlos posteriormente.



Figura 23. Fragmento de mano de moler SAS-201-4 en proceso de fotogrametría (Fotografía por: Diego López)

### 9.1.2. Muestrario especial cerámico

El muestrario tiene como objetivo que investigadores de diferentes partes del país y del mundo puedan tener acceso a tiestos cerámicos de diferentes estilos para conocer un poco de lo que se recuperó en Semetabaj durante los años de excavación 2016-2022. En la Tabla 1 se presenta el listado detallado de los tipos que se incluyeron en el muestrario, así como la cantidad por tipo. En total se lograron registrar 76 tiestos que comprenden el muestrario base para este estudio.

Tabla 1. Lista de cerámica incluida en el muestrario 2

<b>Tipo</b>	<b>Cantidad</b>
Naranja Glossy	1
Naranja	8
Negro pulido	3
Negro burdo	1
Negro	6
Santa Marta	6
Naranja Santa Marta	4
Café Rojizo	3
Naranja	5
Semestras Café	5
Café	5
Pasta roja	3
Café burdo	3
Esperanza flesh	3
Café naranja	5
Café naranja rosado	4
Café pulido	1
Amatle	1
Rojo	1

Semetabaj café	1
Gris amarillento	3
Xuc	1
Sin determinar (Preclásicos)	3

Aunque todos los detalles de los problemas ya fueron abordados en el muestrario anterior, este muestrario reveló un problema nuevo y esencial: las zonas marcadas donde se coloca el código del tiesto. Al utilizar normalmente esmalte para uñas, este ocasiona un grave problema de reflectancia, provocando que dicha zona presente distorsiones en la textura y la forma. Este problema será analizado en la siguiente sección.

## **9.2. Soluciones**

La digitalización tridimensional de artefactos arqueológicos exige un enfoque flexible y adaptativo, donde la selección de la técnica y el procesamiento posterior dependen de las características intrínsecas de cada pieza. En este capítulo se analizan comparativamente las soluciones aplicadas a los principales desafíos técnicos encontrados durante el registro de la colección de Semetabaj. Evaluando críticamente las ventajas y limitaciones de la fotogrametría y el escaneo 3D en el manejo de superficies reflectantes, geometrías complejas y piezas marcadas, presentando un conjunto de procedimientos validados que optimizan la fidelidad y eficiencia del registro digital.

### **9.2.1. Superficies reflectantes (piedra verde, cerámica con engobe pulido)**

Dentro de la categoría de superficies reflectantes, se agrupan aquellos artefactos cuya composición mineralógica o tratamiento de superficie genera propiedades especulares que dificultan el registro digital estándar. Observando que las piedras verdes, debido a la naturaleza de minerales como la mica o el jade, así como la cerámica que cuenta con engobe pulido y acabados brillantes, producen refracciones de luz que confunden los sensores ópticos y láser. Por consiguiente, estos materiales necesitan la aplicación de técnicas específicas que van más allá del escaneo directo, tales como control riguroso de la iluminación, el uso de marcadores físicos y protocolos de edición fotográfica previa. A

continuación, se presentan las soluciones técnicas implementadas para los artefactos que mostraron esta problemática.

### **1. SAS-M12-154-4**

Para optimizar los resultados en este objeto de piedra verde (Mica), se implementó un protocolo sistemático de captura que incluyó: (1) Cuatro series fotográficas angulares (Figura 37): toma de referencia principal a 30° y tres tomas complementarias a 70°, 290° y 330°; (2) Uso de una base giratoria automatizada; (3) implementación de marcadores artificiales mediante esferas de plastilina coloreada para garantizar puntos de referencia estables

#### **Ventajas del método empleado:**

- Mitigación de errores en superficies reflectantes
- Precisión en la reconstrucción de geometrías circulares
- Generación de datos compatibles con análisis cuantitativos

Tras la captura fotográfica, las imágenes fueron procesadas en *Adobe Photoshop* para optimizar su calidad mediante la reducción de ruido digital y el ajuste de parámetros lumínicos (iluminación, contraste y balance de blancos). Una vez editadas, las fotografías se clasificaron según su orientación espacial para mejor organización a la hora de trabajar con muchos artefactos y se importaron a *Agisoft Metashape*. En este software, se realizó la alineación inicial de las imágenes y la posterior generación del modelo 3D. Para garantizar la precisión del modelo, particularmente ante posibles fallas en los puntos de referencia de plastilina, se implementó un refuerzo metodológico consistente en la colocación manual de al menos cinco puntos de control distribuidos estratégicamente alrededor del objeto (Figura 40), asegurando así una reconstrucción tridimensional fiel a la geometría original del artefacto.

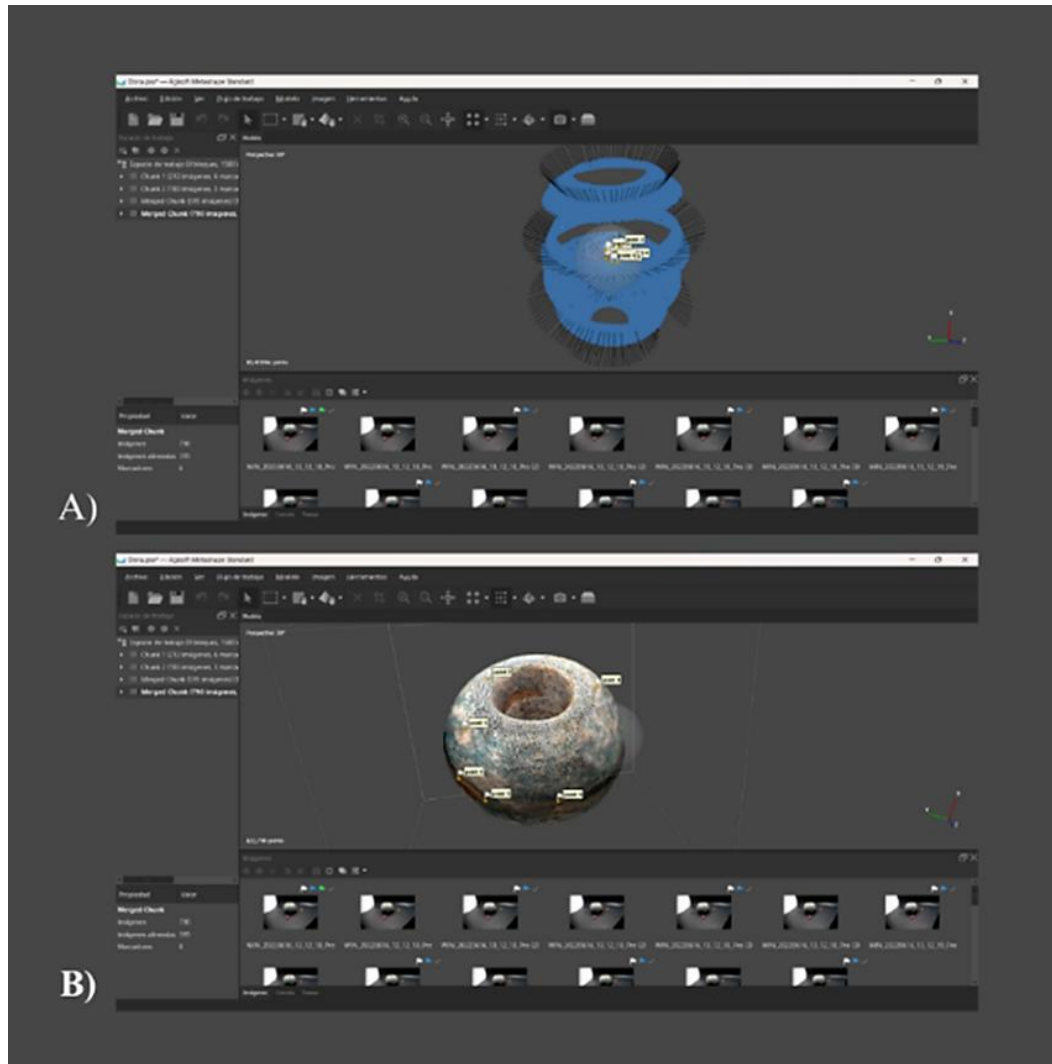


Figura 24. A) Proceso de orientación de las imágenes y generación de nube de puntos. B) Generación de nube de puntos densa y colocación de puntos de orientación digitales en Agisoft Metashape. (imagen por: Diego López)

Es importante considerar que los marcadores de plastilina utilizados como puntos de referencia pueden presentar limitaciones en su efectividad. Para garantizar una reconstrucción precisa, se implementó un protocolo de colocación manual de puntos de control dentro del software, mediante la selección de ubicaciones estratégicas en las imágenes y la asignación de puntos de referencia a través del menú contextual (clic derecho > "Agregar punto"), como se detalla en la Figura 40.

El proceso requiere un mínimo de cinco puntos de control distribuidos alrededor del objeto (Figura 41) para:

1. Establecer una orientación espacial adecuada
2. Generar una nube de puntos inicial precisa
3. Permitir la creación de una nube de puntos densa óptima
4. Facilitar el posterior texturizado dentro de la aplicación

Una vez completadas estas etapas, el modelo se exporta en formato OBJ para su posterior procesamiento en *Meshlab*, donde se realizarán ajustes y refinamientos adicionales.

**Consideraciones técnicas:**

- Se recomienda ubicar puntos en áreas con características distintivas
- La precisión en esta etapa determina la calidad del modelo final

**Flujo de trabajo:**

1. Orientación con puntos de control
2. Generación de nube de puntos
3. Texturizado (Figura 38a)
4. Exportación a OBJ
5. Procesamiento en *Meshlab* (Figura 38b)

Tras la generación de la nube de puntos densa, se procedió a aplicar el texturizado del modelo y su posterior exportación en formato OBJ. Para el refinamiento final, el modelo fue procesado en *Meshlab*, donde se implementaron técnicas de optimización que incluyeron: (1) Reducción controlada de la malla poligonal, (2) Ajuste y mejora de las texturas y (3) Preservación de los detalles geométricos esenciales.

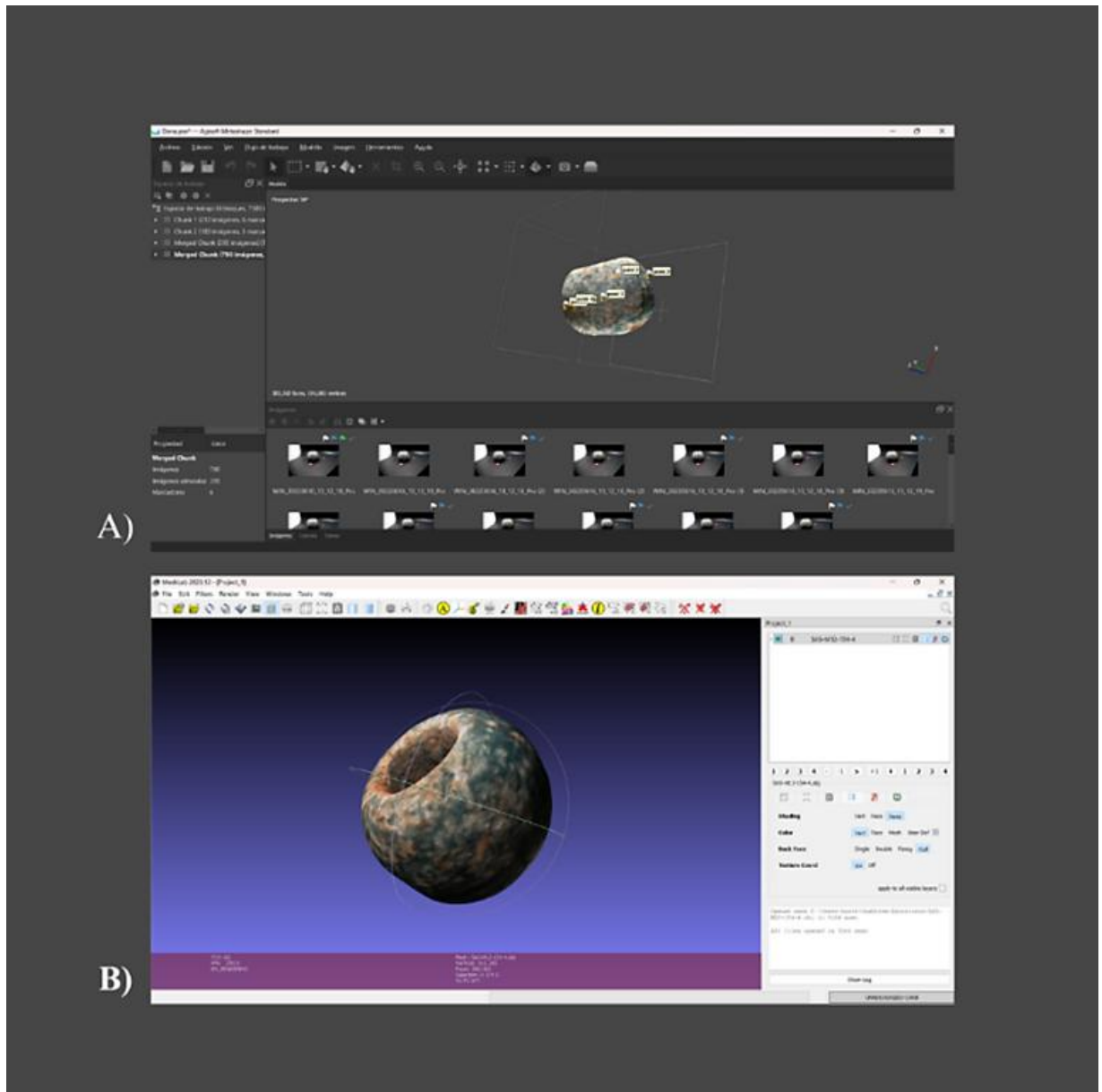


Figura 41. A) proceso de texturizado B) Proceso de edición en Meshlab (Imagen por: Diego López)

Este proceso de optimización permitió obtener un archivo significativamente más ligero (Figura 42), manteniendo simultáneamente la fidelidad geométrica del modelo original, la calidad visual de las texturas y la integridad topológica de la pieza.

**Parámetros clave de optimización:**

- Reducción de triángulos manteniendo >95% de precisión
- Compresión de texturas sin pérdida visible

- Conservación de bordes y características morfológicas

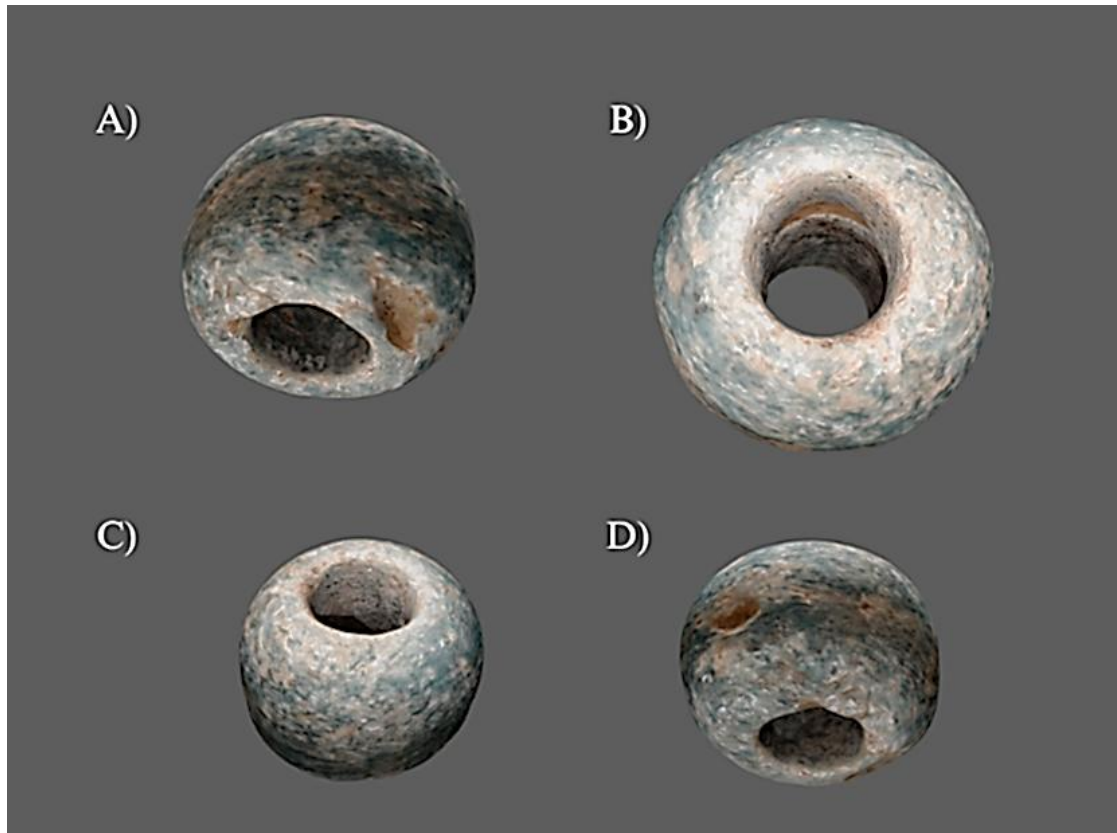


Figura 42. Diferentes vistas del modelo 3D final de la piedra dona SAS-M12-153-4 (Imagen por: Diego López)

Para la etapa final de visualización y difusión, el modelo se importó a *Blender* donde se realizó un proceso de renderizado profesional que permitió generar imágenes de alta calidad en múltiples perspectivas, adecuadas para su inclusión en informes técnicos y presentaciones académicas. Como parte del protocolo de documentación digital completo, se exportó el modelo en cuatro formatos estándar, garantizando así su compatibilidad con diversas aplicaciones de visualización, análisis y fabricación digital según los requerimientos específicos de cada caso de uso. Cada formato cuenta con características específicas:

1. **OBJ (*Object*)**: formato versátil que codifica la geometría mediante vértices, caras y normales, ideal para visualización y edición posterior en diversos softwares. Su

estructura poligonal permite representar tanto formas regulares como superficies libres.

2. **STL (*Stereo Lithography*)**: estándar industrial para impresión 3D que representa superficies mediante triangulación. Cada elemento queda definido por tres vértices y una normal, creando una malla continua donde los triángulos comparten vértices adyacentes.
3. **PLY (*Polygon File Format*)**: almacena no solo la geometría poligonal, sino también metadatos avanzados como:
  - Propiedades de color
  - Coordenadas UV para texturas
  - Niveles de transparencia, que lo hacen óptimo para análisis técnicos detallados.
4. **3MF (*3D Manufacturing Format*)**: Formato moderno para fabricación aditiva que encapsula:
  - Geometría completa
  - Especificaciones de materiales
  - Parámetros de impresión

## 2. SAS-193-7

Para superar el problema con el reflejo en esta pieza cerámica, se recurrió a la aplicación de talco para bebé antes del proceso de fotogramétrico. El registro consistió en dos hileras de fotografías (Figura 43) tomadas en un entorno controlado, bajo las siguientes consideraciones:

- Iluminación artificial, evitando la luz solar directa.
- Conexión de la caja de luz al destello de la cámara para minimizar reflejos.
- Uso de puntos de control en la base giratoria con plastilina.
- Orientación cuidadosa de las filas de fotos, con ángulos de 240° y 220° (Figura 43).

El proceso en *Metashape* siguió los pasos establecidos para los demás artefactos, logrando un modelo fiel al original (Figura 44), sin necesidad de alteraciones en *Blender*.



Figura 43. A) Nube de puntos. B) Nube de puntos densa. C) modelo 3D final

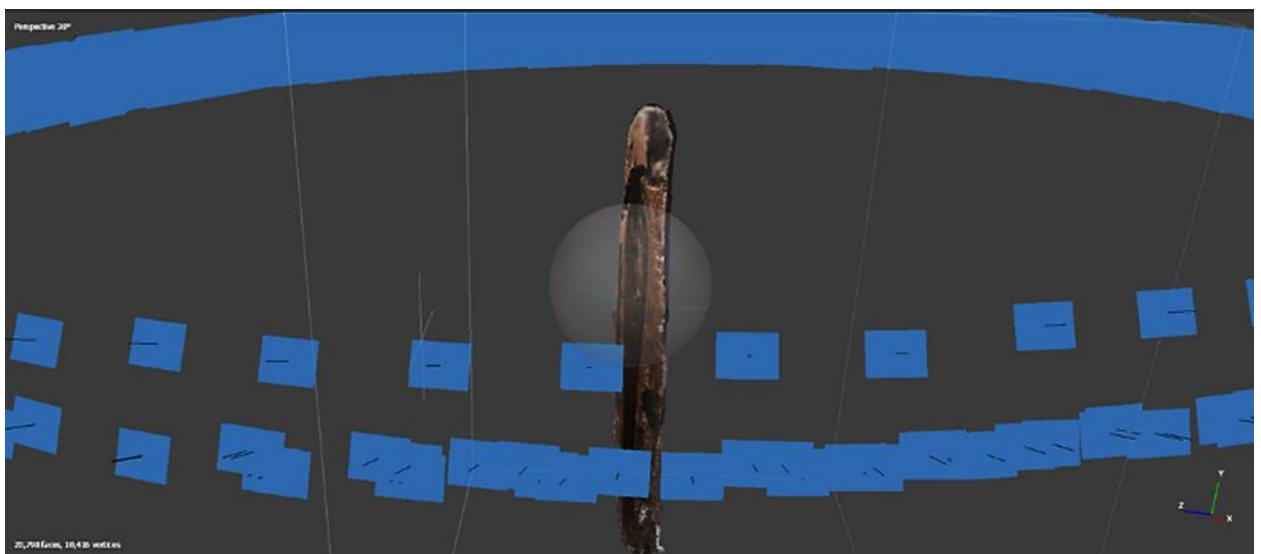


Figura 44. Muestra de orientación de las dos filas de fotos de la navaja prismática

### 3. SAS-172-4

Para objetos líticos con morfología triangular, tanto el escaneo 3D como la fotogrametría demostraron ser técnicas viables, aunque con diferencias significativas en los resultados obtenidos. En el caso de estudio presentado, la fotogrametría superó al escaneo 3D en la captura de detalles superficiales y texturas, logrando una representación de mayor fidelidad a pesar de utilizar un protocolo optimizado de sólo dos filas de fotografías (Figura 45).

Este resultado particular sugiere que, para piezas con esta geometría específica, la fotogrametría, incluso con una configuración mínima de captura, puede ofrecer ventajas cualitativas en la documentación de atributos superficiales. Mientras mantiene una eficiencia operativa notable, la efectividad de este enfoque simplificado plantea interesantes posibilidades para protocolos de documentación rápida en contextos donde se priorice el detalle textural sobre otros parámetros métricos (Figura 46).

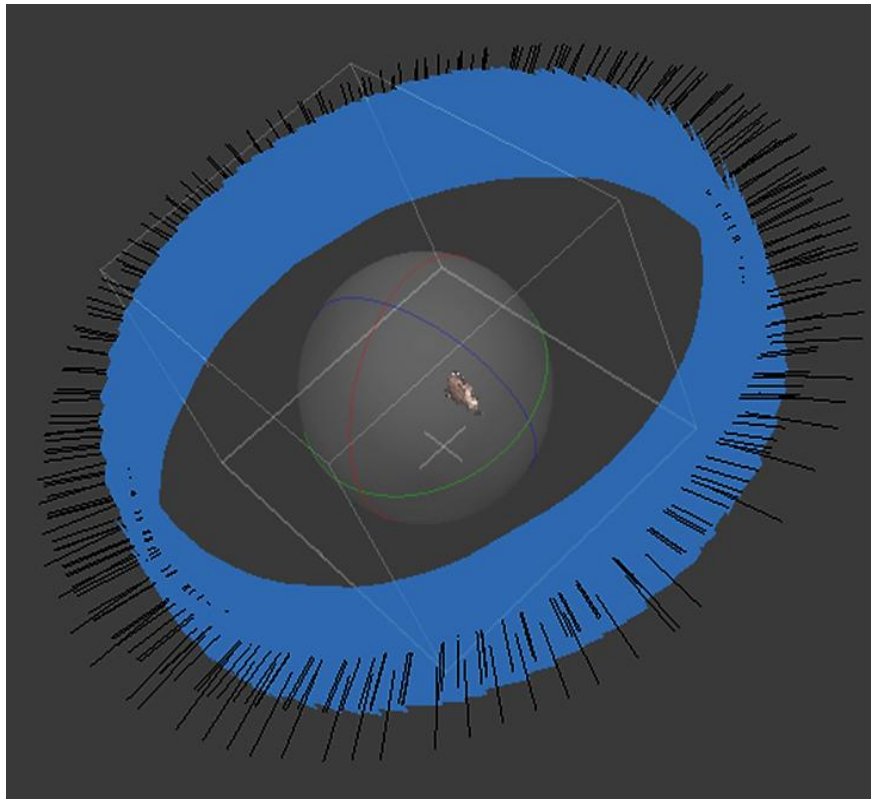


Figura 25. Proceso de orientación de las fotos en Agisoft Metashape, donde se observa las dos líneas de fotos utilizadas para realizar este modelo (Imagen por: Diego López)

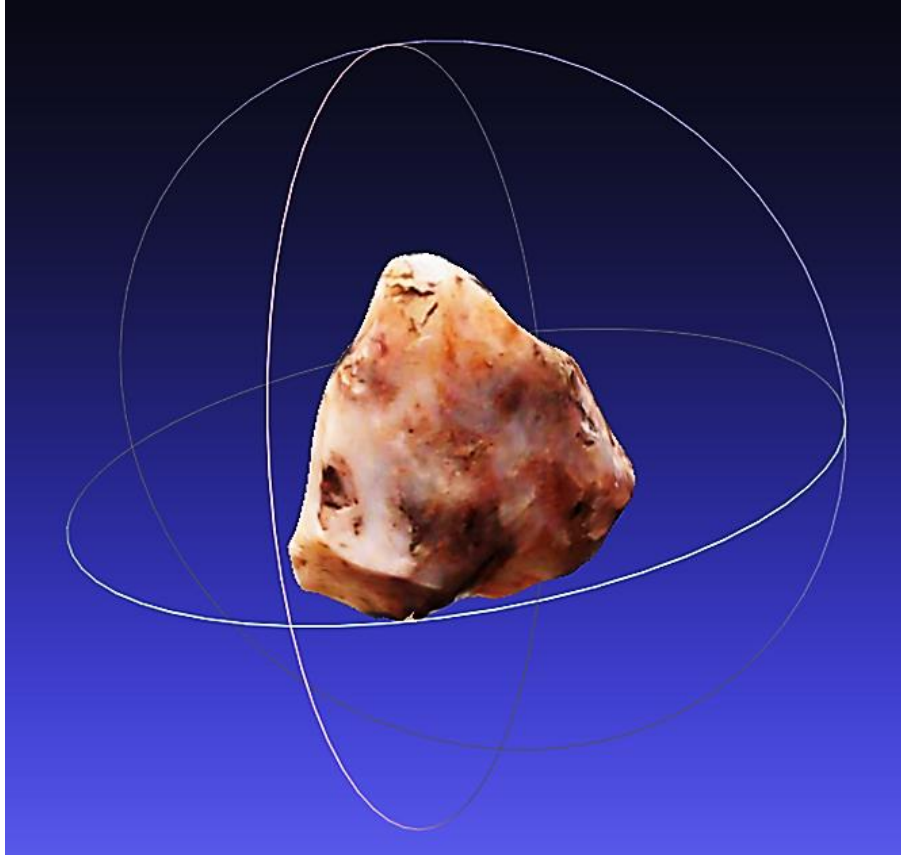


Figura 46. Vista del modelo 3D final

## 9.2.2. Geometrías complejas (vasijas)

### 4. Vasija 1, Unidad SAS 144-4

Ante los desafíos presentados por las características morfológicas y superficiales de la pieza, se implementó una estrategia de corrección basada en la experiencia previa con la piedra dona. El proceso combinó la colocación manual de cinco puntos de control en *Agisoft Metashape* (Figura 47) con un tratamiento previo de las imágenes en *Photoshop* para eliminar reflejos. Los puntos de referencia estratégicamente ubicados permitieron corregir automáticamente las discrepancias de orientación entre las secciones problemáticas, generando una nube de puntos confiable para el cuenco trípode.

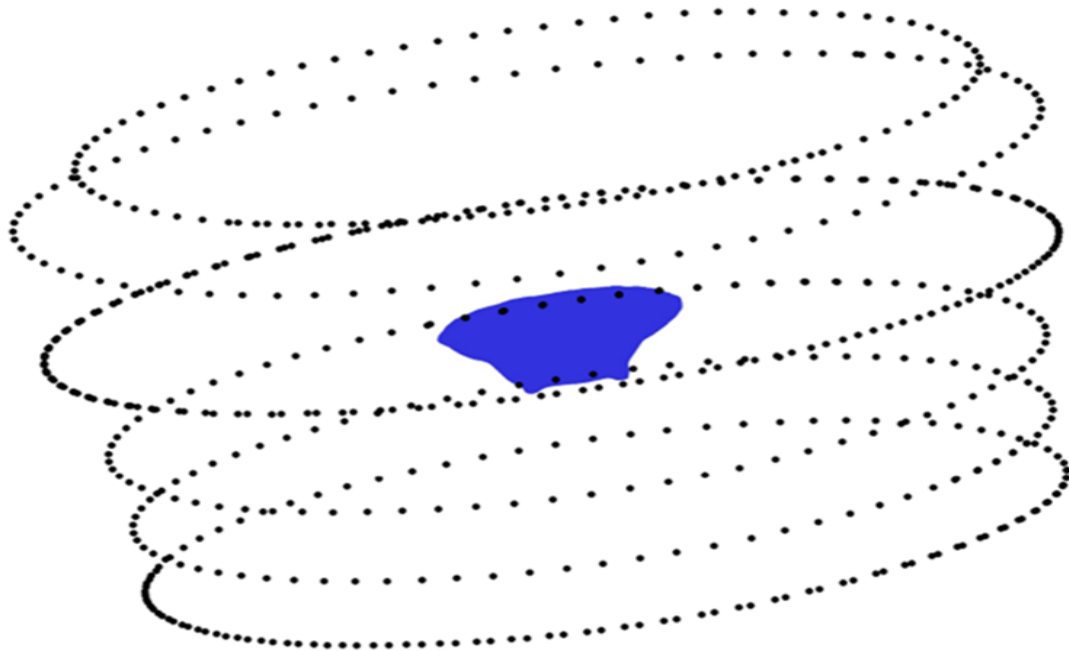


Figura 47. Datos de levantamiento de la nube de puntos y orientación de las fotos donde cada punto es una fotografía (Imagen por: Diego López)

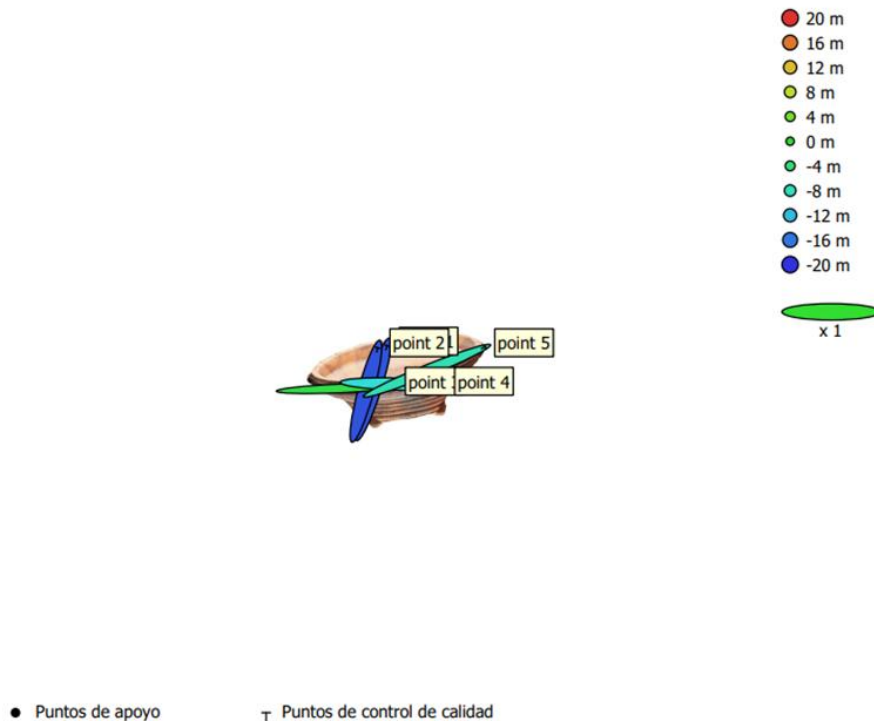


Figura 48. Posiciones de puntos de apoyo y estimaciones de errores. El color indica el error en Z mientras el tamaño y forma de la elipse representan el error en XY. Las posiciones estimadas de puntos de apoyo se marcan con puntos o cruces (Imagen por: Diego López)

El procesamiento fotográfico especializado, aplicado metódicamente según el protocolo desarrollado para el artefacto I, permitió minimizar los efectos de reflectancia del engobe mediante ajustes específicos en *Photoshop*. Esta intervención previa resultó fundamental para lograr una reconstrucción fotogramétrica precisa, resolviendo simultáneamente dos problemáticas clave: 1) las dificultades de orientación espacial y 2) las distorsiones por reflectancia superficial. El éxito metodológico se materializó en un modelo tridimensional de alta precisión (Figura 49) que cumple rigurosamente con los parámetros de documentación arqueológica digital. La solución implementada trasciende el caso particular, estableciendo un protocolo estandarizado aplicable a otros artefactos con características geométricas complejas y superficies reflectantes, demostrando su eficacia tanto en la resolución inmediata de desafíos técnicos como en su potencial de replicabilidad para futuros trabajos de digitalización de piezas arqueológicas con retos similares.

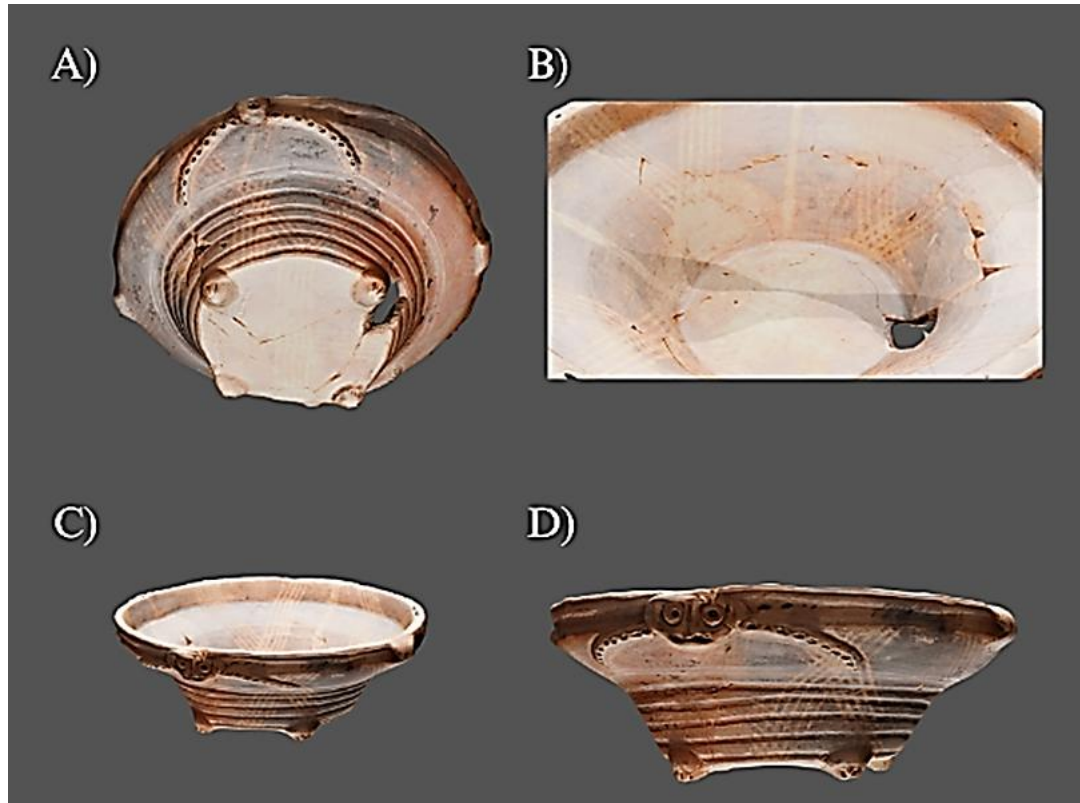


Figura 49. Diferentes vistas del modelo final. A) perspectiva desde abajo. B) perspectiva de la parte de adentro. C) Perspectiva desde un lado del modelo. D) Perspectiva desde al frente del modelo 3D (Imagen por: Diego López)

El procesamiento en *Photoshop* se realizó mediante ajustes específicos en tres parámetros clave:

**Reducción de reflectancia:**

- Aplicación de filtro 'Desaturar' (30-40%) en áreas especulares
- Uso de capas de ajuste 'Niveles' para compensar pérdida de detalle

**Corrección tonal:**

- Balance de blancos con muestreo directo en zonas neutras
- Ajuste selectivo de 'Curvas' (RGB individuales)

## 5. Vasija 2, Unidad SAS-144-4

La aplicación de un filtro de luz durante el escaneo 3D puede mitigar la distorsión en las texturas de objetos reflectantes. Sin embargo, en este caso, las dimensiones y la geometría de la pieza dificultaron su correcta digitalización mediante este método. Como alternativa, se optó por la fotogrametría, empleando el software *Agisoft Metashape* para la reconstrucción tridimensional. Adicionalmente, se realizaron pruebas comparativas utilizando la aplicación *Polycam* con el fin de evaluar su eficacia en la captura de detalles y la precisión del modelo resultante.

En el procesamiento con *Metashape*, la principal dificultad radicó en la correcta alineación de las secciones superior e inferior de la pieza. Al igual que con la vasija 1, se implementó un protocolo de captura sistemático que consistió en tres series fotográficas por cada lateral (Figura 50). La geometría particular del objeto requirió que las tomas inferiores se realizaran con variaciones angulares específicas para garantizar una cobertura adecuada del área.

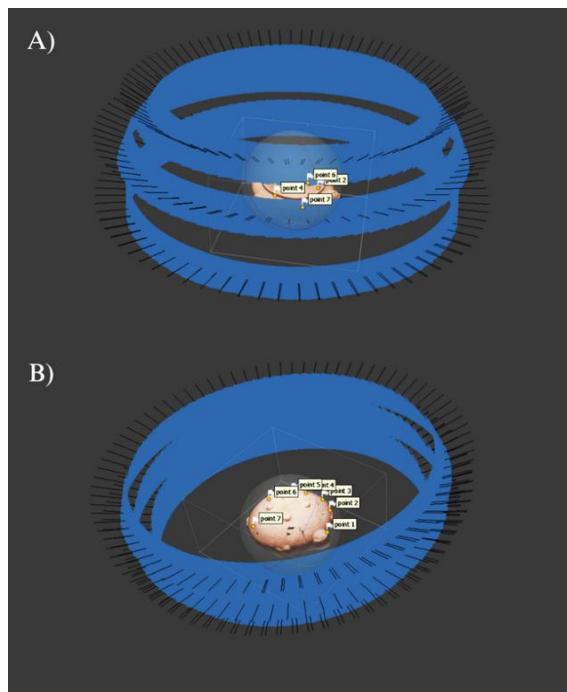


Figura 26. Vista general de las piezas donde se ven los puntos para orientar y unir los dos lados de la pieza A) Vista de las 3 filas de fotos tomadas en la parte de arriba B) Vista de las 3 filas de fotos tomadas en la parte de abajo

Para garantizar una adecuada alineación entre ambas secciones del modelo (Figura 51), se establecieron siete puntos de referencia que facilitaron la orientación espacial de la pieza. Si bien el software cuenta con funcionalidades de alineación automática, estas presentan limitaciones en términos de precisión y confiabilidad. Este proceso de alineación manual puede ejecutarse directamente durante la fase de orientación inicial (ver Anexo 1: Guía de *Agisoft Metashape*), aunque cabe destacar que este método manual requiere considerablemente más tiempo de procesamiento que el enfoque manual. Como parte del procesamiento, todas las fotografías fueron editadas previamente en *Adobe Photoshop* para eliminar ruido digital optimizar la calidad de imagen y reducir la necesidad de limpieza posterior en la nube de puntos densa.

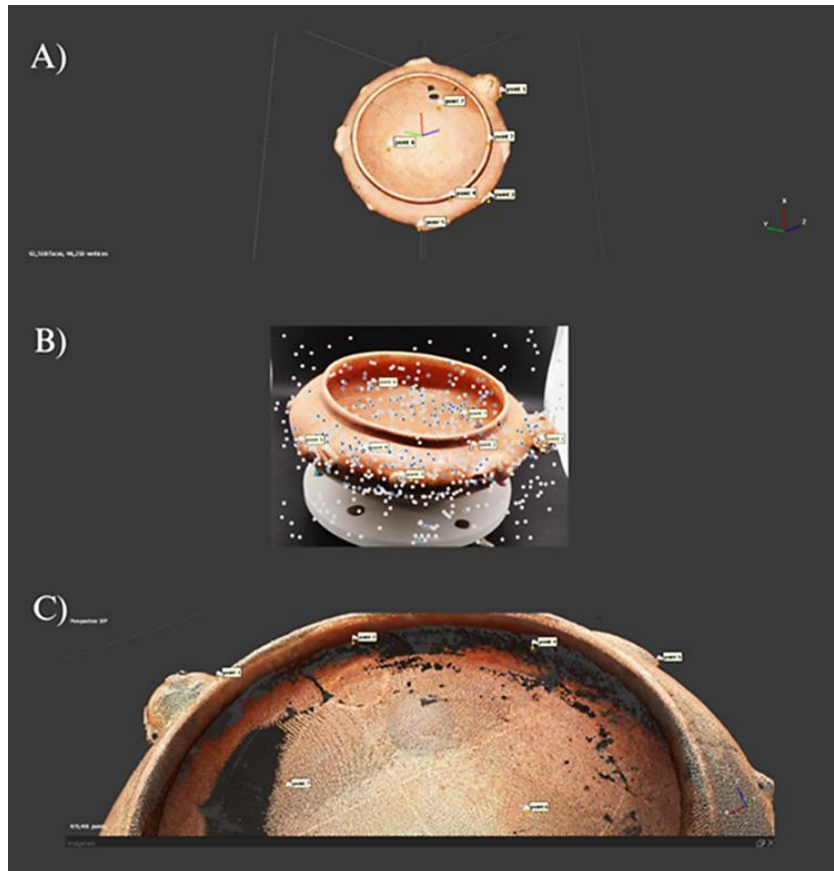


Figura 27. A) Vista de arriba de los puntos de orientación de la pieza.  
B) Puntos que Metashape muestra desde una de las fotos del modelo.  
C) Vista de los puntos de orientación en la nube de puntos del modelo  
3D (Imagen por: Diego López)

No obstante, al eliminar la textura y analizar únicamente la malla geométrica, se identificó una deformación en la sección de adentro, particularmente atribuible a la presencia de puntos flotantes residuales no depurados durante el procesamiento en *Metashape*, un fenómeno común en zonas de alta complejidad morfológica. Esta irregularidad fue corregida mediante técnicas de edición en *Blender*, lo que no solo restableció la fidelidad geométrica del modelo, sino que además lo optimizó para potenciales aplicaciones de impresión 3D, garantizando su idoneidad tanto para fines analíticos como de reproducción material.

## 6. Vasija 5, Unidad SAS-149-4

La edición de texturas en *Blender* representó una fase crucial en el procesamiento del modelo 3D derivado de la fotogrametría (Figura 52), permitiendo corregir tanto deformaciones geométricas como imperfecciones superficiales que puedan surgir durante el proceso de digitalización (Figura 53). Esta herramienta posibilitó la restauración digital de características morfológicas y superficiales, garantizando que el modelo final mantenga su precisión científica mientras mejora su calidad visual.

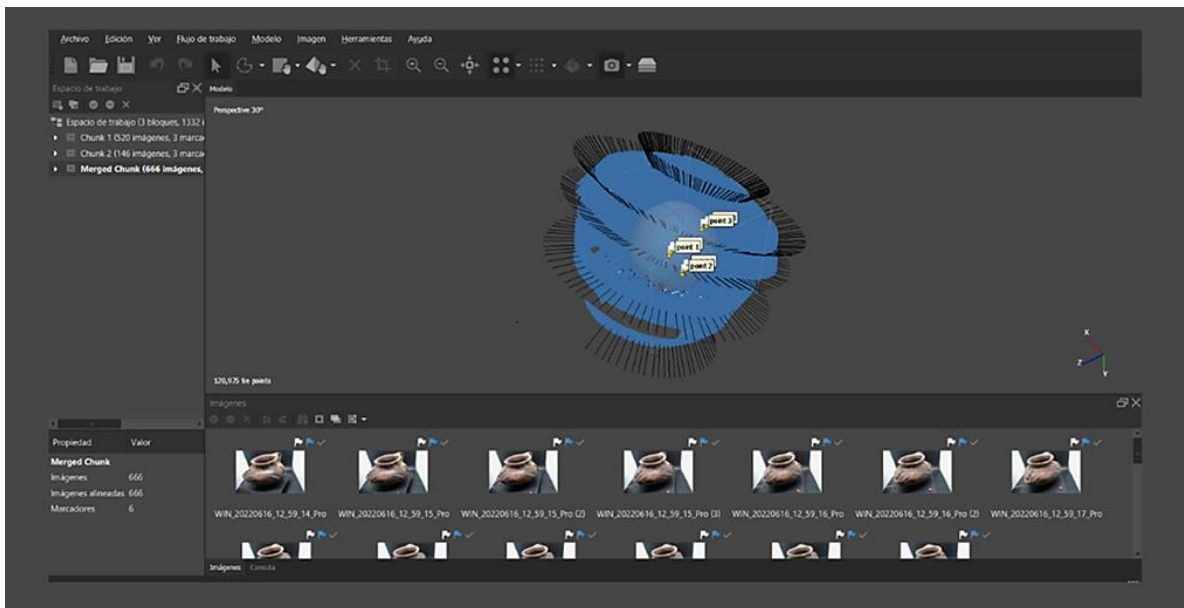


Figura 52. Vista de como terminaron orientadas las fotos al unir ambas partes del modelo en el proceso de fotogrametría (Imagen por: Diego López)

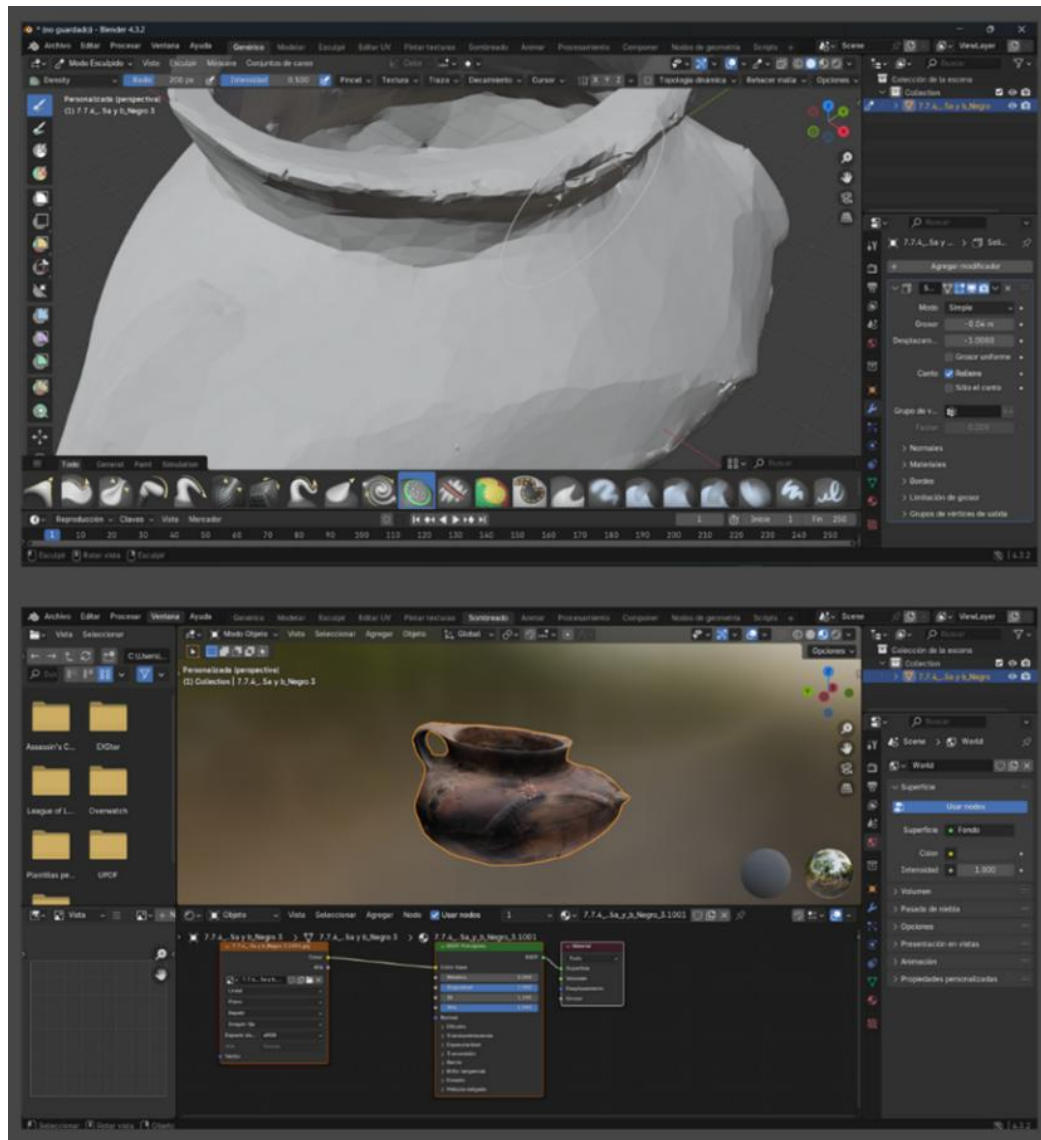


Figura 53. Proceso de edición del modelo y textura en *Blender* (Imagen por: Diego López)

## 7. Vasija 3, Unidad SAS-144-4

Aunque el proceso de fotogrametría fue exitoso en términos generales, el alto grado de reflectividad del engobe afectó la calidad del modelo final, generando discrepancias con respecto al artefacto original. Para mitigar este problema, se eligió un procesamiento más riguroso de las imágenes en *Adobe Photoshop* previo a la reconstrucción 3D, con el fin de reducir el impacto de los reflejos.

Alternativamente, pudo realizarse un ajuste manual en la nube de puntos densa de *Agisoft Metashape*. Sin embargo, la geometría del vaso (particularmente su borde recto y superficies continuas) dificultó la eliminación efectiva de puntos flotantes, lo que pudo derivar en deformaciones en el modelo final (Figura 54).

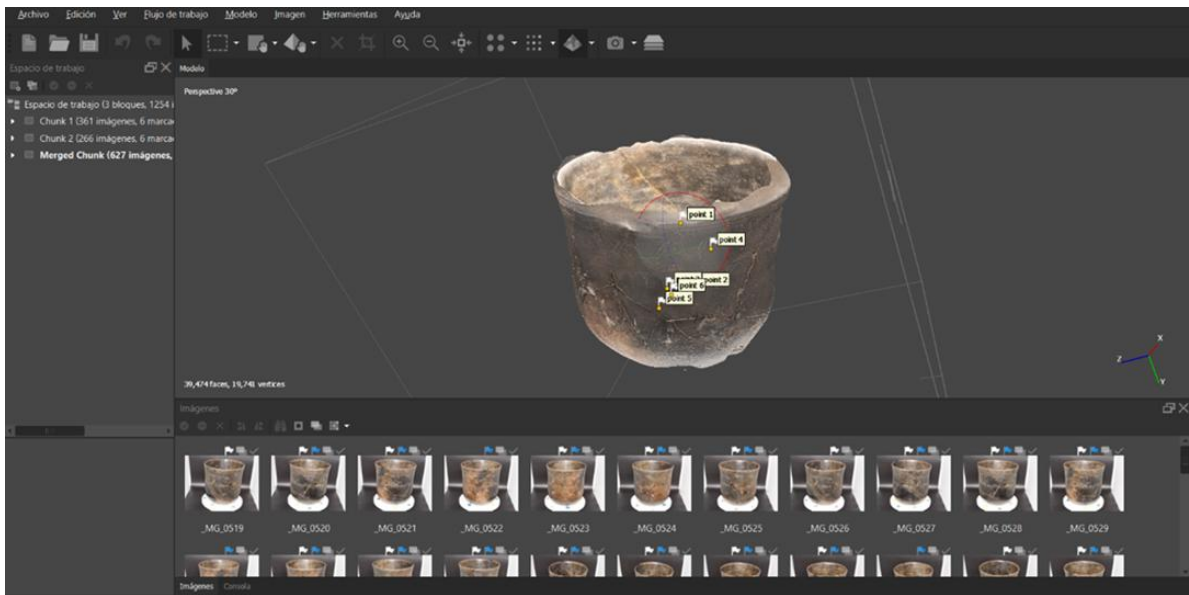


Figura 54. Modelo del vaso terminado con su correspondiente textura realizado en *Agisoft Metashape* (Imagen por: Diego López)

El escaneo tridimensional presentó dificultades significativas durante su ejecución. El sistema de base giratoria demostró ser ineficaz para capturar adecuadamente las superficies internas del objeto, debido a las limitaciones físicas del dispositivo. Como solución alternativa, se implementó una configuración modificada mediante el montaje del

escáner en un trípode independiente, en sustitución del soporte original. Esta modificación permitió la obtención de un modelo geométrico completo.

No obstante, se identificó una problemática adicional relacionada con las propiedades materiales del objeto. La textura de color café oscuro con características reflectantes generó distorsiones cromáticas en el modelo final, afectando la fidelidad de la representación digital. Este fenómeno se atribuye a la interacción entre las propiedades ópticas de la superficie y los sensores del escáner.

Como solución a las limitaciones identificadas, se realizó un proceso de integración que combina las ventajas de ambas técnicas: la textura generada mediante fotogrametría en *Agisoft Metashape* con la precisión geométrica del modelo obtenido por escaneo 3D. Esta síntesis metodológica puede implementarse eficientemente en *Blender*, que permite la superposición y alineación precisa de ambas fuentes de datos, edición controlada de las propiedades superficiales y corrección de discrepancias cromáticas y geométricas. Si bien este proceso ofrece resultados de mayor fidelidad (Figura 55), presenta como contraparte un incremento significativo en el tiempo de procesamiento, al requerir la manipulación coordinada de dos conjuntos de datos, procesos iterativos de ajuste y verificación y operaciones manuales de edición textural.

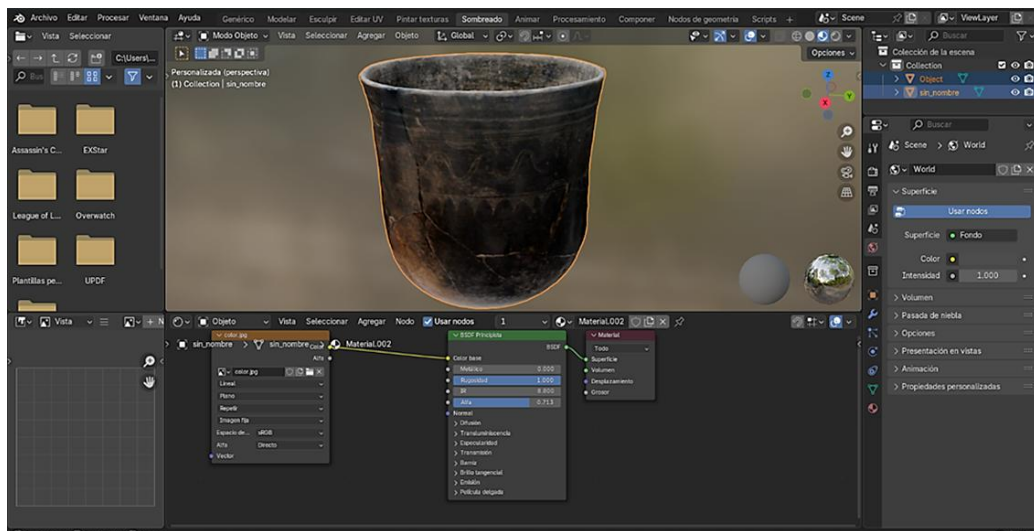


Figura 55. Proceso de edición de textura de *Metashape* agregada al modelo del escaneo 3D en *Blender* (Imagen por: Diego López)

El software *Polycam* ofrece un flujo de trabajo automatizado para generación de modelos 3D mediante fotogrametría. A diferencia de soluciones profesionales como *Agisoft Metashape*, esta aplicación, disponible tanto para dispositivos móviles como mediante interfaz web (ver guía de uso en Anexo 1), permite seleccionar el área de interés y generar modelos tridimensionales con mínima intervención del usuario. Para optimizar los resultados, se recomienda capturar las imágenes con equipo profesional (en lugar del sensor del dispositivo móvil) y procesamiento mediante la versión web de *Polycam* (a través de *Google Chrome*). El análisis comparativo reveló diferencias significativas en tiempos de procesamiento:

- *Metashape*:  $\approx$ 180 minutos (para el caso de estudio del vaso)
- *Polycam*:  $\approx$ 15 minutos (para el mismo objeto)

Esta notable reducción temporal se explica por los algoritmos de procesamiento optimizados para rapidez, automatización completa del procesamiento fotogramétrico y limitación en parámetros de calidad ajustables de *Polycam*. Sin embargo, la contrapartida de esta eficiencia se manifiesta en los resultados como modelos geoméricamente menos detallados, un menor control sobre el proceso de reconstrucción y limitaciones en la resolución de textura. No obstante, los resultados obtenidos (Figura 56) demuestran que *Polycam* representa una alternativa viable para casos donde se priorice la rapidez sobre el máximo detalle, particularmente cuando los modelos pueden ser refinados posteriormente en software especializado como *Blender*.

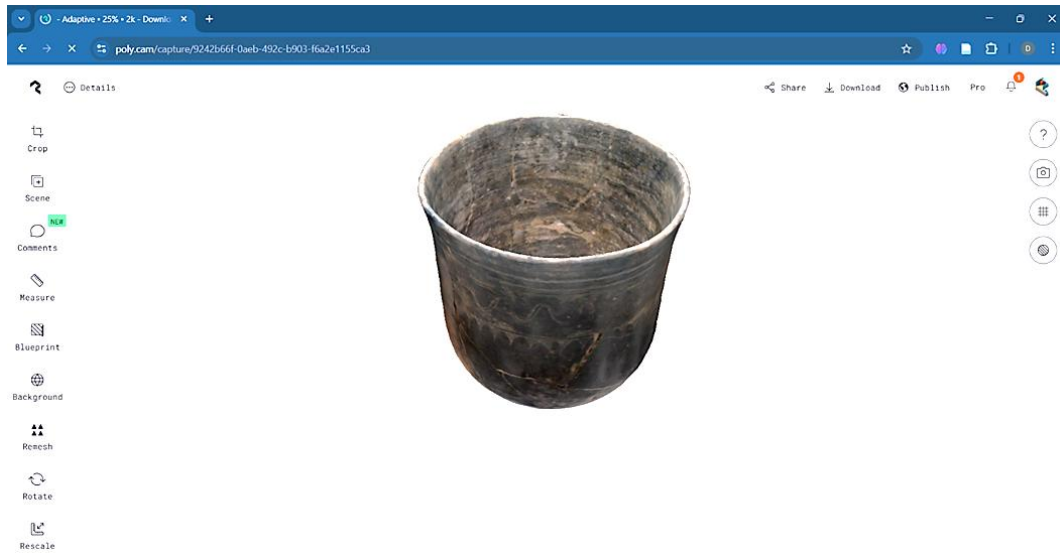


Figura 56. Resultado final del vaso desde la aplicación de *Polycam*

## 8. Vasija 4, Unidad SAS-144-4

Las intervenciones realizadas incluyeron la edición minuciosa de las fotografías y el ajuste manual de puntos de control en el software fotogramétrico. Sin embargo, no fue posible resolver completamente los problemas de reconstrucción, especialmente en las zonas de mayor curvatura y en el borde. Estas limitaciones destacan los retos que presentan las superficies complejas y reflectantes en los procesos de digitalización 3D, incluso cuando se aplican técnicas avanzadas de corrección.

La geometría compleja de la vasija generó dificultades significativas durante el procesamiento en *Agisoft Metashape*, requiriendo orientación manual de las imágenes (Figura 54) para lograr una alineación adecuada. Sin embargo, al igual que en el caso de la vasija 3, no fue posible reconstruir con precisión las superficies internas del objeto. Esta limitación se atribuye principalmente a dos factores. (1) **Insuficiente cobertura fotográfica** debido a las dificultades para capturar imágenes en ángulos adecuados; (2) **restricciones geométricas** que imposibilitaron el acceso fotográfico a ciertas zonas internas.

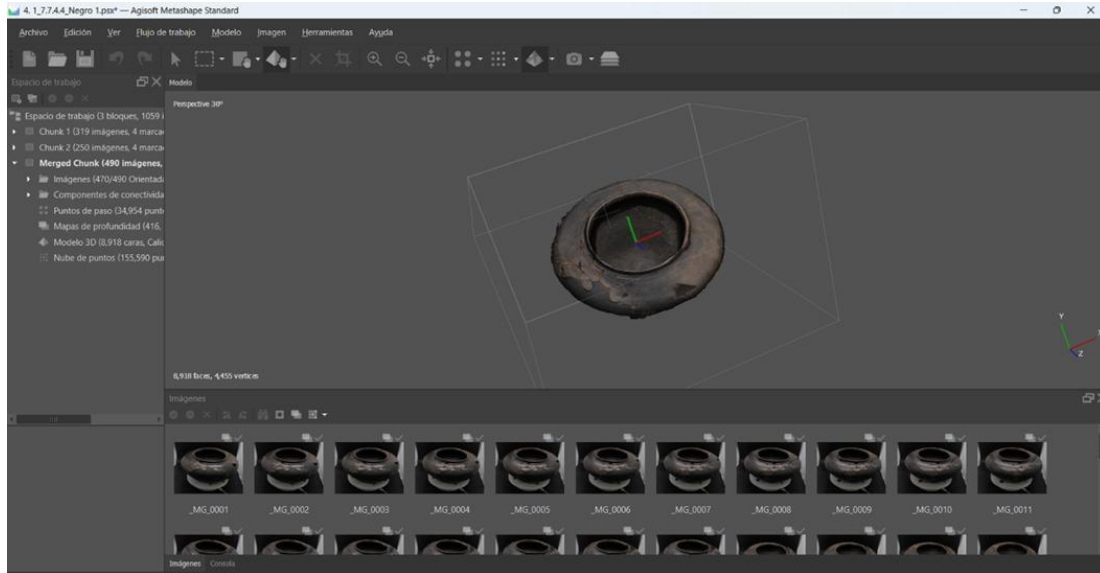


Figura 57. Vista del modelo final orientado manualmente (Imagen por: Diego López)

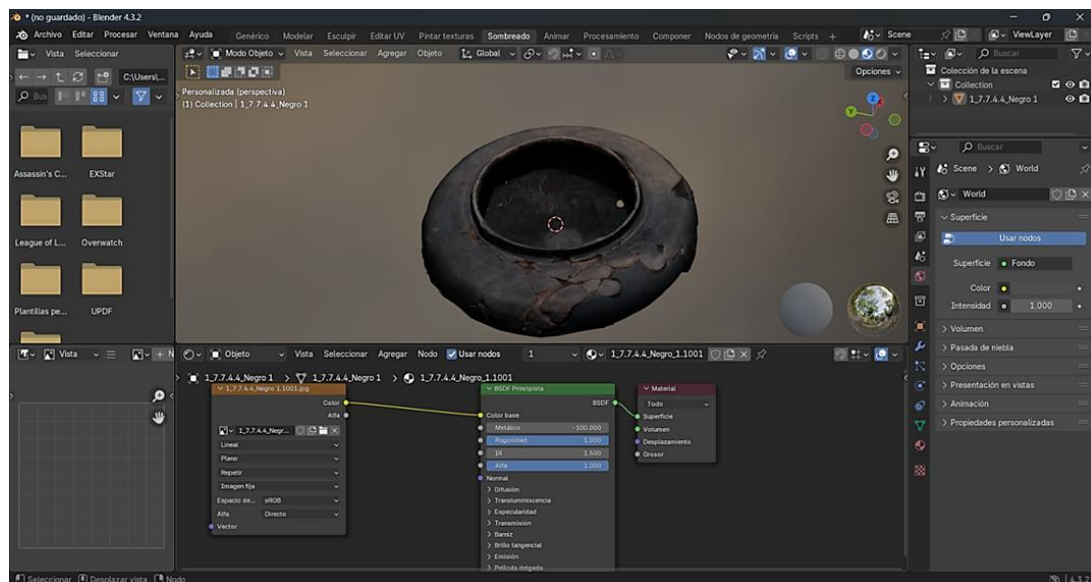


Figura 58. Proceso de edición de textura en *Blender* (Imagen por: Diego López)

Como solución potencial, se propone el uso de tecnologías alternativas, como un **escáner 3D manual** o una **microcámara flexible**, que permitirían capturar la topología interna con mayor precisión. Estas herramientas facilitarían la digitalización completa de cavidades y superficies de difícil acceso, superando las limitaciones propias de la fotogrametría convencional en objetos con geometrías complejas. El modelo 3D resultante

presentó una adecuada calidad en su representación externa, particularmente luego del proceso de edición textural en *Blender* (Figura 58). Sin embargo, persisten limitaciones significativas en la reconstrucción de las superficies internas, las cuales no pueden ser modificadas o mejoradas digitalmente sin comprometer la integridad científica del registro.

### **9.2.3. Geometrías Complejas (piezas pequeñas)**

En el apartado de geometrías complejas en piezas pequeñas, se incluyen aquellos artefactos cuyas dimensiones reducidas y morfologías intrincadas desafían los límites de resolución de los equipos de digitalización estándar. Esta categoría abarca objetos definidos como “micro artefactos” o miniaturas, donde la escala milimétrica de los detalles exige una precisión superior a la convencional. Una pieza pequeña se considera aquella cuyas dimensiones oscilan aproximadamente entre los 2 cm y 7 cm. La digitalización de estos elementos enfrenta obstáculos críticos, como la dificultad de enfoque en la fotogrametría macro y para el reconocimiento automático. Por lo tanto, su registro requiere adaptaciones metodológicas específicas, que se detallan en los siguientes casos de estudio.

#### **1. SAS-194-04**

El escaneo 3D demostró ser significativamente más eficiente que la fotogrametría en términos de tiempo y procesamiento posterior. A diferencia del método fotogramétrico, que requirió aproximadamente 2 horas y 30 minutos para la captura y procesamiento inicial, el escaneo 3D completó la digitalización en solo 20 minutos y 45 segundos (Figura 59). Esta técnica eliminó la necesidad de etapas adicionales de edición en *Photoshop* y, en muchos casos, también en *Blender*, optimizando así el flujo de trabajo y reduciendo considerablemente tanto el tiempo de procesamiento como los recursos técnicos requeridos. La comparación directa entre ambos métodos confirma la superioridad del escaneo 3D para la documentación eficiente de piezas arqueológicas, particularmente cuando se prioriza la rapidez y la reducción de post-procesamiento.



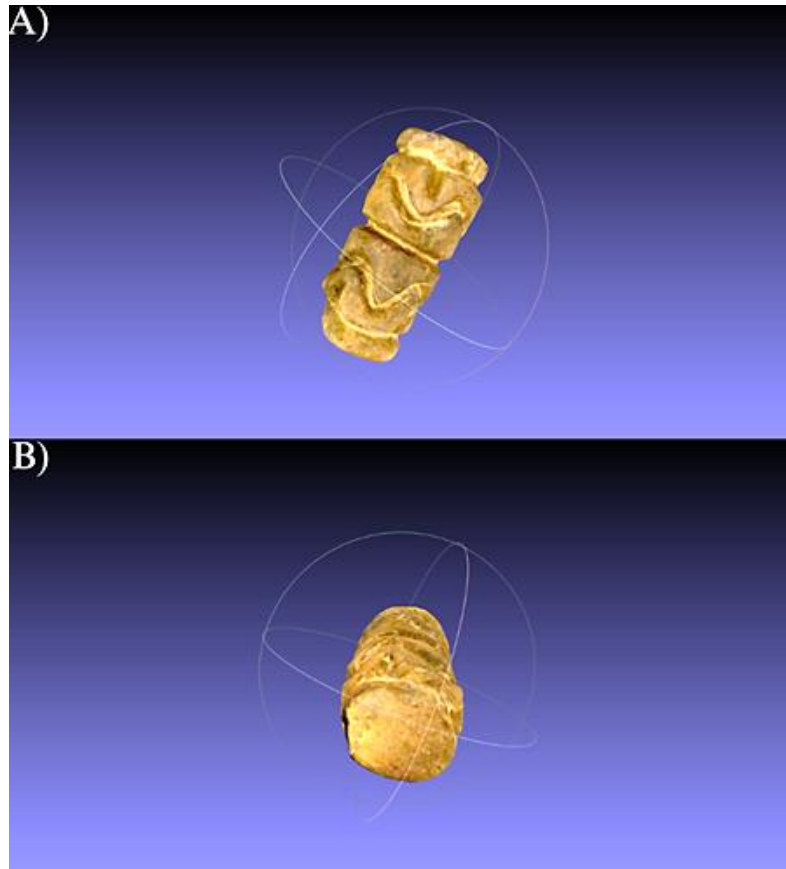


Figura 29. A) Vista vertical del modelo final desde Meshlab. B) Vista horizontal del modelo final en Meshlab (Imagen por: Diego López)

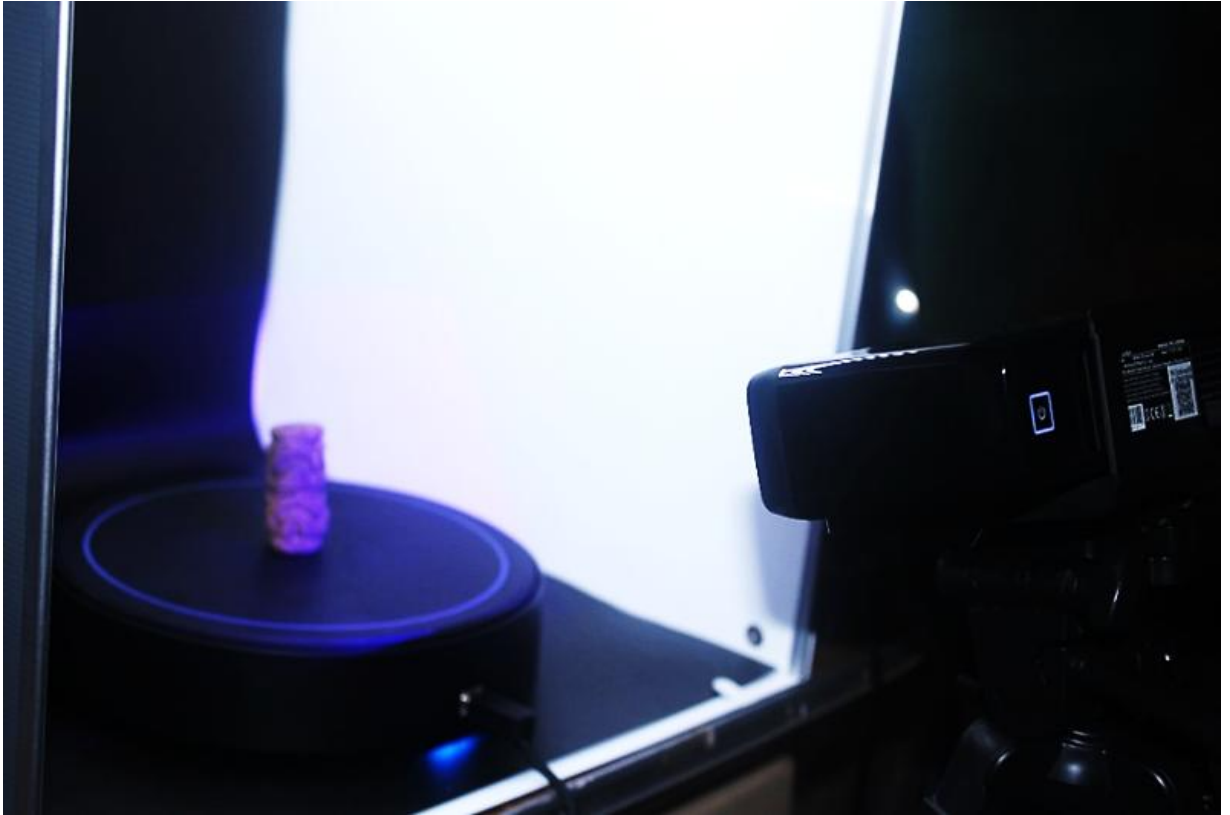


Figura 61. Proceso de escaneo por medio del escáner 3D *einscan SE V2*

### 3. SAS-15-9

La figurilla, a pesar de presentar fracturas, no presentó complicaciones durante su digitalización mediante escaneo 3D y fotogrametría, procesos que se realizaron por separado para cada fragmento (Figura 62). En la etapa de edición en *Blender*, se demostró la viabilidad de restaurar digitalmente la pieza mediante la unión virtual de sus partes, manteniendo intactas las áreas de fractura para preservar su valor documental. Este proceso, ilustrado en la Figura 63, evidencia el potencial de las técnicas 3D para reconstrucciones virtuales no invasivas, aplicable tanto a esta pieza como a otros materiales arqueológicos fragmentados, ofreciendo una alternativa valiosa para su estudio y difusión sin alterar los originales.

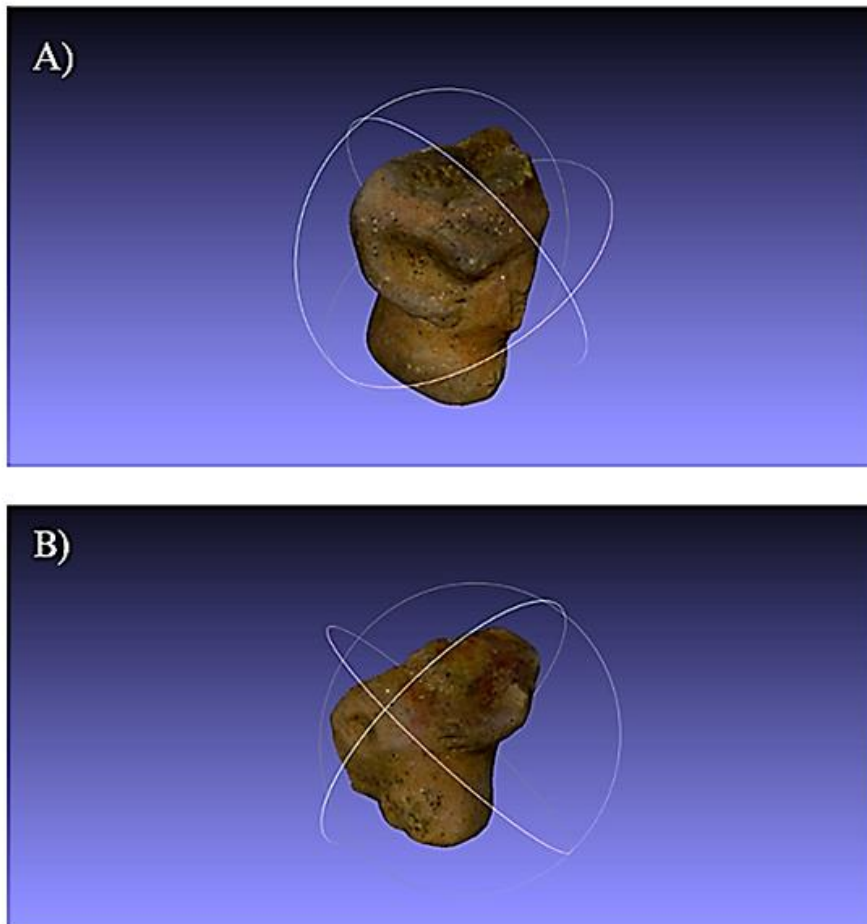


Figura 30. A) Modelo 3D final del lado derecho de la figurilla. B) Modelo 3D final del lado izquierdo de la figurilla (Imagen por: Diego López)

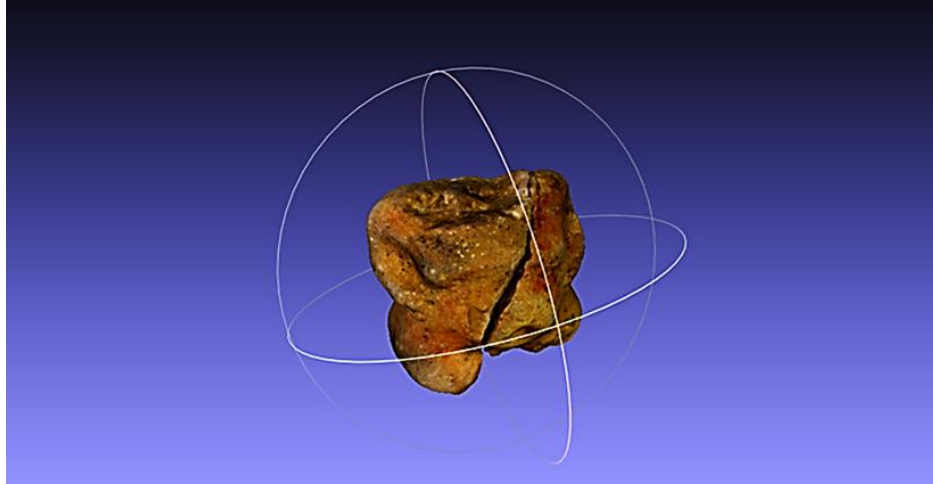


Figura 63. Modelo 3D completo de la figurilla después de la unión de ambos modelos  
(Imagen por: Diego López)

#### 4. SAS-160-7

Las limitaciones fueron solventadas mediante la implementación complementaria de escaneo 3D (Figura 64), técnica que demostró superior capacidad para capturar con precisión los detalles morfológicos en microescala, logrando reconstruir adecuadamente las cavidades y perforaciones y preservar la integridad geométrica de las zonas más complejas. El contraste metodológico observado sugiere que el escaneo 3D constituye una solución técnicamente más adecuada que la fotogrametría convencional para la documentación digital de artefactos miniaturizados con elementos morfológicos complejos.

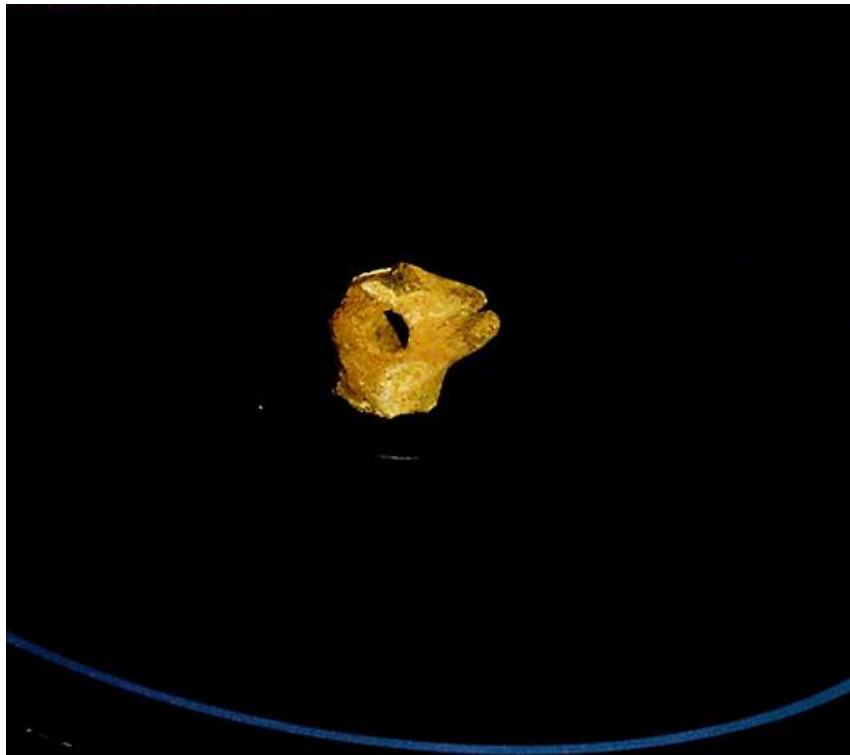


Figura 64. Proceso de escaneo 3D de la pieza en la base giratoria del escáner 3D  
(Imagen por: Diego López)

A pesar de tratarse de un fragmento de reducidas dimensiones, el escaneo 3D demostró resultados óptimos en la captura digital (Figura 65), generando un modelo tridimensional que preserva fielmente tanto la morfología original como las características

texturales del artefacto. Una ventaja notable de los softwares especializados de escaneo radica en su capacidad de simplificación automática de mallas, proceso que mantiene la calidad geométrica mientras optimiza el flujo de trabajo al reducir etapas de post-procesamiento y el uso de recursos computacionales. Esta funcionalidad integrada representa una ventaja comparativa frente a métodos alternativos, ya que disminuye significativamente la necesidad de intervención manual en *Blender* para optimización de modelos, sin comprometer la precisión métrica ni las propiedades visuales del artefacto digitalizado.

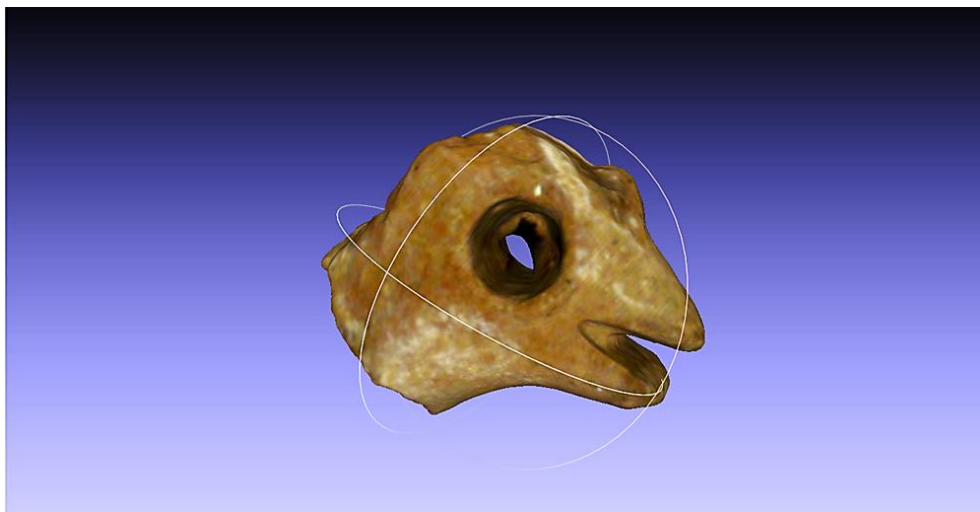


Figura 65. Vista del modelo final después de simplificarlo (Imagen por: Diego López)

## 5. SAS-161-2

El uso estratégico de un fondo negro que absorbe completamente la luz ambiental demostró ser una solución técnicamente eficaz para la digitalización de objetos líticos cilíndricos con superficies trabajadas. Esta configuración permite obtener modelos tridimensionales de alta fidelidad que capturan simultáneamente tanto la geometría base del cilindro como los finos detalles decorativos e incisiones superficiales.

La superficie oscura actúa como referencia absoluta de contorno, eliminando reflejos parásitos y mejorando el contraste para la identificación precisa de relieves, lo que resulta particularmente valioso para piezas con decoraciones incisas o micro detalles morfológicos que deben preservarse en el modelo final (Figura 66). Esta solución resuelve el desafío técnico de documentar complejidades superficiales en formas cilíndricas sin comprometer la calidad de la captura geométrica base, ofreciendo un balance óptimo entre precisión dimensional y preservación de características artístico-culturales.

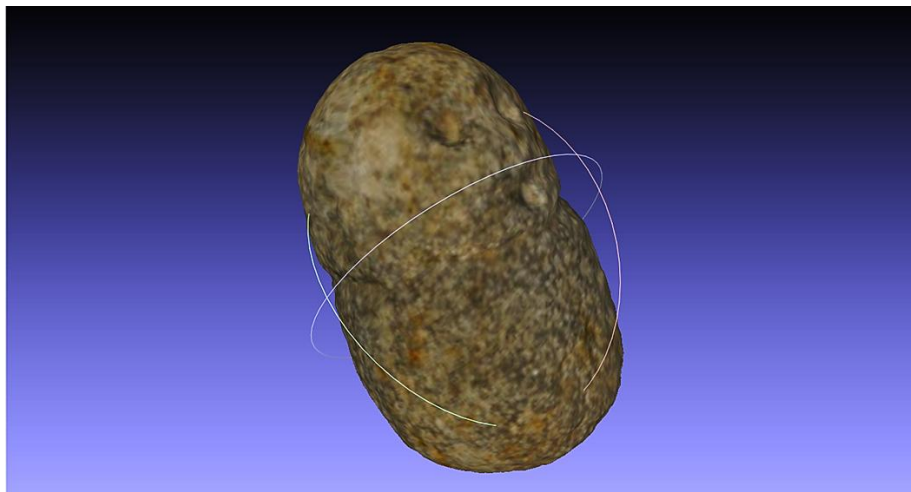


Figura 66. Vista del modelo final recostado

## 6. SAS-201-4

La fotogrametría mediante *Agisoft Metashape* (Figura 67) presenta una ventaja documental significativa al generar un informe técnico exhaustivo que incluye: 1) **parámetros de captura** como el número exacto de imágenes utilizadas, distancia focal empleada y resolución y tamaño de píxeles; 2) **datos de procesamiento** como el número de pasos realizados, el tipo de proyecciones utilizadas y el error de recolección calculado; culminando por 3) **metadatos técnicos** como la calibración completa de la cámara, los tiempos exactos por etapa de procesamiento y las especificaciones técnicas de todo el flujo de trabajo.

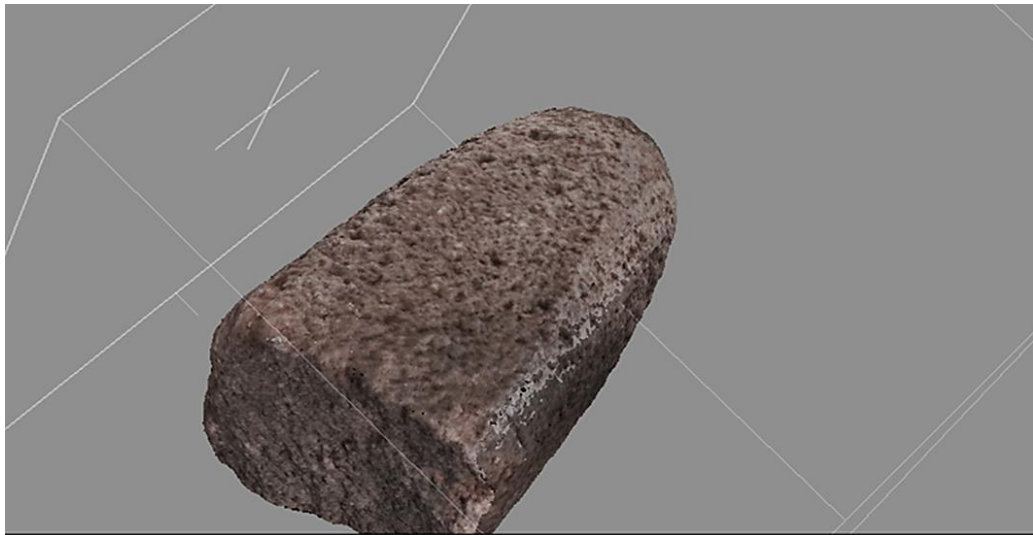


Figura 67. Modelo final realizado a partir de fotogrametría (Imagen por: Diego López)

Esta capacidad de generación automática de metadatos técnicos representa un valor añadido para la investigación arqueológica, ya que permite:

- La replicabilidad exacta del proceso
- El análisis comparativo de metodologías
- La verificación científica de los resultados
- La optimización de futuros trabajos de documentación

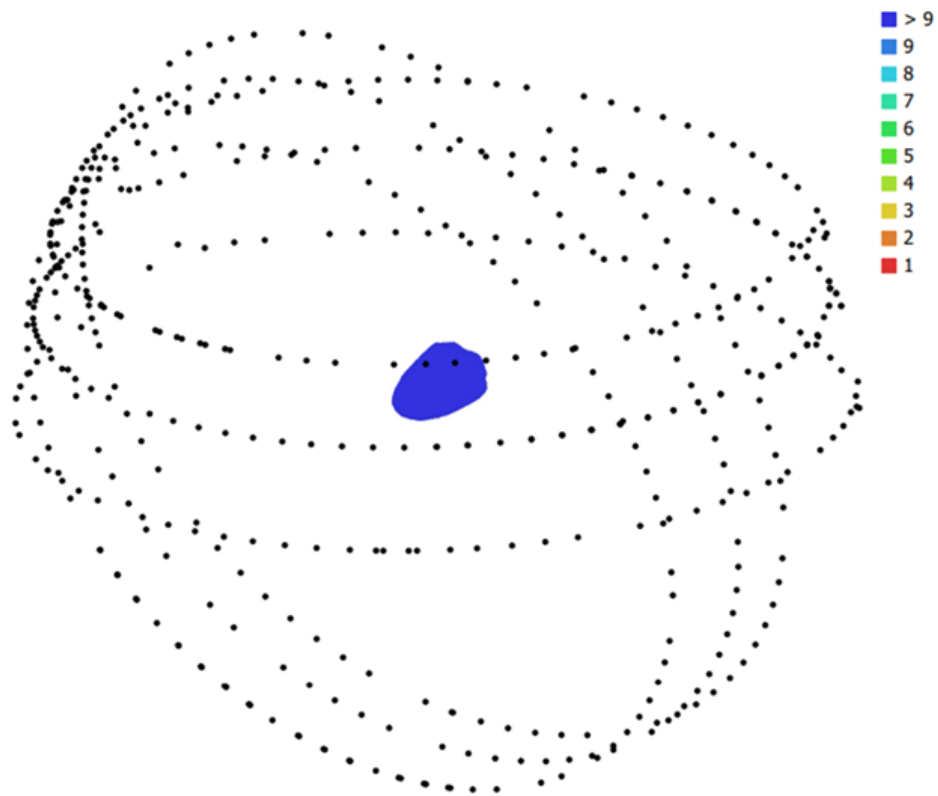


Figura 68. Posiciones de cámaras y solapamiento de imágenes (Imagen por: Diego López)

#### 9.2.4. Problemática y soluciones en la digitalización de piezas con marcas de identificación y su organización en el proceso

Se logró generar modelos digitales de diversos materiales correspondientes a distintas temporalidades del sitio arqueológico Semetabaj, utilizando tanto fotogrametría como escaneo 3D. Este proceso siguió los protocolos establecidos, incorporando las observaciones metodológicas derivadas del análisis previo del primer muestrario.

En el caso específico de los tiestos cerámicos, la fotogrametría presentó dificultades significativas durante la fase de orientación de algunas piezas, particularmente cuando las superficies opuestas mostraban morfologías completamente rectas. Esta configuración geométrica planteó el doble de desafíos técnicos en comparación con piezas de formas irregulares (Figura 69). Ante esta limitación, el escaneo 3D demostró ser notablemente más eficiente, aprovechando el sistema de orientación automática integrado en el software especializado.

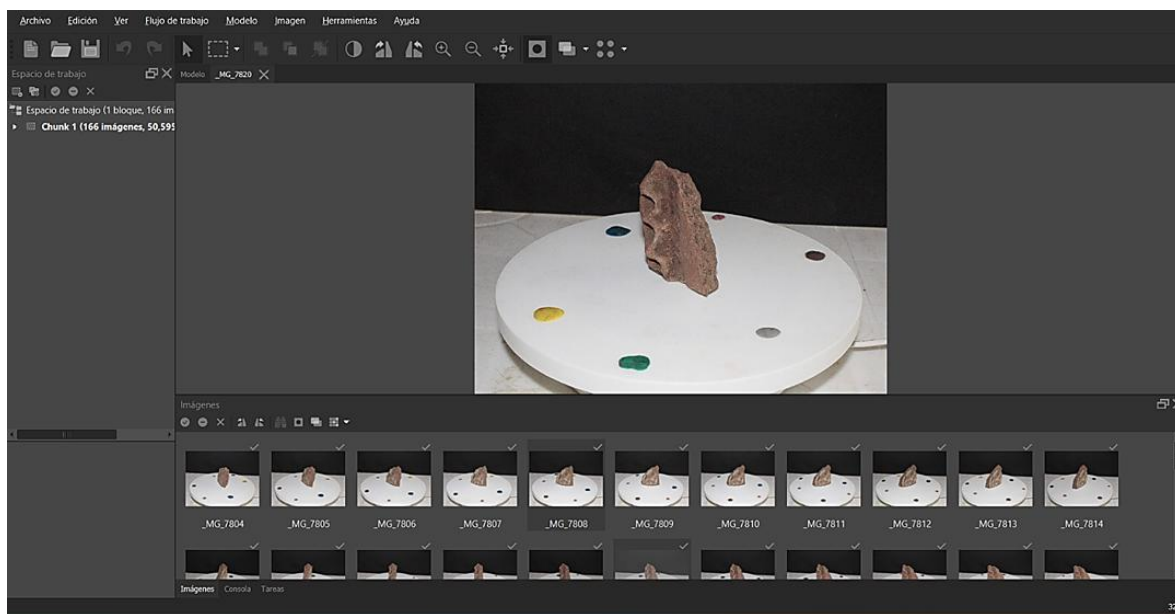


Figura 69. Vista en Agisoft Metashape de la pieza NSMCT2, la cual por su decoración permitió un rápido procesamiento de las fotos (Imagen por: Diego López)

Las decoraciones superficiales funcionaron como elementos facilitadores para la orientación fotogramétrica, actuando como puntos de referencia naturales. Sin embargo, en artefactos con morfologías cilíndricas, como los fragmentos de asa analizados (Figura 70), incluso con lados claramente diferenciables. La fotogrametría mostró limitaciones que obligaron a recurrir al escaneo 3D como alternativa preferente.

Un hallazgo relevante en este conjunto fue el impacto negativo de las marcas (Figura 71) con esmalte de uñas, material utilizado en los artefactos en el proceso de marcado, en ambos métodos de digitalización. Estas anotaciones generaron reflejos que:

- Comprometieron la calidad de los modelos finales
- Crearon áreas borrosas localizadas
- Requirieron edición selectiva en Photoshop

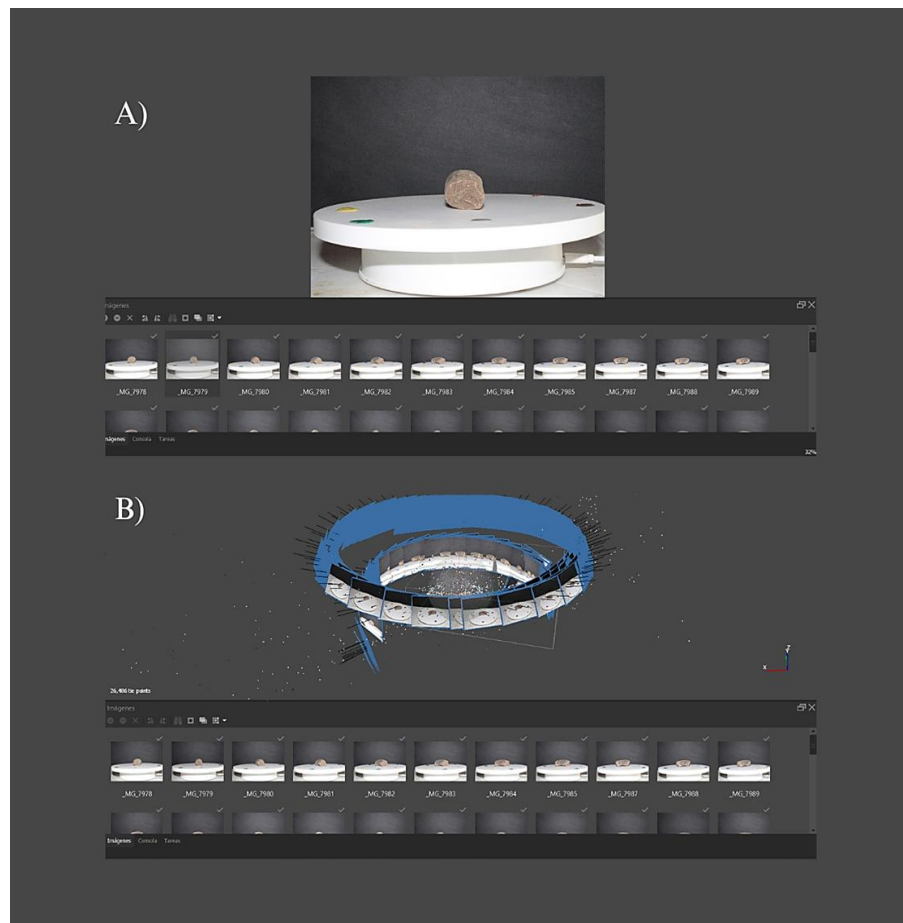


Figura 31. A) Vista de la pieza en una de las fotos subidas en Metashape. B) Vista de la orientación fallida en el software (Imagen por: Diego López)

La solución óptima identificada consistió en la edición digital focalizada exclusivamente en las zonas marcadas, aunque este proceso incrementó significativamente el tiempo de postproducción. Estos resultados subrayan la necesidad de utilizar métodos alternativos de marcado que no afecten las propiedades superficiales de los materiales arqueológicos durante su documentación digital. El marcado directo sobre materiales arqueológicos siempre debe realizarse, en caso de ser estrictamente necesario, en zonas no visibles y de escasa importancia para el análisis. Sin embargo, la metodología más recomendable para la integridad y futuros trabajos con la pieza es la implementación de sistemas de referencia externa. Este sistema utiliza tarjetas o soportes independientes que contienen códigos de identificación, asociándolo a uno o múltiples fragmentos.

Cuando el marcado directo es inevitable, se propone la captura sistemática de imágenes para fotogrametría. Este registro, aun cuando no sea procesado de inmediato en programas como *Metashape*, asegura la posibilidad de generar un modelo 3D en una fase posterior, el cual servirá para tener un registro sin alteración de la pieza original. Otra solución sería la retirada digital de las marcas mediante *Photoshop*. No obstante, la viabilidad de esta opción es limitada, dado el volumen de fotografías necesarias por cada artefacto, lo que convierte en una tarea excesivamente laboriosa y poco práctica.

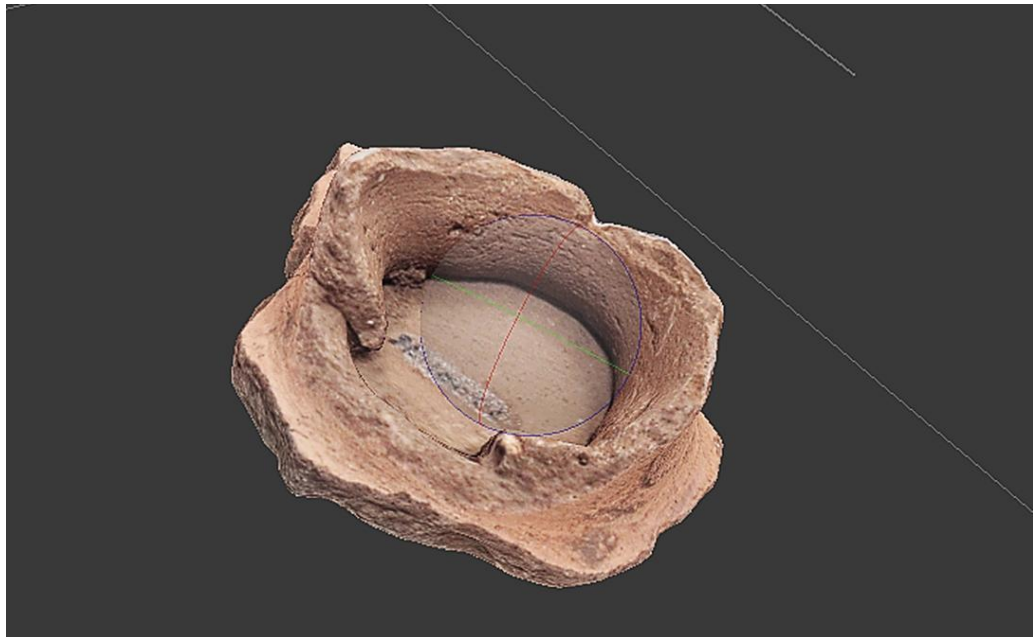


Figura 71. Vista del modelo final en Metashape donde se puede notar la marca borrosa (Imagen por: Diego López)

Un aspecto crítico en el proceso de documentación digital fue la gestión de archivos, particularmente en lo concerniente a la nomenclatura de los modelos 3D. Los sistemas de clasificación arqueológica tradicionales, que incorporan información cronológica (período), tipológica (tipo cerámico) y procedencia (como el ejemplo "NARANJA-SANTA-MARIA\_CLÁSICO\_TEMPRANO\_2"), generaron nombres de archivo excesivamente largos que presentaron problemas técnicos específicos. *Agisoft Metashape* mostró limitaciones al recuperar imágenes asociadas cuando los nombres de archivo superaban cierta extensión con fallos en la reconstrucción de modelos al perder la referencia de las imágenes originales. Para solucionarlo se desarrolló de un sistema de codificación abreviado (ej: NSMCT2). Usando las iniciales de cada componente informativo:

*Naranja*

*Santa*

*Maria*

*Clásico*

*Temprano*

**2** (número de pieza)

### **9.3. Almacenamiento de datos**

Las nuevas tecnologías digitales han revolucionado la documentación y gestión de datos arqueológicos, permitiendo su recopilación, almacenamiento y difusión en formatos digitales accesibles y estandarizados. Entre estos avances destacan los modelos tridimensionales (3D), los cuales integran múltiples conjuntos de datos, como fotografías de alta resolución, registros analógicos, información espectral (incluyendo datos de color) y evaluaciones de deterioro. Esta integración no solo mejora la precisión en el registro arqueológico, sino que también facilita su preservación y análisis posterior.

Los distintos formatos de modelado 3D permiten almacenar información arqueológica de manera estructurada, por lo que su elección y método de resguardo dependen del propósito de su uso. Entre las opciones de almacenamiento más comunes se encuentran los discos duros y servidores físicos, servidores en la nube (públicos o privados) y plataformas

especializadas en visualización y gestión de modelos tridimensionales, como *Sketchfab*. Esta diversidad de soportes facilita la preservación, el acceso y la difusión de los datos, adaptándose a las necesidades específicas de cada proyecto.

De igual manera, en el ámbito arqueológico se han empleado otros sistemas de almacenamiento y gestión de datos que han demostrado su eficacia. Entre estos destacan plataformas de acceso público, como *Google Maps*, así como repositorios institucionales (tanto de carácter público como privado) siendo preferibles aquellos que operan bajo estándares de acceso abierto. Estas herramientas facilitan la georreferenciación, el análisis espacial y la difusión de información arqueológica, contribuyendo a la transparencia y colaboración en la investigación.

#### **9.4. Accesibilidad y difusión**

Los modelos tridimensionales y los entornos virtuales están en constante evolución, siendo herramientas fundamentales para el acceso y difusión del conocimiento arqueológico. Estas tecnologías no solo facilitan la interpretación y análisis de datos para la comunidad científica, sino que también democratizan el acceso a la información patrimonial para el público general. Particularmente, los modelos 3D permiten una innovadora forma de divulgación científica, transformando los hallazgos arqueológicos de representaciones digitales a interpretaciones físicas mediante técnicas como la impresión 3D, lo que genera nuevas posibilidades de estudio y apropiación del público social del patrimonio.

Si bien la realidad virtual y aumentada constituyen herramientas valiosas para la difusión del patrimonio arqueológico, su accesibilidad sigue siendo limitada para amplios sectores de la población. En este contexto, la impresión 3D emerge como una alternativa democratizadora que supera estas barreras tecnológicas. Particularmente desde el periodo post-pandémico (2020-actualidad), esta tecnología ha experimentado una notable popularización y abaratamiento de costos, simplificando significativamente los procesos de reproducción material de objetos arqueológicos. Al imprimirlos no solo se tiene una pieza idéntica al original, sino abre la posibilidad de mover la esencia de los artefactos de un lugar a otro para que el público aprenda y los pueda tocar. Permite también que las personas no videntes puedan saber su forma y morfología, abriendo una nueva ventana para la educación en el país mediante la impresión 3D por medio de plástico y/o resina.

Esta tecnología no solo genera copias dimensionalmente precisas de los artefactos originales, sino 1) **facilita la movilidad patrimonial**, permitiendo la circulación de representaciones materiales sin riesgo para los originales; 2) **rompe barreras de accesibilidad**, particularmente para públicos con discapacidad visual que ahora pueden experimentar táctilmente la morfología de los objetos; 3) **permite acabados visuales**, mediante técnicas de pintura y texturizado que aproximan las réplicas a la apariencia original; **amplía los horizontes educativos**, posibilitando innovadoras estrategias museográficas y didácticas en contextos museísticos y académicos.

La digitalización 3D permite que los archivos dejen de ser entidades estáticas y se conviertan en espacios sociales de creación de conocimiento. En Guatemala, proyectos como *Maya Scripta* demuestran que bases de datos de acceso abierto, que incluyen fotografías y dibujos digitales, son herramientas vitales para que guías de turistas, estudiantes y aficionados accedan al registro histórico que tradicionalmente ha permanecido en círculos académicos cerrados (Morales Forte et al. 2021). La vinculación social efectiva requiere, por tanto, una planeación del impacto social desde el diseño del proyecto arqueológico, otorgando un papel dinámico a la sociedad que acoge la investigación (García Magdalena 2018).

## 10. DISCUSIÓN E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

El registro arqueológico constituye un proceso sistemático y detallado de documentación que permite reconstruir e interpretar el pasado. Es una parte esencial de la investigación, que consiste en recopilar, organizar y preservar un objeto y su contexto específico desde su descubrimiento hasta su análisis en laboratorio (Schiffer 1991). Históricamente, este registro se ha fundamentado en métodos como el dibujo y la fotografía, los cuales poseen una autoridad innegable al preservar contextos como un momento fijo y único en el tiempo (Pillsbury 2012). En la actualidad, la disciplina se ha visto transformada por el surgimiento de la arqueología digital y virtual. Mientras la digitalización se refiere a la creación de documentación digital, la virtualización implica el desarrollo de entornos y recursos para la representación (Staropoli et al. 2023). Esta subdisciplina ha integrado tecnologías emergentes con objetivos y métodos propios, ofreciendo nuevas formas de investigación, conservación y comunicación en el marco del patrimonio cultural, operando bajo normas internacionales como los Principios de Sevilla que enfatizan la rigurosidad científica (López y Grande, 2011).

Dentro de este marco, los métodos de digitalización se clasifican en activos (como el escáner láser) y pasivos (como la fotogrametría). Estas técnicas forman parte de una nueva infraestructura digital para la investigación, definida como un conjunto de información, estándares, políticas y herramientas desarrolladas para propósitos académicos específicos (Izela et al. 2020). La imagen digital, desde la perspectiva de la antropología visual, entiende como una construcción que transmite conocimiento a través de convenciones sociales, culturales y tecnológicas, siendo crucial para la conservación preventiva al permitir detectar daños no visibles al ojo humano. Un pilar fundamental para la gestión de la información generada es el almacenamiento de datos. A través de infraestructuras digitales, se establecen repositorios físicos o virtuales (*como Dropbox o Google Drive*) que facilitan la conservación y el acceso a información, permitiendo su reutilización y asegurando la preservación del patrimonio cultural digital.

Finalmente, la arqueología pública examina la relación entre las actividades humanas pasadas y la sociedad contemporánea. Bajo el paradigma de la ciencia abierta (*open*

*science*), que promueve el acceso abierto, la colaboración y la investigación orientada a la sociedad (Richardson 2013), las tecnologías digitales ofrecen un potencial sin precedentes. La utilización de técnicas como la fotogrametría y el escaneo 3D permite crear experiencias inmersivas y detalladas, facilitando una divulgación efectiva y un diálogo con el público, cumpliendo así con la responsabilidad de difundir los hallazgos arqueológicos.

### **10.1. Costos y ámbito legal de métodos fotogramétricos y Escaneo 3D**

Existe un “vacío legal significativo” en la legislación guatemalteca (específicamente en el Decreto 26-97, Ley para la Protección del Patrimonio Cultural). La ley actual no define si un modelo 3D se considera una “réplica” o “documentación técnica”, lo que deja estos archivos digitales en una zona gris de protección. El problema es la inseguridad jurídica y la pérdida de soberanía sobre el patrimonio, lo cual tiene consecuencias económicas y éticas. Al no estar definido, el Estado pierde control sobre lo que sucede con esos archivos una vez creados.

Si la ley no define si el modelo 3D es una “réplica” sujeta a permisos de reproducción o simple documentación, una empresa privada (de videojuegos, cine o metaverso) podría tomar ese modelo, venderlo o lucrar con él sin que el Estado ni las comunidades de Guatemala tengan opinión o acceso al modelo 3D

¿De quién es el modelo 3D? Si es “documentación técnica”, la propiedad intelectual suele ser del autor. Si es una “réplica oficial”, la propiedad sobre la imagen del bien pertenece al Estado. En la zona gris, no se sabe si el arqueólogo tiene derecho a restringir el acceso o si el Estado tiene el derecho a confiscar el archivo digital. Esto desincentiva la investigación y la publicación abierta.

Cualquiera puede hacer un modelo 3D de mala calidad y venderlo como “oficial” o “real”. Al no haber regulación sobre qué constituye una réplica digital válida, se puede difundir información falsa o deformada sobre el patrimonio sin consecuencias.

La fotogrametría se ha consolidado como una herramienta fundamental para el registro digital en arqueología, permitiendo la generación de datos precisos para investigaciones tanto inmediatas como futuras. Su accesibilidad resulta particularmente notable, ya que puede realizarse con cámaras tanto profesionales como de dispositivos

móviles, tecnología ampliamente disponible para el público general. *Agisoft Metashape*, si bien es uno de los programas más utilizados, no constituye la única opción disponible actualmente para la generación de modelos 3D mediante técnicas fotogramétricas.

Por otro lado, el escaneo 3D resulta especialmente eficiente para optimizar tiempo, ya que el escaneo 3D simplifica tanto el proceso de digitalización como el tiempo de aprendizaje requerido. A diferencia de la fotogrametría, su manejo es intuitivo y de rápida asimilación. No obstante, su principal limitante es el elevado costo de inversión inicial, pues incluso el escáner 3D más básico tiene un precio mínimo de Q 9,000 si se adquiere localmente en Guatemala y no funcionará para todos los registros realizados en arqueología. El escaneo 3D presenta una ventaja adicional significativa: los softwares especializados que acompañan a los escáneres incluyen funcionalidades integradas para la simplificación de mallas y el ajuste de texturas, procesos que con la fotogrametría normalmente requieren el uso de programas adicionales como *Meshlab* o *Blender*.

#### **10.1.1. Costo y Accesibilidad Financiera**

Aunque constituye una metodología óptima, la implementación de *Metashape* se vio limitada por los altos precios en el momento en que se realizó este trabajo. Los precios oscilan entre US\$ 179 para la versión estándar y US\$ 3,499 para la versión profesional. Este factor representa una barrera significativa para su adopción en contextos arqueológicos como el de Guatemala, donde los proyectos generalmente operan con presupuestos limitados. Para el presente estudio, se emplearon ambas versiones del software en sus modalidades de prueba temporal (30 días), estrategia que permitió acceder a sus funcionalidades completas sin incurrir en los costos mencionados.

Por otra parte, este problema llevó a la búsqueda de alternativas, donde la mejor fue *Polycam*. Esta aplicación además de ser más sencilla de entender tiene un precio más accesible, el cual consiste en US\$ 27 al mes, o bien se puede optar por la suscripción anual que es de US\$ 200. Para proyectos arqueológicos del país que normalmente tienen un periodo corto en campo, el plan mensual resulta más económico, incluso llegando a pagar uno o dos meses extra para el periodo de laboratorio. La principal limitante de esta aplicación es que necesita acceso a internet para su uso, algo que en *Metashape* no sucede.

Ya para el año 2025, *Agisoft Metashape* había cambiado sus planes de pago teniendo dos de uso exclusivo para centros educativos y dos para uso general (todas las versiones cuentan con 30 días de prueba gratuita):

1. **Edición educativa estándar** de *Agisoft Metashape*, con un precio de USD 59, que incluye un año de soporte gratuito. La licencia es perpetua con actualizaciones incluidas, trabajo sin conexión y compatible con computadoras *Windows*, *Apple* y *Linux* (para más información visitar directamente la página: <https://n9.cl/qtw0v>).
2. **Edición educativa profesional** de *Agisoft Metashape*, con un precio de USD 529, que incluye un año de soporte gratuito. La licencia es perpetua con actualizaciones incluidas, trabajo sin conexión. Tiene la capacidad de exportar diversas fases del procesamiento como la nube de puntos, modelo 3D, secciones, etc. y compatible con computadoras *Windows*, *Apple* y *Linux* (para más información visitar directamente la página: <https://n9.cl/ou5my>).
3. **Edición estándar** de *Agisoft Metashape*, con un precio de USD 169. Incluyendo las mismas características de la versión educativa, solo que con un precio mayor (para más información visitar directamente la página: <https://n9.cl/lis7v>).
4. **Edición profesional** de *Agisoft Metashape*, con un precio de USD 3,370. Incluyendo las mismas características de la versión educativa, solo que con un precio mayor (para más información visitar directamente la página: <https://n9.cl/110km>).

Para proyectos en los que no es viable incurrir en costos de software, la mejor alternativa en fotogrametría es *Meshroom*, un programa de código abierto para reconstrucción 3D. Este software opera bajo principios similares a los de *Metashape*, transformando imágenes 2D en modelos tridimensionales mediante técnicas de estructura a partir de movimiento. No obstante, *Meshroom* presenta ciertas limitaciones en comparación con soluciones comerciales: su interfaz resulta menos intuitiva, el procesamiento es significativamente más lento y la precisión se reduce en el escaneo de objetos pequeños. Pese a estas restricciones, su accesibilidad lo convierte en una opción viable para entornos académicos o de bajo presupuesto.

La plataforma oficial de descarga (<https://alicevision.org/view/meshroom.html>) incluye un tutorial en video que detalla el proceso de instalación y el uso básico, facilitando la adopción inicial del software.

### **10.1.2. Tiempo y eficiencia operativa**

Si bien el uso de un escáner 3D permite una reducción considerable en los tiempos de procesamiento, su implementación conlleva una mayor inversión inicial. Esto se debe a que, independientemente del dispositivo de captura, sigue siendo indispensable contar con el equipamiento auxiliar común a las técnicas de fotogrametría:

- Plataforma giratoria para piezas pequeñas
- Puntos de control para referencia métrica
- Espacios con iluminación controlada
- Trípodes estables

Algunos dispositivos móviles como el *iPhone 12* en adelante y los *iPads* más recientes, equipados con sensor *LiDAR*, así como los *Samsung Galaxy S22/S23* (y modelos posteriores) con capacidades de escaneo 3D, pueden utilizar aplicaciones como *Scaniverse* para generar modelos tridimensionales. Esta herramienta gratuita resulta práctica para digitalizar artefactos de gran tamaño, como monumentos, pero presenta limitaciones con objetos pequeños (vasijas, figurillas, etc.), ya que no puede unir automáticamente escaneos parciales de una misma pieza. Para estos casos, es necesario complementar el proceso con software de edición 3D como *Blender*, donde se fusionan manualmente los modelos obtenidos.

A continuación, se presenta un ejemplo del tiempo estimado de digitalización de piezas complejas según la técnica empleada, con el propósito de comparar de manera sintética los tiempos de captura y procesamiento de distintos tipos de artefactos arqueológicos.

Tabla 2. Tiempo de las piezas más complicadas dependiendo del método de digitalización empleado.

Pieza (Ejemplo)	Técnica	Tiempo de Captura	Tiempo de Procesamiento	Total	Notas
<b>Piedra dona (SAS-M12-154-4)</b>	Fotogrametría	45 min	135 min ( <i>Agisoft</i> )	<b>3 h</b>	Uso de plastilina como marcadores.
	Escaneo 3D	–	<b>Fallido</b>	–	Superficie reflectante no capturada.
<b>Vasija 1 (SAS-144-4_1)</b>	Fotogrametría	25 min	180 min ( <i>Agisoft</i> )	<b>4 h</b>	Requirió 7 puntos de control manual.
	Escaneo 3D	20 min	15 min ( <i>EXScan</i> )	<b>35 min</b>	Problemas con bordes curvos.
<b>Vasija 1 (SAS-144-4_2)</b>	Fotogrametría	20 min	140 min ( <i>Agisoft</i> )	<b>2.4 h</b>	Edición adicional en <i>Blender</i> .
	Escaneo 3D	20 min	60 min ( <i>EXScan</i> )	<b>1.2 h</b>	Edición adicional en <i>Blender</i> . Problemas con textura.
<b>Vasija 1 (SAS-144-4_3)</b>	Fotogrametría	20 min	160 min ( <i>Agisoft</i> )	<b>3 h</b>	Edición adicional en <i>Blender</i> .
	Escaneo 3D	20 min	140 min ( <i>EXScan</i> )	<b>2.4 h</b>	Edición adicional en <i>Blender</i> .
<b>Figurilla (SAS-194-04)</b>	Fotogrametría	20 min	150 min ( <i>Agisoft</i> )	<b>2.5 h</b>	Edición adicional en <i>Blender</i> .
	Escaneo 3D	20 min	45 seg ( <i>EXScan</i> )	<b>21 min</b>	Alta eficiencia en geometría.
<b>Obsidiana (SAS-193-7)</b>	Fotogrametría	30 min	120 min ( <i>Agisoft</i> )	<b>2.3 h</b>	Iluminación controlada.

	Escaneo 3D	–	<b>Fallido</b>	–	Material translúcido.
<b>Sello cilíndrico (SAS-187-11)</b>	Fotogrametría	90 min	200 min ( <i>Agisoft</i> )	<b>4.8 h</b>	Complejidad en alineación.
	Escaneo 3D	20 min	5 min ( <i>EXScan</i> )	<b>25 min</b>	Óptimo para formas cilíndricas.
<b>Fragmento lítico (SAS-172-4)</b>	Fotogrametría	20 min	60 min ( <i>Agisoft</i> )	<b>1.2 h</b>	2 filas de fotos suficientes.
	Escaneo 3D	-	-	-	-
<b>Lítica (SAS161-4)</b>	Fotogrametría	15 min	115 min ( <i>Agisoft</i> )	<b>2 h</b>	-
	Escaneo 3D	20 min	30 min ( <i>EXScan</i> )	<b>50 min</b>	-
<b>Fragmento de figurilla (SAS-161-2)</b>	Fotogrametría	-	<b>Fallido</b>	-	Superficie reflejante y forma cilíndrica sin muchos detalles.
	Escaneo 3D	20 min	25 min ( <i>EXScan</i> )	<b>45 min</b>	-
<b>Fragmento de figurilla (SAS-163-2)</b>	Fotogrametría	-	-	-	No se realizó fotogrametría.
	Escaneo 3D	20 min	30 min ( <i>EXScan</i> )	<b>50 min</b>	-
<b>Fragmento zoomorfo (SAS-160-7)</b>	Fotogrametría	-	-	-	No se realizó fotogrametría.
	Escaneo 3D	20 min	45 min ( <i>EXScan</i> )	<b>20 min</b>	-
<b>Lítica (SAS-172-4)</b>	Fotogrametría	-	-	-	No se realizó fotogrametría.

	Escaneo 3D	20 min	20 min (EXScan)	<b>40 min</b>	-
<b>Fragmento zoomorfo (SAS-184-2)</b>	Fotogrametría	15 min	55 min (Agisoft)	<b>1.1 h</b>	Pieza rica en morfología.
	Escaneo 3D	20 min	15 min (EXScan)	<b>35 min</b>	.
<b>Fragmento Cerámico (SAS-179-6)</b>	Fotogrametría	-	-	-	No se realizó fotogrametría.
	Escaneo 3D	20 min	20 min (EXScan)	<b>40 min</b>	-
<b>Fragmento Cerámico (SAS-179-7)</b>	Fotogrametría	-	-	-	No se realizó fotogrametría.
	Escaneo 3D	20 min	25 min (EXScan)	<b>45 min</b>	-
<b>Fragmento Cerámico (SAS-178-3)</b>	Fotogrametría	-	-	-	No se realizó fotogrametría.
	Escaneo 3D	20 min	20 min (EXScan)	<b>40 min</b>	-
<b>Fragmento zoomorfo (SAS-194-04)</b>	Fotogrametría	-	-	-	-
	Escaneo 3D	20 min	35 min (EXScan)	<b>55 min</b>	Pieza rica en morfología.
<b>Obsidiana (SAS-193-7)</b>	Fotogrametría	10 min	175 min (Agisoft)	<b>3.05 h</b>	Reflejante. Edición en Blender.
	Escaneo 3D	-	<b>Fallido</b>	-	-
<b>Fragmento Cerámico (SAS-187-11)</b>	Fotogrametría	-	-	-	-
	Escaneo 3D	20 min	45 min (EXScan)	<b>1.05 h</b>	Pieza rica en morfología.

<b>Fragmento zoomorfo (SAS-200-3)</b>	Fotogrametría	-	-	-	-
	Escaneo 3D	30 min	20 min (EXScan)	<b>50 min</b>	Pieza muy pequeña.
<b>Cuenco (SAS-195-3)</b>	Fotogrametría	20 min	140 min (Agisoft)	<b>2.4 h</b>	
	Escaneo 3D	-	<b>Fallido</b>	-	La tierra y forma impidieron que el escaneo saliera bien.
<b>Lítica (SAS-267-1)</b>	Fotogrametría	-	<b>Fallido</b>	-	Muy pequeño.
	Escaneo 3D	-	<b>Fallido</b>	-	Muy pequeño.
<b>Fragmento Cerámico (SAS-215-9)</b>	Fotogrametría	45 min	180 min (Agisoft)	<b>3.4 h</b>	Este partido en 2 fragmentos. Se tomaron todos de los 2 por separado. Se realizo edición en <i>Blender</i> .
	Escaneo 3D	40 min	45 min (EXScan)	<b>2.25 h</b>	Este partido en 2 fragmentos. Se escaneo cada parte por separado.
<b>Lítica (SAS-5A-12-2)</b>	Fotogrametría	15 min	45 min (Agisoft)	<b>1 h</b>	-
	Escaneo 3D	20 min	35 min (EXScan)	<b>55 min</b>	-
<b>Fragmento Cerámico (SAS-5A-15-2)</b>	Fotogrametría	-	-	-	-

	Escaneo 3D	30 min	45 min (EXScan)	<b>1.25 h</b>	Morfología compleja.
<b>Fragmento Cerámico (SAS-5A-9-3-1)</b>	Fotogrametría	-	-	-	-
	Escaneo 3D	20 min	35 min (EXScan)	<b>55 min</b>	-
<b>Fragmento Cerámico (SAS-5A-9-3-2)</b>	Fotogrametría	-	-	-	-
	Escaneo 3D	20 min	41 min (EXScan)	<b>1.01 h</b>	-
<b>Fragmento Cerámico (SAS-5A-8-2)</b>	Fotogrametría	-	-	-	-
	Escaneo 3D	20 min	25 min (EXScan)	<b>45 min</b>	-
<b>Fragmento Cerámico (SAS-5A-7-3-1)</b>	Fotogrametría	-	-	-	-
	Escaneo 3D	20 min	15 min (EXScan)	<b>35 min</b>	-
<b>Fragmento Cerámico (SAS-5A-7-3-2)</b>	Fotogrametría	-	-	-	-
	Escaneo 3D	25 min	25 min (EXScan)	<b>50 min</b>	-
<b>Fragmento Cerámico (SAS-5A-4-9)</b>	Fotogrametría	15 min	35 min (Agisoft)	<b>50 min</b>	-
	Escaneo 3D	20 min	40 min (EXScan)	<b>60 min</b>	-
<b>Fragmento Cerámico (SAS-5A-4-6)</b>	Fotogrametría	-	-	-	-
	Escaneo 3D	20 min	40 min (EXScan)	<b>1 h</b>	Morfología compleja. Pequeño.
<b>Fragmento Cerámico (SAS-5A-4-2)</b>	Fotogrametría	-	<b>Fallido</b>	-	-

	Escaneo 3D	20 min	25 min (EXScan)	<b>45 min</b>	-
<b>Lítica</b> (LÍTICA_1)	Fotogrametría	-	-	-	-
	Escaneo 3D	40 min	50 min (EXScan)	<b>1.3 h</b>	-
<b>Lítica</b> (LÍTICA_2)	Fotogrametría	-	-	-	-
	Escaneo 3D	40 min	60 min (EXScan)	<b>1.4 h</b>	-
<b>Lítica</b> (SAS-201-4)	Fotogrametría	15 min	65 min (Agisoft)	<b>1.2 h</b>	-
	Escaneo 3D	20 min	40 min (EXScan)	<b>1 h</b>	-
<b>Lítica</b> (SAS-230-10)	Fotogrametría	15 min	80 min (Agisoft)	<b>1.35 h</b>	-
	Escaneo 3D	20 min	35 min (EXScan)	<b>55 min</b>	-
<b>Lítica</b> (SAS-248-4)	Fotogrametría	13 min	95 min (Agisoft)	<b>1.43 h</b>	-
	Escaneo 3D	20 min	40 min (EXScan)	<b>1 h</b>	-
<b>Lítica</b> (SAS-11A-1-1)	Fotogrametría	15 min	45 min	<b>1 h</b>	-
	Escaneo 3D	-	-	-	-
<b>Lítica</b> (Lítica_1)	Fotogrametría	-	-	-	-
	Escaneo 3D	35 min	55 min (EXScan)	<b>1.3 h</b>	-
<b>Lítica</b> (Lítica_2)	Fotogrametría	-	-	-	-

	Escaneo 3D	28 min	37 min (EXScan)	<b>1.05 h</b>	
<b>Lítica (Lítica_3)</b>	Fotogrametría	-	-	-	-
	Escaneo 3D	35 min	28 min (EXScan)	<b>1.03 h</b>	-
<b>Lítica (Lítica_4)</b>	Fotogrametría	-	-	-	-
	Escaneo 3D	30 min	22 min (EXScan)	<b>52 min</b>	-
<b>Lítica (Lítica_5)</b>	Fotogrametría	-	-	-	-
	Escaneo 3D	25 min	32 min (EXScan)	<b>57 min</b>	-
<b>Fragmento Cerámico (NARANJA GLOSSY P.T)</b>	Fotogrametría	-	-	-	-
	Escaneo 3D	15 min	25 min (EXScan)	<b>40 min</b>	
<b>Fragmento Cerámico (NEGRO BURDO_1 P.M)</b>	Fotogrametría	-	-	-	-
	Escaneo 3D	15 min	17 min (EXScan)	<b>32 min</b>	
<b>Fragmento Cerámico (NEGRO_1 P.M)</b>	Fotogrametría	10 min	45 min (Agisoft)	<b>55 min</b>	Edición de textura y morfología en <i>Blender</i> .
	Escaneo 3D	15 min	16 min (EXScan)	<b>31 min</b>	Luz más baja, caja de luz sin luz, mejores resultados para el color negro.
<b>Fragmento Cerámico (NEGRO_2 P.M)</b>	Fotogrametría	10 min	35 min (Agisoft)	<b>45 min</b>	Se necesito orientación manual.

	Escaneo 3D	-	-	-	-
<b>Fragmento Cerámico (SANTA MARTA_1 P.M)</b>	Fotogrametría	-	-	-	-
	Escaneo 3D	15 min	32 min (EXScan)	<b>42 min</b>	Morfología compleja. Buena orientación automática.
<b>Fragmento Cerámico (PRECLÁSICOS_1)</b>	Fotogrametría	10 min	60 min (Agisoft)	<b>1.1 h</b>	Se necesita edición especial por el color de pasta y engobe.
	Escaneo 3D	15 min	13 min (EXScan)	<b>28 min</b>	Edición dentro de EXScan y Blender de color del engobe.
<b>Fragmento Cerámico (PRECLÁSICOS_2)</b>	Fotogrametría	10 min	35 min (Agisoft)	<b>45 min</b>	-
	Escaneo 3D	15 min	22 min (EXScan)	<b>37 min</b>	-
<b>Fragmento Cerámico (PRECLÁSICOS_3)</b>	Fotogrametría	10 min	31 min (Agisoft)	<b>41 min</b>	-
	Escaneo 3D	15 min	17 min (EXScan)	<b>32 min</b>	-
<b>Fragmento Cerámico (_CAFÉ ROJIZO_1 C.T)</b>	Fotogrametría	10 min	22 min (Agisoft)	<b>32 min</b>	-
	Escaneo 3D	15 min	21 min (EXScan)	<b>36 min</b>	-
<b>Fragmento Cerámico (_CAFÉ ROJIZO_2 C.T)</b>	Fotogrametría	10 min	32 min (Agisoft)	<b>42 min</b>	-
	Escaneo 3D	15 min	21 min (EXScan)	<b>36 min</b>	-

<b>Fragmento Cerámico (_CAFÉ ROJIZO_3 C.T)</b>	Fotogrametría	10 min	32 min (Agisoft)	<b>42 min</b>	-
	Escaneo 3D	15 min	17 min (EXScan)	<b>32 min</b>	-
<b>Fragmento Cerámico (_NARANJA_1 C.T)</b>	Fotogrametría	-	-	-	-
	Escaneo 3D	15 min	12 min (EXScan)	<b>27 min</b>	-
<b>Fragmento Cerámico (_NARANJA_2 C.T)</b>	Fotogrametría	-	-	-	-
	Escaneo 3D	15 min	16 min (EXScan)	<b>31 min</b>	-
<b>Fragmento Cerámico (_NARANJA_3 C.T)</b>	Fotogrametría	-	-	-	-
	Escaneo 3D	15 min	22 min (EXScan)	<b>37 min</b>	-
<b>Fragmento Cerámico (_NARANJA_4 C.T)</b>	Fotogrametría	-	-	-	-
	Escaneo 3D	17 min	23 min (EXScan)	<b>40 min</b>	-
<b>Fragmento Cerámico (_NARANJA_5 C.T)</b>	Fotogrametría	-	-	-	-
	Escaneo 3D	15 min	13 min (EXScan)	<b>28 min</b>	-
<b>Fragmento Cerámico (SEMETRAS CAFÉ_1 C.T)</b>	Fotogrametría	-	-	-	-
	Escaneo 3D	18 min	22 min (EXScan)	<b>40 min</b>	Parte exterior complicada. Se necesitaron 3 giros de escaneo distintos.

<b>Fragmento Cerámico (SEMETRAS CAFÉ_2 C.T)</b>	Fotogrametría	-	-	-	-
	Escaneo 3D	15 min	18 min (EXScan)	<b>33 min</b>	-
<b>Fragmento Cerámico (SEMETRAS CAFÉ_3 C.T)</b>	Fotogrametría	-	-	-	-
	Escaneo 3D	15 min	10 min (EXScan)	<b>25 min</b>	-
<b>Fragmento Cerámico (SEMETRAS CAFÉ_4 C.T)</b>	Fotogrametría	-	-	-	-
	Escaneo 3D	15 min	8 min (EXScan)	<b>23 min</b>	-
<b>Fragmento Cerámico (SEMETRAS CAFÉ_5 C.T)</b>	Fotogrametría	-	-	-	-
	Escaneo 3D	15 min	11 min (EXScan)	<b>26 min</b>	-
<b>Fragmento Cerámico (NEGRO PULIDO_1 C.T)</b>	Fotogrametría	-	-	-	-
	Escaneo 3D	15 min	7 min (EXScan)	<b>22 min</b>	-
<b>Fragmento Cerámico (NEGRO PULIDO_2 C.T)</b>	Fotogrametría	-	-	-	-
	Escaneo 3D	15 min	9 min (EXScan)	<b>24 min</b>	-
<b>Fragmento Cerámico (_NEGRO_1 C.T)</b>	Fotogrametría	-	-	-	-
	Escaneo 3D	15 min	12 min (EXScan)	<b>27 min</b>	-
<b>Fragmento Cerámico (_NEGRO_2 C.T)</b>	Fotogrametría	-	-	-	-
	Escaneo 3D	15 min	47 min (EXScan)	<b>1.02 h</b>	-

<b>Fragmento Cerámico (NARANJA SANTA MARTA_1 C.T)</b>	Fotogrametría	-	-	-	-
	Escaneo 3D	15 min	18 min (EXScan)	<b>32 min</b>	-
<b>Fragmento Cerámico (NARANJA SANTA MARTA_2 C.T)</b>	Fotogrametría	10 min	32 min (Agisoft)	<b>42 min</b>	-
	Escaneo 3D	15 min	17 min (EXScan)	<b>32 min</b>	-
<b>Fragmento Cerámico (NARANJA SANTA MARTA_3 C.T)</b>	Fotogrametría	10 min	12 min (Agisoft)	<b>22 min</b>	-
	Escaneo 3D	15 min	8 min (EXScan)	<b>23 min</b>	-
<b>Fragmento Cerámico (NARANJA SANTA MARTA_4 C.T)</b>	Fotogrametría	10 min	13 min (Agisoft)	<b>23 min</b>	-
	Escaneo 3D	15 min	11 min (EXScan)	<b>26 min</b>	-
<b>Fragmento Cerámico (PASTA ROJA_1 C.T)</b>	Fotogrametría	10 min	12 min (Agisoft)	<b>22 min</b>	-
	Escaneo 3D	15 min	6 min (EXScan)	<b>21 min</b>	-
<b>Fragmento Cerámico (PASTA ROJA_2 C.T)</b>	Fotogrametría	-	-	-	-
	Escaneo 3D	15 min	9 min (EXScan)	<b>24 min</b>	-
<b>Fragmento Cerámico (PASTA ROJA_3 C.T)</b>	Fotogrametría	-	-	-	-
	Escaneo 3D	15 min	<b>Fallido</b>	-	Morfología y color inconsistentes para un modelo final fiable.
<b>Fragmento Cerámico (PASTA ROJA_1 C.T)</b>	Fotogrametría	10 min	21 min (Agisoft)	<b>31 min</b>	-

	Escaneo 3D	15 min	min (EXScan)		
<b>Fragmento Cerámico (PASTA ROJA_2 C.T)</b>	Fotogrametría	-	-	-	-
	Escaneo 3D	15 min	18 min (EXScan)	<b>33 min</b>	-
<b>Fragmento Cerámico (CAFÉ BURDO_1 C.T)</b>	Fotogrametría	10 min	35 min (Agisoft)	<b>45 min</b>	Edición mejorada durante la fotogrametría.
	Escaneo 3D	15 min	20 min (EXScan)	<b>35 min</b>	Textura fallida por el color oscuro.
<b>Fragmento Cerámico (CAFÉ BURDO_2 C.T)</b>	Fotogrametría	10 min	48 min (Agisoft)	<b>58 min</b>	-
	Escaneo 3D	-	-	-	-
<b>Fragmento Cerámico (CAFÉ BURDO_3 C.T)</b>	Fotogrametría	10 min	55 min (Agisoft)	<b>1.05 h</b>	-
	Escaneo 3D	-	-	-	-
<b>Fragmento Cerámico (ESPERANZA FLESH_1 C.T)</b>	Fotogrametría	10 min	55 min (Agisoft)	<b>1.05 h</b>	-
	Escaneo 3D	15 min	25 min (EXScan)	<b>40 min</b>	-
<b>Fragmento Cerámico (ESPERANZA FLESH_2 C.T)</b>	Fotogrametría	10 min	33 min (Agisoft)	<b>43 min</b>	-
	Escaneo 3D	15 min	24 min (EXScan)	<b>39 min</b>	-
<b>Fragmento Cerámico (ESPERANZA FLESH_3 C.T)</b>	Fotogrametría	10 min	20 min (Agisoft)	<b>30 min</b>	-
	Escaneo 3D	15 min	11 min (EXScan)	<b>26 min</b>	-

<b>Fragmento Cerámico (CAFÉ NARANJA_1 C.T)</b>	Fotogrametría	-	-	-	-
	Escaneo 3D	15 min	26 min (EXScan)	<b>41 min</b>	-
<b>Fragmento Cerámico (CAFÉ NARANJA_2 C.T)</b>	Fotogrametría	-	-	-	-
	Escaneo 3D	20 min	32 min (EXScan)	<b>52 min</b>	-
<b>Fragmento Cerámico (CAFÉ NARANJA_3 C.T)</b>	Fotogrametría	-	-	-	-
	Escaneo 3D	20 min	26 min (EXScan)	<b>46 min</b>	-
<b>Fragmento Cerámico (CAFÉ NARANJA_4 C.T)</b>	Fotogrametría	-	-	-	-
	Escaneo 3D	15 min	46 min (EXScan)	<b>1.01 h</b>	-
<b>Fragmento Cerámico (CAFÉ NARANJA_5 C.T)</b>	Fotogrametría	-	-	-	-
	Escaneo 3D	15 min	21 min (EXScan)	<b>36 min</b>	-
<b>Fragmento Cerámico (CAFÉ NARANJA ROSADO_1 C.T)</b>	Fotogrametría	-	-	-	-
	Escaneo 3D	15 min	22 min (EXScan)	<b>37 min</b>	-
<b>Fragmento Cerámico (CAFÉ NARANJA ROSADO_2 C.T)</b>	Fotogrametría	-	-	-	-
	Escaneo 3D	15 min	31 min (EXScan)	<b>46 min</b>	-
<b>Fragmento Cerámico (CAFÉ NARANJA ROSADO_3 C.T)</b>	Fotogrametría	-	-	-	-
	Escaneo 3D	15 min	29 min (EXScan)	<b>44 min</b>	-

<b>Fragmento Cerámico (CAFÉ NARANJA ROSADO_4 C.T)</b>	Fotogrametría	-	-	-	-
	Escaneo 3D	15 min	36 min (EXScan)	<b>51 min</b>	-
<b>Fragmento Cerámico (CAFÉ PULIDO_1 C.T)</b>	Fotogrametría	10 min	35 min (Agisoft)	<b>45 min</b>	-
	Escaneo 3D	15 min	27 min (EXScan)	<b>42 min</b>	-
<b>Fragmento Cerámico (CAFÉ ROJIZO_1_ C.T)</b>	Fotogrametría	10 min	32 min (Agisoft)	<b>42 min</b>	-
	Escaneo 3D	15 min	25 min (EXScan)	<b>40 min</b>	-
<b>Fragmento Cerámico (CAFÉ ROJIZO_2_ C.T)</b>	Fotogrametría	10 min	25 min (Agisoft)	<b>35 min</b>	-
	Escaneo 3D	15 min	12 min (EXScan)	<b>27 min</b>	-
<b>Fragmento Cerámico (CAFÉ ROJIZO_3_ C.T)</b>	Fotogrametría	10 min	40 min (Agisoft)	<b>50 min</b>	-
	Escaneo 3D	15 min	26 min (EXScan)	<b>41 min</b>	-
<b>Fragmento Cerámico (NARANJA_1 C.T)</b>	Fotogrametría	10 min	35 min (Agisoft)	<b>45 min</b>	-
	Escaneo 3D	15 min	12 min (EXScan)	<b>27 min</b>	-
<b>Fragmento Cerámico (NARANJA_2 C.T)</b>	Fotogrametría	10 min	min (Agisoft)	<b>min</b>	-
	Escaneo 3D	-	-	-	-
<b>Fragmento Cerámico (NARANJA_3 C.T)</b>	Fotogrametría	10 min	37 min (Agisoft)	<b>47 min</b>	-
	Escaneo 3D	-	-	-	-

<b>Fragmento Cerámico (NEGRO_1 C.T)</b>	Fotogrametría	-	-	-	-
	Escaneo 3D	25 min	26 min (EXScan)	<b>51 min</b>	-
<b>Fragmento Cerámico (NEGRO_2 C.T)</b>	Fotogrametría	-	-	-	-
	Escaneo 3D	15 min	28 min (EXScan)	<b>43 min</b>	-
<b>Fragmento Cerámico (SANTA MARTA C.T)</b>	Fotogrametría	-	-	-	-
	Escaneo 3D	15 min	12 min (EXScan)	<b>27 min</b>	-
<b>Fragmento Cerámico (_SEMETABAJ CAFÉ_1 C.T)</b>	Fotogrametría	15 min	<b>Fallido</b>		Morfología complicada. Tamaño pequeño.
	Escaneo 3D	10 min	<b>Fallido</b>	-	Color y reflejo complicado.
<b>Fragmento Cerámico (XUC_1 C.T)</b>	Fotogrametría	-	-	-	-
	Escaneo 3D	25 min	<b>Fallido</b>	-	Pasta reflejante.
<b>Fragmento Cerámico (SANTA MARTA_1 C.T.A)</b>	Fotogrametría	12 min	31 min (Agisoft)	<b>43 min</b>	Fotografías extras por incisiones de decoración.
	Escaneo 3D	15 min	16 min (EXScan)	<b>31 min</b>	-
<b>Fragmento Cerámico (SANTA MARTA_2 C.T.A)</b>	Fotogrametría	16 min	35 min (Agisoft)	<b>51 min</b>	-
	Escaneo 3D	15 min	16 min (EXScan)	<b>31 min</b>	-
<b>Fragmento Cerámico (SANTA MARTA_3 C.T.A)</b>	Fotogrametría	20 min	40 min (Agisoft)	<b>1 h</b>	Fotografías extras por

					zonas no visibles.
	Escaneo 3D	15 min	25 min (EXScan)	<b>40 min</b>	-
<b>Fragmento Cerámico (SANTA MARTA_4 C.T.A)</b>	Fotogrametría	10 min	45 min (Agisoft)	<b>55 min</b>	-
	Escaneo 3D	-	-	-	-
<b>Fragmento Cerámico (_NARANJA_1_ C.T.A)</b>	Fotogrametría	10 min	45 min (Agisoft)	<b>55 min</b>	-
	Escaneo 3D	-	-	-	-
<b>Fragmento Cerámico (_NARANJA_2_ C.T.A)</b>	Fotogrametría	10 min	59 min (Agisoft)	<b>1.09 h</b>	-
	Escaneo 3D	-	-	-	-
<b>Fragmento Cerámico (_AMATLE_ C.T.A)</b>	Fotogrametría	10 min	35 min (Agisoft)	<b>45 min</b>	-
	Escaneo 3D	15 min	20 min (EXScan)	<b>35 min</b>	-
<b>Fragmento Cerámico (NEGRO_1 C.T.A)</b>	Fotogrametría	-	-	-	-
	Escaneo 3D	15 min	9 min (EXScan)	<b>24 min</b>	-
<b>Fragmento Cerámico (NEGRO_2 C.T.A)</b>	Fotogrametría	-	-	-	-
	Escaneo 3D	15 min	18 min (EXScan)	<b>33 min</b>	-
<b>Fragmento Cerámico (NEGRO_3 C.T.A)</b>	Fotogrametría	10 min	45min (Agisoft)	<b>55 min</b>	-

	Escaneo 3D	-	-	-	-
<b>Fragmento Cerámico (NEGRO PULIDO_ C.T.A)</b>	Fotogrametría	.	.	.	.
	Escaneo 3D	15 min	48 min (EXScan)	<b>58 min</b>	-
<b>Fragmento Cerámico (ROJO C.T.A)</b>	Fotogrametría	10 min	20 min (Agisoft)	<b>30 min</b>	-
	Escaneo 3D	15 min	8 min (EXScan)	<b>23 min</b>	-
<b>Fragmento Cerámico (GRIS_AMARILLEN TO_1 C.T.A)</b>	Fotogrametría	-	-	-	-
	Escaneo 3D	15 min	25 min (EXScan)	<b>40 min</b>	-
<b>Fragmento Cerámico (GRIS_AMARILLEN TO_2 C.T.A)</b>	Fotogrametría	-	-	-	-
	Escaneo 3D	15 min	26 min (EXScan)	<b>41 min</b>	-
<b>Fragmento Cerámico (GRIS_AMARILLEN TO_3 C.T.A)</b>	Fotogrametría	-	-	-	-
	Escaneo 3D	15 min	32 min (EXScan)	<b>47 min</b>	-
<b>Fragmento Cerámico (CAFÉ ROJIZO_1 C.T.A)</b>	Fotogrametría	-	-	-	-
	Escaneo 3D	15 min	25 min (EXScan)	<b>40 min</b>	-
<b>Fragmento Cerámico (CAFÉ NARANJA C.T.A)</b>	Fotogrametría	-	-	-	-
	Escaneo 3D	15 min	32 min (EXScan)	<b>47 min</b>	-

Total, tiempo fotogrametría: 4,788.8 min

Total, tiempo Escaneo 3D: 2,486.45 min

Relación= (Tiempo Fotogrametría/Tiempo Escaneo 3D) \* 100%

= (4,788.8/2,486.45) \* 100%= 192.6%

Esto indica que, en promedio, la fotogrametría tomo 92.6% más tiempo que el escaneo 3D para las piezas donde ambos métodos fueron exitosos.

### 10.1.3. Precisión y calidad de resultados

A pesar de que no se pudieron probar más métodos de registro tridimensional de artefactos, como los escáneres de luz estructurada o las tomografías, por el momento se puede concluir que para piezas con superficies reflectantes o translúcidas es mejor utilizar la fotogrametría. Esto debido a las dificultades que el escáner 3D presentó con superficies translúcidas. La fotogrametría, con iluminación controlada y edición en *Photoshop* para reducir reflejos, ofrece mejores resultados.

- En el caso de piezas pequeñas o con geometrías complejas es más recomendable el escaneo 3D. Esto debido a que el escáner captura con mayor precisión detalles morfológicos en piezas pequeñas y con cavidades o relieves, resaltando el ahorro de tiempo en comparación de la fotogrametría.
- El escaneo 3D ofrece mejores resultados en piezas cilíndricas o piezas con bordes rectos. La ventaja es la orientación automática que el escaneo provee, mientras que en fotogrametría este proceso se realiza desde que se toman las fotos hasta la edición digital, por lo cual el tiempo de escaneo y calidad proveen un resultado satisfactorio y útil.
- Para las piezas grandes o con texturas detalladas es más útil la fotogrametría, esencialmente por la captura de texturas y decoraciones superficiales. En este sentido, *Metashape es una herramienta superior* por los metadatos que genera. Además, las fotografías resultan útiles para análisis posteriores. Aunque cada una tiene ventajas en ciertos artefactos, las dos pueden complementarse como en el caso de piezas fragmentadas. Aquí, el escaneo 3D permite una digitalización de cada

fragmento por separado con precisión geométrica, mientras que la fotogrametría ayuda en la reconstrucción virtual de las piezas unidas.

Para piezas de gran tamaño también se puede recurrir a otros tipos de scanner 3D, ya que el que se utilizó para este trabajo es de escritorio, limitado a una base giratoria. En el mercado existe una gran gama de escáneres de diferentes marcas para uso industrial como *Peel 3D*, *Faro*, *Creaform*, *Zeiss*, *Hexagon* y *Shining 3D*, mencionando solo las más conocidas. Para Guatemala, la marca *Shining 3D* cubre todas las necesidades para arqueología, teniendo costos bajos, empezando por el *EinScan SE* con un precio aproximado de US\$ 1,000 a US\$ 1,500 y el más caro que es el *FreeScan UE Pro* con un precio aproximado de US\$ 30,000 a US\$ 50,000.

En este sentido el enfoque técnico y ambiente en donde se realizaron los modelos, tienen influencia directa sobre el proceso. Ese decir, las condiciones ambientales constituyeron un factor determinante en la calidad del registro. La temporada de lluvias en San Andrés Semetabaj obligó a prescindir de la luz natural, exigiendo un control riguroso de la iluminación artificial en el laboratorio para complementar la luz del escáner y la caja de luz. No obstante, el clima templado de la región favoreció el rendimiento óptimo de los equipos, evitando sobrecalentamiento común en zonas de Tierras Bajas. Una observación relevante de este entorno controlado fue que la exposición lumínica del escáner permitió revelar pigmentaciones y detalles superficiales imperceptibles a simple vista.

#### **10.1.4. Ámbito legal**

El ámbito legal, empezando con el Decreto 26-97 de Guatemala, presenta un vacío gigantesco. Falta una regulación explícita para modelos 3D y digitales, ya que la ley actual no define si los modelos 3D son “réplicas” o “documentación técnica”, lo que genera una ambigüedad en su protección. Teniendo también una ausencia de protocolos para digitalización 3D, no existen requisitos para validar científicamente los modelos digitales. Por lo cual, como recomendación, debe definirse claramente lo que es “patrimonio digital” y “documentación tridimensional”, así como establecer lineamientos para fotogrametría y escaneo láser en proyectos. Se puede considerar también exigir que se incluyan modelos 3D en informes técnicos entregados al Estado.

En el Decreto 33-98 los modelos 3D pueden considerarse obras derivadas que generan derechos para el creador del modelo (derechos patrimoniales) y para el Estado (como titular de los bienes originales). Eso sigue siendo muy ambiguo, generando vacíos legales que se tienen que cubrir si se toma en cuenta que Guatemala firmó la Convención de la UNESCO de 2003 sobre Patrimonio Digital, pero no la implementa. Se pueden generar en primera instancia licencias claras para uso de modelos considerando: Uso académico, comercial y de divulgación, apoyando principalmente a los departamentos de arqueología de la Universidad San Carlos de Guatemala y la Universidad del Valle de Guatemala.

Limitar legalmente los modelos 3D no es una opción viable, ya que presentan una oportunidad única para la divulgación y educación desde nivel primaria a secundaria del país. Se debe promover más la educación del pasado de Guatemala y para la arqueología la digitalización e impresión 3D es una oportunidad única. En conclusión, en la parte legal, se requiere una actualización para abordar específicamente los desafíos de la arqueología digital, equilibrando la protección efectiva del patrimonio, fomento a la innovación tecnológica, derechos de las comunidades originarias a los formatos digitales y el acceso público al conocimiento.

Tenemos dos ejemplos sobre marcos legales, propiedad y acceso digital. En Argentina, la protección del patrimonio digital se articula mediante la intersección de tres normativas. En primer lugar, la protección del bien material arqueológico es absoluta bajo la Ley 25.743, que establece el dominio público del Estado sobre los objetos físicos, impidiendo su comercialización privada. Esto implica que la digitalización no transfiere la propiedad del objeto real (Argentina. Congreso de la Nación 2003).

En cuanto al archivo digital resultante (el modelo 3D), la situación se rige por la Ley 11.723 de Propiedad intelectual. Esta ley protege las obras científicas, literarias y artísticas, pero su aplicación a modelos 3D (especialmente escaneos fieles) depende de la interpretación de “originalidad” y la marca o huella personal del autor (Argentina. Congreso de la Nación 1933). Finalmente, en el ámbito académico y científico, la Ley 26.899 introduce una obligación crucial: los datos primarios de investigación (incluyendo nubes de puntos y modelos 3D) financiados con fondos públicos deben ser depositados en

repositorios de acceso abierto, garantizando su disponibilidad pública (Argentina. Congreso de la Nación 2013).

En el segundo caso, España presenta un marco actualizado por directivas europeas. La ley 16/1985 es la base de la protección del patrimonio físico. Sin embargo, la gran innovación legal proviene de la transportación de normativas europeas mediante el Real Decreto-ley 24/2021. Este decreto establece explícitamente que las reproducciones fieles de obras visuales de dominio público no están sujetas a derechos de autor o derechos a fines, a menos que el material resultante sea original en el sentido de ser una creación intelectual propia del autor (España. Jefatura del Estado de España 2021). Además, la estrategia de digitalización se alinea con la Recomendación de la Unión Europea 2021/1970, que insta a los Estados miembros a digitalizar en 3D el 40% de los bienes más amenazados para 2030, fomentando la reutilización de estos datos (Comisión Europea 2021).

En conclusión, ante la ambigüedad normativa actual, resulta imperativo actualizar el marco legal guatemalteco para que aborde específicamente los desafíos inherentes a la arqueología digital. Esta reforma debe lograr un equilibrio armónico entre la protección rigurosa del patrimonio cultural y el fomento de la innovación tecnológica, garantizando simultáneamente los derechos de las comunidades originarias sobre su legado digital y asegurando la democratización del acceso al conocimiento.

En esencia todo esto nos devuelve a la arqueología pública. Se debe entender que, frente al proceso histórico del país, Guatemala ha atravesado por procesos fuertes desde la independencia, siendo el más significativo el conflicto armado interno. La arqueología pública en el país debe garantizar que el conocimiento generado sobre el pasado pertenezca a sus descendientes, utilizando la tecnología para acercarlos este patrimonio y poner en valor su gran legado.

#### **10.1.5. Accesibilidad**

Los precios en Guatemala suelen variar según el proveedor del escáner 3D. En el país, existe muy pocos distribuidores que ofrecen un escáner 3D. Siendo tan limitada la oferta y calidad en el país, se recomienda comparar precios con distribuidores establecidos en Estados Unidos o China, ya que suelen proporcionar períodos de garantía extensos y mejor

soporte técnico. Por lo cual lo más accesible es la fotogrametría debida que el equipo básico requiere una cámara profesional o incluso un teléfono celular y existe una variedad de softwares para hacer fotogrametría. Si bien los costos de implementación pueden resultar elevados en ciertos casos, existen alternativas accesibles que permiten incorporar estas tecnologías. Se recomienda la aplicación sistemática de estos métodos en los proyectos arqueológicos, ya que no solo optimizan los procesos de registro documental sino también facilitan la difusión científica con la comunidad académica y el público en general.

Es necesario realizar un desglose de costos para contar con una visión clara y estructurada de las inversiones necesarias para implementar técnicas de registro 3D en proyectos arqueológicos, adaptándose a distintos niveles de presupuesto. Las recomendaciones para reducir costos incluyen las colaboraciones institucionales y el uso de licencias educativas.

Tabla 3. Desglose de inversión inicial para Arqueología 3D

<b>Concepto</b>	<b>Opción Económica (USD)</b>	<b>Opción Intermedia (USD)</b>	<b>Opción Profesional (USD)</b>	<b>Notas</b>
<b>Cámara fotográfica</b>	Smartphone (iPhone/Android) (\$0 si ya se tiene)	Camara réflex (ej. Canon T7: <b>\$400 aprox</b> )	Cámara profesional (ej. Sony A7R: <b>\$2,500</b> )	Necesaria para fotogrametría.
<b>Escáner 3D</b>	<i>No aplica</i>	Escáner básico (ej. EinScan-SE: <b>\$1,500</b> )	Escáner profesional (ej. Artec Leo: <b>\$9,000</b> )	Opcional según necesidades.
<b>Computadora</b>	Laptop básica (16GB RAM: <b>\$800</b> )	Laptop avanzada (32GB RAM + GPU: <b>\$1,800</b> )	Estación de trabajo (64GB RAM + GPU RTX: <b>\$3,500</b> )	Crítica para procesar modelos 3D.
<b>Software</b>	<i>Código abierto</i> (Meshroom: <b>\$0</b> )	<i>Agisoft Metashape</i> (Educación: <b>\$59</b> )	<i>Agisoft Pro + Blender</i> ( <b>\$3,370 + \$0</b> )	Licencias perpetuas o anuales.
<b>Accesorios</b>	Trípode (\$50) + Luz artificial (\$100)	Base giratoria (\$200) + Difusores (\$150)	Kit profesional (luces polarizadas + soportes: <b>\$1,000</b> )	Mejora calidad de captura.
<b>Total Inversión</b>	<b>US\$ 950</b>	<b>US\$ 4,109</b>	<b>US\$ 32,370</b>	

La impresión 3D y los modelos virtuales actúan como puentes para la identidad cultural. Al imprimir una réplica de una pieza que está almacenada en una bodega en la Ciudad de Guatemala y llevarla a una comunidad, se está cumpliendo con la función del arqueólogo como “intelectual público” (Tarlow 2009). El arqueólogo deja de ser solo un extractor de datos para convertirse en un facilitador que devuelve el patrimonio a sus herederos culturales.

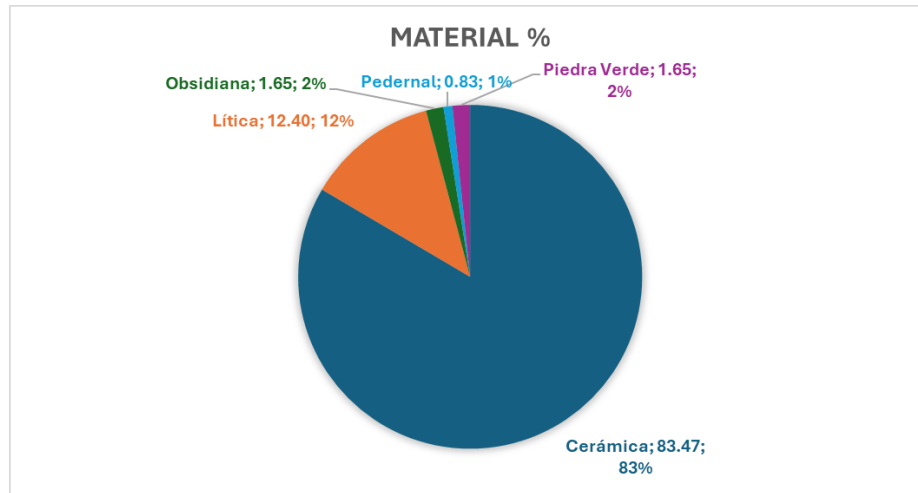
Esto valida la hipótesis de que la tecnología 3D no es un lujo técnico, sino una necesidad para la arqueología pública pluralista en países donde el acceso a los museos es limitado (Matsuda 2004). La tecnología permite que el objeto recupere su “vida social” al reintegrarse en las dinámicas comunitarias y educativas locales, algo clave para la valoración del patrimonio (Morales-Forte et al. 2021).

## **10.2. Muestrario final**

El muestrario culminó con éxito después de dos años de trabajo, en los cuales la comparación de metodología de ambos métodos de digitalización permitió observar problemáticas y resolver algunas en el proceso de digitalización de artefactos. Se espera publicar el muestrario en *Sketchfab* y en el repositorio digital de UVG.

Durante la elaboración de esta tesis, se colaboró con Renato Estrada, estudiante de Ciencias de la computación de la Universidad del Valle de Guatemala, para desarrollar un museo de realidad virtual. Este proyecto dio como resultado un ecomuseo virtual exitoso, creado a partir de los modelos 3D generados durante la investigación.

Como parte del proceso, fue necesario exportar los modelos al formato FBX, distintivo al empleado en el trabajo original mediante *Blender* y que es un estándar ampliamente utilizado que optimiza su integración en *Unity* para entornos de realidad virtual.



Gráfica 3. Porcentaje de materiales escaneados, siendo en su mayoría cerámicos incluyendo tiestos, vasijas, figurillas, etc.

La creación de este muestrario 3D no debe verse únicamente como un logro técnico de registro, sino como un medio para democratizar el acceso al patrimonio. La experiencia en Petén con tecnologías digitales interactivas subraya que estos recursos pueden aliviar la alineación del público no académico frente a lenguajes técnicos o publicaciones inaccesibles (Morales-Forte et al. 2021). Al integrar modelos 3D en plataformas de acceso libre, se responde a la necesidad de una arqueología más inclusiva que fomente el dialogo pluralista.

## 11. CONCLUSIONES

Se observó que la aplicación combinada de fotogrametría y escaneo 3D representa un avance significativo para el registro, estudio y divulgación del patrimonio arqueológico en Guatemala. A través de la creación del muestrario virtual con artefactos del sitio Semetabaj, se comprobó que estas tecnologías no son exclusivas de contextos con gran presupuesto, sino que pueden implementarse de forma accesible y eficiente.

El análisis comparativo evidenció que cada técnica posee ventajas específicas según las características del artefacto. La fotogrametría resultó superior para el registro de superficies reflectantes como la piedra verde y cerámica con engobe pulido, además de ofrecer una documentación técnica detallada y metadatos valiosos para la investigación. Por su parte, el escaneo 3D mostró una eficiencia notable en el registro de geometrías cilíndricas y texturas detalladas, reduciendo los tiempos de procesamiento y postproducción, aunque con una inversión inicial mayor.

Tabla 4. Resumen en qué tipo de pieza funciona mejor el método de escaneo 3D o de fotogrametría.

<b>Característica de la pieza</b>	<b>Técnica recomendada</b>	<b>Ventajas</b>
Superficies reflectantes/translúcidas	Fotogrametría	Mejor manejo de reflejos con edición previa.
Pequeñas/geometrías complejas	Fotogrametría	Precisión y rapidez.
Cilíndricas/bordes rectos	Escaneo 3D	Orientación automática.
Grandes/texturas detalladas	Fotogrametría	Captura de detalles y metadatos.
Fracturadas	Ambas	Escaneo para partes; fotogrametría para unión.

Se identificaron y solucionaron desafíos técnicos recurrentes, como la reflectancia, las geometrías complejas y el impacto negativo de las marcas de esmalte en la digitalización. La experiencia permitió elaborar una guía práctica ubicada en anexos que

optimiza los flujos de trabajo y hace viable la adopción de estas metodologías en proyectos arqueológicos locales.

Más allá de la documentación, este trabajo subraya el potencial de los modelos 3D como herramientas de arqueología pública y ciencia abierta. Facilitan el acceso remoto a colecciones, permiten la creación de réplicas físicas mediante impresión 3D para fines educativos y museográficos y abren nuevas vías de investigación colaborativa. La implementación de estas técnicas en Guatemala no solo mejora la precisión del registro arqueológico, sino que asegura la preservación digital del patrimonio y fomenta su divulgación inclusiva, cumpliendo así con la responsabilidad de compartir el conocimiento del pasado con la academia y la sociedad general.

La cuestión de la accesibilidad tecnológica nos reconduce a los principios fundamentales de la arqueología pública. Es imperativo comprender la práctica arqueológica dentro del contexto histórico de Guatemala, una nación marcada por transformaciones profundas desde su independencia y, de manera significativa, por el conflicto armado interno. En este escenario, la arqueología pública debe estar al servicio de la sociedad, garantizando que el conocimiento generado sobre el pasado retorne a los descendientes de este patrimonio. Las tecnologías 3D, por lo tanto, no son solo herramientas de registro, sino el medio idóneo para acercar este legado a la población y reafirmar su valor como parte de la identidad cultural de los pueblos del país.

Finalmente, no se debe perder de vista que se trabaja con cultura material que en su momento poseyó una rica vida social, estableciendo un diálogo continuo entre el pasado, el presente y el futuro. Por tanto, el tratamiento de estas piezas exige un respeto absoluto, análogo al valor y cuidado que en la actualidad otorgamos a nuestros bienes personales más preciados y herramientas de vida diaria. Estos artefactos no fueron meros objetos inertes, sino elementos cargados de significado para quienes nos precedieron. Bajo esta misma premisa ética debe abordarse el patrimonio digital generado; los modelos 3D no deben concebirse como simples copias virtuales, sino como extensiones que capturan y preservan una parte fundamental de la esencia y la historia de la pieza original.

## 12. BIBLIOGRAFÍA

- Aparicio Resco, Pablo. 2013. *Arqueología virtual para la documentación, análisis y difusión del patrimonio: El horno de cal de Montesa (Valencia)*. Castellón de la Plana: e-DitARX Publicaciones Digitales.
- Argentina. Congreso de la Nación. 1998. *Ley 11.723: Régimen Legal de la Propiedad Intelectual*. Boletín Oficial, 11 de noviembre.
- Argentina. Congreso de la Nación. 2003. *Ley 25.743: Protección del Patrimonio Arqueológico y Paleontológico*. Boletín Oficial, 26 de junio.
- Argentina. Congreso de la Nación. 2013. *Ley 26.899: Creación de Repositorios Digitales Institucionales de Acceso Abierto, Propio o Compartido*. Boletín Oficial, 9 de diciembre.
- Arredondo, Ernesto, y Diego López. 2022. "Proyecto Arqueológico Semetabaj - Aplicación de Tecnología 3D en Artefactos Arqueológicos". En *Informe Final*, 101-107. Guatemala: Centro de Investigaciones Arqueológicas y Antropológicas.
- Barceló, Juan A., y Oriol Vicente. 2011. "Qué hacer con un modelo arqueológico virtual. Aplicaciones de la inteligencia artificial en visualización científica". *Virtual Archaeology Review* 2 (4): 53-57.
- Canuto, Marcello A., Francisco Estrada-Belli, Thomas G. Garrison, Stephen D. Houston, Mary Jane Acuña, Milan Kováč, Damien Marken, et al. 2018. "Ancient lowland Maya complexity as revealed by airborne laser scanning of northern Guatemala". *Science* 361 (6409): eaau0137. <https://doi.org/10.1126/science.aau0137>.
- Castañeda, Jorge. 2020. "Determinación del grado de precisión de un levantamiento fotogramétrico respecto a un procedimiento topográfico con teodolito para la medición de terrenos y otras aplicaciones". Tesis de Licenciatura, Universidad de San Carlos de Guatemala.
- Chinchilla Mazariegos, Oswaldo. 2012. *Cotzumalguapa: La ciudad arqueológica*. Guatemala: F&G Editores.
- Clarke, Mary. 2015. "The Digital Dilemma: Preservation and the Digital Archaeological Record". *Advances in Archaeological Practice* 3 (4): 313-330.
- Clynes, Tom. 2018. "Escaneo láser revela una 'Megalópolis' maya en jungla de Guatemala". *National Geographic*.
- Colorado Nates, Óscar. 2019. "Edward S. Curtis: Galería + Mini Bio". *Oscar en Fotos* (blog). 10 de febrero. <https://oscarenfotos.com/2019/02/10/edward-s-curtis-galeria-mini-bio/>.
- Comisión Europea. 2021. *Recomendación (UE) 2021/1970 de la Comisión de 10 de noviembre de 2021, sobre un espacio común europeo de datos para el patrimonio cultural*. Diario Oficial de la Unión Europea L 401.
- Consejo Nacional de la Cultura. 2005. *Manual de Normativas Técnicas para Museos*. Caracas: Centro Simón Bolívar.

- Conte, Bernarda, y Andrés Robledo. 2020. "Aplicación de tecnologías 3D en sitios arqueológicos del valle de Ongamira, Córdoba, Argentina: Fotogrametría en excavaciones y morteros arqueológicos". *Revista del Museo de Antropología* 13 (1): 273-280. <https://doi.org/10.31048/1852.4826.v13.1.23900>.
- Cooper, Catriona. 2020. "You Can Handle It: 3D Printing for Museums". *Advances in Archaeological Practice* 8 (1): 443-447. <https://doi.org/10.1017/aap.2019.46>.
- Criado-Boado, Felipe. 1993. "Visibilidad e interpretación del registro arqueológico". *Trabajos de Prehistoria* 50: 39-56. <https://doi.org/10.3989/tp.1993.v50.i0.488>.
- Cuesta, Ana, et al. 2009. "De la investigación a la construcción participativa del patrimonio. Un programa de educación patrimonial y divulgación de la cultura científica en Uruguay". *Revista Electrónica de Arqueología PUCP* 4 (11).
- Dannemann, Victoria. 2018. "LIDAR: Arqueología por escaneo láser". *Deutsche Welle*.
- De Fino, Mariella, Silvana Bruno, y Fabio Fatiguso. 2022. "Dissemination, assessment and management of historic buildings by thematic virtual tours and 3D models". *Virtual Archaeology Review* 13 (26): 88-102. <https://doi.org/10.4995/var.2022.15426>.
- Díaz Flores, José Emmanuel. 2018. "Estudio y desarrollo de un escáner 3D de bajo costo". Informe de Proyecto de Título, Ingeniería Civil Electrónica.
- Dore, Christopher D. 2013. "Advances in Archaeological Practice: From the Editor". *Advances in Archaeological Practice* 1 (1): 1-2.
- Dueñas García, Manuel de Jesús. 2014. "Registro arqueológico en 3D mediante la fotogrametría de rango corto". Tesis de Licenciatura, Universidad Autónoma de San Luis Potosí.
- Duque Martínez, Javier, y Sara De Francisco Rodríguez. 2015. "Arqueología Tridimensional: Las técnicas 3D aplicadas al registro paleolítico". *BSAA Arqueología* 81: 9-53.
- Ebrahim, Mostafa. 2014. "3D Laser Scanners: History, Applications, and Future". Documento de trabajo, Assiut University. <https://doi.org/10.13140/2.1.3331.3284>.
- España. Jefatura del Estado. 1985. *Ley 16/1985, de 25 de junio, del Patrimonio Histórico Español*. Boletín Oficial del Estado, 29 de junio.
- España. Jefatura del Estado. 2021. *Real Decreto-ley 24/2021, de 2 de noviembre*. Boletín Oficial del Estado, 3 de noviembre.
- Estalella, Adolfo, y Elisenda Ardévol. 2010. "Internet: instrumento de investigación y campo de estudio para la antropología visual". *Revista Chilena de Antropología Visual* 15: 1-21.
- Europeana. 2025. "Descubre el patrimonio cultural digital europeo". *Europeana*. <https://www.europeana.eu/es>.
- Fiormonte, Domenico. 2022. *El gran reinicio del conocimiento y su impacto en la Humanidades Digitales*. Publicaciones de la Asociación Argentina de Humanidades Digitales (PublicAAHD) 3.

- Fontal, Olaia, y Alex Ibáñez-Etxeberria. 2014. "Reflexionar desde las experiencias: Una Visión Complementaria Entre España, Francia y Brasil". En *Actas del II Congreso Internacional de Educación Patrimonial*. Madrid: IPCE/OEPE.
- François, Paul, Jeffrey Leichman, Florent Laroche, y Françoise Rubellin. 2021. "Virtual reality as a versatile tool for research, dissemination and mediation in the humanities". *Virtual Archaeology Review* 12 (25): 1-15.
- García Sánchez, Magdalena A. 2018. Reseña de la vinculación social en arqueología. Planeación del impacto social de un proyecto arqueológico, de María Antonieta Jiménez Izarraraz. intervención 9, no. 9: 87-92.
- García, Alberto. 2023. "Elizondo: Cámara Lúcida". *Letras Libres*, 15 de marzo.
- González, Hancer. 2007. "Preservación y conservación del Patrimonio Cultural. ¿Tarea de quién?". *Presente y Pasado, Revista de Historia* 23: 127-138.
- González, Neus. 2008. "Una investigación cualitativa y etnográfica sobre el valor educativo y el uso didáctico del patrimonio cultural". En *Investigación didáctica enseñanza de las ciencias sociales*.
- González, Susana. 2001. "Los usos de la fotografía en favor de la arqueología como ciencia moderna. FRANCIA 1850-1914". *Cuadernos de Prehistoria y Arqueología* 27. <https://doi.org/10.15366/cupauam2001.27.009>.
- Grande León, Alfredo. 2015. "Investigación, Conservación y Difusión del Patrimonio en la Era Digital". Tesis Doctoral, Universidad de Sevilla.
- Griffin, Melanie. 2019. "Escaneo 3D e impresión 3D en arqueología y paleontología". *All3DP*.
- Grigsby, Katherine, Blanca Norton, y Oscar Mora. 2006. *Compendio de Leyes sobre la protección del patrimonio cultural Guatemalteco*. UNESCO.
- Guatemala. Congreso de la República. 1997. *Decreto Número 26-97: Ley para la Protección del Patrimonio Cultural de la Nación*.
- Guatemala. Organismo Judicial. 2018. *Compilación de Leyes Penales de Guatemala*. 2ª ed. Guatemala: CENADOJ.
- Guichen, Gaël. 2009. "Medio siglo de Conservación Preventiva". Entrevista por Marisa Gómez y Benoit de Tapol. Comité Técnico del CEIIC.
- Guirola, Cristina. 2009. "Recursos Digitales 3D y el Registro Arqueológico". *Asociación FLAAR Mesoamérica*.
- Gutiérrez De Angelis, Marina. 2012. "Antropología Visual y Medios Digitales: Nuevas perspectivas y experiencias metodológicas". *Revista de Antropología Experimental* 12 (8): 101-112.
- Hallot, Pierre y Marc Gil. 2019. "Methodology for 3D Acquisition of Highly Reflective Goldsmithing Artefacts". *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XLII-2/W17*: 129-134. <https://www.google.com/search?q=https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W17-129-2019>

- Hadjimitsis, Diofantos, et al. 2019. *Remote Sensing for Archaeology and Cultural Landscapes: Best Practices and Perspectives across Europe and the Middle East*. Basilea: Springer.
- Hernández, Leonel. s.f. "Kaminal Juyú y el Lago Miraflores: Importancia de los recursos hídricos en el desarrollo cultural de esta ciudad maya durante el Preclásico y el Clásico Temprano".
- Herrera, Valeria, y Verónica Acevedo. 2019. "La conservación de pigmentos arqueológicos y la generación de base de datos". *Boletín de Arqueología PUCP* 27.
- Howland, Matthew D., et al. 2020. "Integrating Digital Datasets into Public Engagement through ArcGIS StoryMaps". *Advances in Archaeological Practice* 8 (4): 351-360. <https://doi.org/10.1017/aap.2020.14>.
- Hostettler, Marco et al. 2024. *The 3 Dimensions of Digitalised Archaeology*. Springer. [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-031-53032-6\\_2](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-031-53032-6_2)
- ICOMOS. 1990. *Charter for the Protection and Management of the Archaeological Heritage*. Lausana: ICOMOS.
- Ivic, Matilde, Enrique C., y Marion Popenoe. 2011. *Excavaciones de Rescate en el Área del Ecomuseo de San Andrés Semetabaj, Sololá*. Informe final. Guatemala: Universidad del Valle de Guatemala.
- Ivic, Matilde, et al. 2019. "Después de la invasión y conquista: luchas territoriales en la Cuenca del Lago de Atitlán y su Bocacosta". *Revista de la Universidad del Valle de Guatemala* 37: 75-97.
- Knudson, Ruthann. 1982. "Basic Principles of Archaeological Resource Management". *American Antiquity* 47 (1): 163-166.
- Kruse, Kristin y Schönenberger. 2024. "Capítulo 12 En Digital Archaeology and Heritage. [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-031-53032-6\\_12](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-031-53032-6_12).
- La Mouri, Jackie. 2018. "Cámara lúcida, litografías y documentación del lugar en la década de 1840". *Museo de Arqueología y Etnología*. Universidad Simon Fraser.
- Lisón Arcal, José. 1999. "Una propuesta para iniciarse en la Antropología visual". *Revista de Antropología Social* 8: 15-35.
- Looper, Matthew, y Camilo Luin. 2016. "Quiriguá 3D Project". *Digital Commons University of South Florida*. Consultado el 3 de diciembre de 2025. [https://digitalcommons.usf.edu/cdhgi\\_quirigua\\_3d/](https://digitalcommons.usf.edu/cdhgi_quirigua_3d/).
- López, María. 2022. "Historia de la Fotografía: El Arte de Dibujar con Luz". *National Geographic Historia*, 8 de junio.
- López, Marissa, et al. 2022. "Aplicación de tecnología tridimensional en artefactos arqueológicos". Ponencia presentada en el II Congreso de Ciencias Sociales, Universidad del Valle de Guatemala.
- López-Menchero, Víctor Manuel y Alberto Grande. 2011. "Hacia una carta internacional de arqueología virtual: el borrador de los Principios de Sevilla". *Revista de Arqueología* 32, no. 360: 44-51.
- Maldonado, Alexis, Jorge Collazo, y Cristina Martínez. 2021. "Arqueología, impresión 3D y Tiflología: La accesibilidad del patrimonio arqueológico como forma de difusión". *GPAG* 31: 421-441.

- Martínez, Carlos. 2016. "1960: El Primer Láser". *ZTFNews* (blog), 16 de mayo.
- Martínez, Clara, Gimena Del Rio, y Francisco Barrón. 2021. "Territorios virtuales y campos de batalla: El uso de mapas digitales como espacios multimedia de estudio y divulgación". *Revista de Humanidades Digitales* 5: 218-235.
- Matsuda, Akira. 2004. "To be or not to be? Public archaeology as a pluralist and critical archaeology". *Public Archaeology* 3 (4): 61–75.
- McGimsey, Charles R. 2003. "The Four Fields of Archaeology". *American Antiquity* 68 (4): 611-618.
- McManamon, Francis P., et al. 2016. "Values-Based Management of Archaeological Resources at a Landscape Scale". *Advances in Archaeological Practice* 4 (2): 132-148.
- Means, Bernard K. 2015. "Promoting a More Interactive Public Archaeology: Archaeological Visualization and Reflexivity through Virtual Artifact Curation". *Advances in Archaeological Practice* 3 (3): 235-248.
- Ministerio de Cultura y Deportes. 2012. *Acuerdo Ministerial Número 001-2012*. Guatemala.
- Ministerio de Cultura y Deportes. 2020. *Manual de Procedimiento*. Guatemala: Instituto de Antropología e Historia de Guatemala.
- Ministerio de Cultura y Deportes. 2022. *Formato de entrega Final: Informes de Investigación*. Guatemala: Instituto de Antropología e Historia de Guatemala.
- Molina-Torres, María Pilar, y Raimundo Ortiz-Urbano. 2021. "Educación Sostenible y Conservación del Patrimonio Cultural en la Formación del Profesorado Universitario". *Formación Universitaria* 14 (1): 207-216.
- Molinos, Carmen, y Lucía Garrote. 2023. "Arqueología de la fotografía arqueológica". *Revista Patrimonio* 77. Fundación Santa María Real.
- Mondéjar Jiménez, Juan Antonio, José Jiménez, Claudia Sevilla, y María Rodríguez. 2009. "¿Cómo acercar los bienes patrimoniales a los ciudadanos? Educación Patrimonial, un campo emergente en la gestión del patrimonio cultural". *PASOS Revista de Turismo y Patrimonio Cultural* 7 (2): 271-280.
- Morales-Forte, Rubén, Marcello A. Canuto, Francisco Estrada-Belli, y Tomás Barrientos Q. 2021. "The Maya Scripta Project: Museum, University, and Community-Engaged Scholarship in Dolores, Petén, Guatemala". *The Mayanist* 3 (1): 65–84.
- Morales Forte, Rubén, Walter. Hoil, Francisco. Pérez, José. Quixcan, Melsin. Aguilar, Zurama. García, Sálman Zarax y Tomás. Barrientos. 2021. "The Maya Scripta Project: Museum, University, and Community-Engaged Scholarship in Dolores, Petén, Guatemala. *The Mayanist* 3, no.1: 39-57.
- Moshenska, Gabriel, ed. 2017. *Key Concepts in Public Archaeology*. Londres: UCL Press.
- Moyano, Gonzalo. 2017. "El uso de fotogrametría digital como registro complementario en arqueología. Alcances de la técnica y casos de aplicación". *Comechingonia. Revista de Arqueología* 21 (2): 333-350.

- Molloy, Barry y Marina, Milić. 2018. "Wonderful Things? A Consideration of 3D Modelling of Objects in Material Culture Research. *Open Archaeology* 4, no.1: 197-113. <https://doi.org/10.1515/opar-2018-0006>
- Opgenhaffen, Loes. 2022. "Archives in action: The impact of digital technology on archaeological recording strategies and ensuing open research archives". *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage* 27: e00244.
- Orton, Clive. 2012. *Cambridge Manuals in Archaeology: Sampling in Archaeology*. Cambridge: Cambridge University Press.
- PatrimonioDroneexplorer. 2021. "Registro digital de sitios y artefactos arqueológicos de Guatemala". Sketchfab. <https://sketchfab.com/patrimoniodronexplorer>.
- Patrik, Linda E. 1985. "Is There an Archaeological Record?". *Advances in Archaeological Method and Theory* 8: 27-62. Pillsbury, Joanne, et al., eds. 2012. *Past Presented: Archaeological Illustration and the Ancient Americas*. Washington D.C.: Dumbarton Oaks Research Library and Collection.
- Rahaman, Hafizur. 2020. "Digital Heritage Interpretation: A Conceptual Framework, a CMS Engine and a Prototype". *International Journal of Digital Culture and Electronic Tourism* 3 (2). <https://doi.org/10.1504/ijdcet.2020.112531>.
- Rahaman, Hafizur, y Tan Beng-Kiang. 2013. "Interpreting Digital Heritage: A Conceptual Model with End-Users' Perspective". *International Journal of Architectural Computing* 9 (1): 99-113.
- Raies, Alejandra. 2021. "La difusión del patrimonio arqueológico a través de las nuevas tecnologías: La reconstrucción de las baterías y el campo de batalla de vuelta de obligado". *Armario de Arqueología* 13: 87-103.
- Richardson, Lorna. 2013. "The computational turn in public archaeology". *Papers from the Institute of Archaeology* 23 (1): 1-12.
- Rick, John, y Luisa Escobar. 2006. *Semetabaj. Informe del trabajo de campo 2005*. Guatemala: Proyecto Stanford-Universidad del Valle.
- Robert, Selden, Timothy Perttula, y Michael O'Brien. 2014. *Advances in Documentation Digital Curation, Virtual Exhibition, and a Test of 3D Geometric Morphometrics*. Cambridge University Press.
- Rodas, Ana, et al. 2015. *Políticas culturales, deportivas y recreativas 2015-2034*. Guatemala: Ministerio de Cultura y Deportes.
- Roskams, Steve. 2001. *Cambridge Manuals in Archaeology: Excavation*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Ruby, Jay. 2007. "Los últimos 20 años de Antropología visual-una revisión crítica". *Revista Chilena de Antropología Visual* 9: 13-36.
- Schiffer, Michael. 1991. "Los Procesos de Formación del Registro Arqueológico". *Boletín de Antropología Americana* 23: 39-45.
- Shennan, Stephen, ed. 1989. *Archaeological Approaches to Cultural Identity*. Londres: Routledge.

- Society for American Archaeology (SAA). 2025. "What is Public Archaeology?". *SAA.org*. Consultado el 20 de febrero de 2025. <https://www.saa.org/education-outreach/public-outreach/what-is-public-archaeology>.
- Staropoli, Laura, Alejandra Lanza, Daniela Noemi Avido, y Valeria Herrera. 2019. "La Construcción Del Patrimonio Virtual En La Investigación, Conservación y Difusión Del Pasado". En *XX Congreso Nacional de Arqueología Argentina*. Córdoba.
- Staropoli, Laura, Verónica Acevedo, Daniela Ávido, y Marcelo Vitores. 2023. "Reflexiones en la práctica de la arqueología digital: la construcción y comunicación del patrimonio cultural virtual". *Virtual Archaeology Review* 14 (29): 118-135.
- Steuri, Noah, et al. 2023. "Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage". *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage* 30: e00283.
- Tamminen, Heather M., et al. 2023. "3D Printed Control for Commercial Off-the-Shelf (COTS) Close-Range Photogrammetric Reconstruction". *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage* 30: e00273.
- Tarlow, Sarah, y Liv Nilsson Stutz. 2009. "Can an archaeologist be a public intellectual?". *Archaeological Dialogues* 16 (1): 1–5.
- Tokovinine, Alexandre, y Francisco Estrada-Belli. 2017. "From Stucco to Digital: Topometric Documentation of Classic Maya Facades at Holmul". *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage* 6: 18-28.
- Torreño, Juan. 2022. "Análisis de la fotogrametría como técnica aplicada a la protección, investigación y difusión del patrimonio histórico-arqueológico". Tesis Doctoral, Universidad de Cádiz.
- University of South Florida. 2021. "Quiriguá 3D Project". *Center for Digital Heritage and Geospatial Information. Digital Commons @ University of South Florida*. [https://digitalcommons.usf.edu/cdhgi\\_quiriguá\\_3d/](https://digitalcommons.usf.edu/cdhgi_quiriguá_3d/)
- UNESCO. 2003. *Carta sobre la preservación del patrimonio digital*. París: UNESCO.
- Velázquez, Jorge. 2025. "Kodak, la empresa que inventó la primera cámara de fotos digital, pero la descartó porque no le veía futuro". *Ámbito Financiero*. <https://www.ambito.com/negocios/kodak-la-empresa-que-invento-la-primera-camara-fotos-digital-pero-la-descarto-porque-no-le-veia-futuro-n6082076>.
- Vital, Rebeka, y Stella Sylaiou. 2022. "Digital Survey: How It Can Change the Way We Perceive and Understand Heritage Sites". *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage* 24: 327-348.
- Vidal, M. G. Muñoz y C. García. 2020. "Documentation and Conservation of the Maya Site of la Blanca, Guatemala, Through 3D Technologies". *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XLIV-M-1-2020*: 481-488. <https://www.google.com/search?q=https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIV-M-1-2020-481-2020>
- Wright, Dennis L., Jr. 2022. "How Archaeologists Can Effectively and Ethically Cultivate Responsible and Responsive Stewards". *Advances in Archaeological Practice* 10 (1): 114-121.

Wrobel, Gabriel D., Jack A. Biggs, y Amy L. Hair. 2019. "Digital Modeling for Bioarchaeologists". *Advances in Archaeological Practice* 7 (1): 47-54.

## 13. ANEXOS

### 13.1. Tabla general de datos

Tabla 5. Datos de las piezas escogidas para los muestrarios 3D de SAS, donde al final se muestra la versión con las cuales se produjeron finalmente los modelos

Modelos 3D									
	Datos generales					Versión de archivos 3D			
	Ubicación	No.	Código/Tipo	Escala	Material	OBJ	STL	PLY	3MF
<b>Muestrario Especial de figurillas, vasijas y lítica</b>	<b>Ecomuseo</b>	1	SAS-M12-154-4	1:1	Cerámica	SÍ	SÍ	SÍ	SÍ
		2	SAS-144-4 (1)	1:1	Cerámica	SÍ	SÍ	SÍ	SÍ
		3	SAS-144-4 (2)	1:1	Cerámica	SÍ	SÍ	SÍ	SÍ
		4	SAS-149-4	1:1	Cerámica	SÍ	SÍ	SÍ	SÍ
		5	SAS-144-4 (1)	1:1	Cerámica	SÍ	SÍ	SÍ	SÍ
		6	SAS-144-4 (2)	1:1	Cerámica	SÍ	SÍ	SÍ	SÍ
		7	SAS-172-4	1:1	Pedernal	SÍ	SÍ	SÍ	SÍ
	<b>Laboratorio</b>	8	SAS161-4	1:1	Cerámica	SÍ	No	No	No
		9	SAS-161-2	1:1	Cerámica	SÍ	No	No	No
		10	SAS-163-2	1:1	Cerámica	SÍ	No	No	No
		11	SAS-173-8	1:1	Cerámica	SÍ	No	No	No
		12	SAS-160-7	1:1	Cerámica	SÍ	No	No	No
		13	SAS-172-4	1:1	Lítica	SÍ	No	No	No
		14	SAS-184-2	1:1	Cerámica	SÍ	SÍ	SÍ	SÍ
		15	SAS-179-6	1:1	Cerámica	SÍ	No	No	No
		16	SAS-179-7	1:1	Cerámica	SÍ	No	No	No
		17	SAS-178-3	1:1	Cerámica	SÍ	No	No	No
		18	SAS-194-04	1:1	Cerámica	SÍ	SÍ	SÍ	SÍ

		19	SAS-193-7	1:1	Obsidiana	No	No	No	No
		20	SAS-187-11	1:1	Cerámica	SÍ	No	No	No
		21	SAS-200-3	1:1	Cerámica	SÍ	No	No	No
		22	SAS 195-3	1:1	Cerámica	No	No	No	No
		23	SAS-267-1	1:1	Lítica	No	No	No	No
		24	SAS-215-9	1:1	Cerámica	SÍ	SÍ	SÍ	SÍ
		25	SAS-5A-15-2	1:1	Cerámica	SÍ	No	No	No
		26	SAS-5A-12-2	1:1	Lítica	SÍ	No	No	No
		27	SAS-5A-9-3-1	1:1	Cerámica	SÍ	SÍ	SÍ	SÍ
		28	SAS-5A-9-3-2	1:1	Cerámica	SÍ	SÍ	SÍ	SÍ
		29	SAS-5A-8-2	1:1	Cerámica	SÍ	SÍ	SÍ	SÍ
		30	SAS-5A-7-3-1	1:1	Cerámica	SÍ	SÍ	SÍ	SÍ
		31	SAS-5A-7-3-2	1:1	Cerámica	SÍ	SÍ	SÍ	SÍ
		32	SAS-5A-4-9	1:1	Cerámica	SÍ	SÍ	SÍ	SÍ
		33	SAS-5A-4-6	1:1	Cerámica	SÍ	SÍ	SÍ	SÍ
		34	SAS-5A-4-2	1:1	Cerámica	SÍ	SÍ	SÍ	SÍ
		35	_LÍTICA_1	1:1	Lítica	SÍ	SÍ	SÍ	SÍ
		36	_LÍTICA_2	1:1	Lítica	SÍ	SÍ	SÍ	SÍ
		37	SAS-201-4	1:1	Lítica	SÍ	SÍ	SÍ	SÍ
		38	SAS-230-10	1:1	Lítica	SÍ	SÍ	SÍ	SÍ
		39	SAS-248-4	1:1	Lítica	SÍ	SÍ	SÍ	SÍ
		40	SAS-11A-1-1	1:1	Obsidiana	No	No	No	No
		41	Lítica_1	1:1	Lítica	SÍ	SÍ	SÍ	SÍ
		42	Lítica_2	1:1	Lítica	SÍ	SÍ	SÍ	SÍ
		43	Lítica_3	1:1	Lítica	SÍ	SÍ	SÍ	SÍ
		44	Lítica_4	1:1	Lítica	SÍ	SÍ	SÍ	SÍ
		45	Lítica_5	1:1	Lítica	SÍ	SÍ	SÍ	SÍ
	<b>Recolección de</b>	46	NARANJA GLOSSY	1:1	Cerámica	SÍ	No	SÍ	No

	<b>cooperativa lítica</b>	47	NEGRO BURDO_1	1:1	Cerámica	SÍ	No	SÍ	No
		48	NEGRO_1	1:1	Cerámica	Si	No	SÍ	No
		49	NEGRO_2	1:1	Cerámica	SÍ	No	SÍ	No
<b>Muestrario cerámico de SAS</b>	<b>PRECLÁSICO TEMPRANO</b>	50	SANTA MARTA_1	1:1	Cerámica	SÍ	SÍ	SÍ	SÍ
		51	PRECLÁSICOS_1	1:1	Cerámica	SÍ	SÍ	SÍ	SÍ
	<b>PRECLÁSICO MEDIO</b>	52	PRECLÁSICOS_2	1:1	Cerámica	SÍ	SÍ	SÍ	SÍ
		53	PRECLÁSICOS_3	1:1	Cerámica	SÍ	SÍ	SÍ	SÍ
		54	_CAFÉ ROJIZO_1	1:1	Cerámica	SÍ	SÍ	SÍ	SÍ
		55	_CAFÉ ROJIZO_2	1:1	Cerámica	SÍ	SÍ	SÍ	SÍ
	<b>PRECLÁSICO SIN DETERMINAR</b>	56	_CAFÉ ROJIZO_3	1:1	Cerámica	SÍ	SÍ	SÍ	SÍ
		57	_NARANJA_1	1:1	Cerámica	SÍ	SÍ	SÍ	SÍ
		58	_NARANJA_2	1:1	Cerámica	SÍ	SÍ	SÍ	SÍ
	<b>CLÁSICO TEMPRANO</b>	59	_NARANJA_3	1:1	Cerámica	SÍ	SÍ	SÍ	SÍ
		60	_NARANJA_4	1:1	Cerámica	SÍ	SÍ	SÍ	SÍ
		61	_NARANJA_5	1:1	Cerámica	SÍ	SÍ	SÍ	SÍ
		62	SEMETRAS CAFÉ_1	1:1	Cerámica	SÍ	SÍ	SÍ	SÍ
		63	SEMETRAS CAFÉ_2	1:1	Cerámica	SÍ	SÍ	SÍ	SÍ
		64	SEMETRAS CAFÉ_3	1:1	Cerámica	SÍ	SÍ	SÍ	SÍ
65		SEMETRAS CAFÉ_4	1:1	Cerámica	SÍ	SÍ	SÍ	SÍ	
66		SEMETRAS CAFÉ_5	1:1	Cerámica	SÍ	SÍ	SÍ	SÍ	
67		NEGRO PULIDO_1	1:1	Cerámica	SÍ	SÍ	SÍ	SÍ	

		68	NEGRO PULIDO_2	1:1	Cerámica	SÍ	SÍ	SÍ	SÍ
		69	_NEGRO_1	1:1	Cerámica	SÍ	SÍ	SÍ	SÍ
		70	_NEGRO_2	1:1	Cerámica	SÍ	SÍ	SÍ	SÍ
		71	NARANJA SANTA MARTA_1	1:1	Cerámica	SÍ	SÍ	SÍ	SÍ
		72	NARANJA SANTA MARTA_2	1:1	Cerámica	SÍ	SÍ	SÍ	SÍ
		73	NARANJA SANTA MARTA_3	1:1	Cerámica	SÍ	SÍ	SÍ	SÍ
		74	NARANJA SANTA MARTA_4	1:1	Cerámica	SÍ	SÍ	SÍ	SÍ
		75	PASTA ROJA_1	1:1	Cerámica	SÍ	SÍ	SÍ	SÍ
		76	PASTA ROJA_2	1:1	Cerámica	SÍ	SÍ	SÍ	SÍ
		77	PASTA ROJA_3	1:1	Cerámica	SÍ	SÍ	SÍ	SÍ
		78	CAFÉ BURDO_1	1:1	Cerámica	No	No	No	No
		79	CAFÉ BURDO_2	1:1	Cerámica	No	No	No	No
		80	CAFÉ BURDO_3	1:1	Cerámica	No	No	No	No
		81	ESPERANZA FLESH_1	1:1	Cerámica	SÍ	SÍ	SÍ	SÍ
		82	ESPERANZA FLESH_2	1:1	Cerámica	SÍ	SÍ	SÍ	SÍ
		83	ESPERANZA FLESH_3	1:1	Cerámica	SÍ	SÍ	SÍ	SÍ
		84	CAFÉ NARANJA_1	1:1	Cerámica	SÍ	SÍ	SÍ	SÍ
		85	CAFÉ NARANJA_2	1:1	Cerámica	SÍ	SÍ	SÍ	SÍ
		86	CAFÉ NARANJA_3	1:1	Cerámica	SÍ	SÍ	SÍ	SÍ
		87	CAFÉ NARANJA_4	1:1	Cerámica	SÍ	SÍ	SÍ	SÍ
		88	CAFÉ NARANJA_5	1:1	Cerámica	SÍ	SÍ	SÍ	SÍ

		89	CAFÉ NARANJA ROSADO_1	1:1	Cerámica	SÍ	SÍ	SÍ	SÍ
		90	CAFÉ NARANJA ROSADO_2	1:1	Cerámica	SÍ	SÍ	SÍ	SÍ
		91	CAFÉ NARANJA ROSADO_3	1:1	Cerámica	SÍ	SÍ	SÍ	SÍ
		92	CAFÉ NARANJA ROSADO_4	1:1	Cerámica	SÍ	SÍ	SÍ	SÍ
		93	CAFÉ PULIDO_1	1:1	Cerámica	SÍ	SÍ	SÍ	SÍ
		94	CAFÉ ROJIZO_1_	1:1	Cerámica	SÍ	SÍ	SÍ	SÍ
		95	CAFÉ ROJIZO_2_	1:1	Cerámica	SÍ	SÍ	SÍ	SÍ
		96	CAFÉ ROJIZO_3_	1:1	Cerámica	SÍ	SÍ	SÍ	SÍ
		97	NARANJA_1	1:1	Cerámica	SÍ	SÍ	SÍ	SÍ
		98	NARANJA_2	1:1	Cerámica	SÍ	SÍ	SÍ	SÍ
		99	NARANJA_3	1:1	Cerámica	SÍ	SÍ	SÍ	SÍ
		100	NEGRO_1	1:1	Cerámica	SÍ	SÍ	SÍ	SÍ
		101	NEGRO_2	1:1	Cerámica	SÍ	SÍ	SÍ	SÍ
		102	SANTA MARTA	1:1	Cerámica	SÍ	SÍ	SÍ	SÍ
		103	_SEMETABAJ CAFÉ_1	1:1	Cerámica	No	No	No	No
		104	XUC_1	1:1	Cerámica	No	No	No	No
		105	SANTA MARTA_1	1:1	Cerámica	SÍ	SÍ	SÍ	SÍ
		106	SANTA MARTA_2	1:1	Cerámica	SÍ	SÍ	SÍ	SÍ
		107	SANTA MARTA_3	1:1	Cerámica	SÍ	SÍ	SÍ	SÍ
		108	SANTA MARTA_4	1:1	Cerámica	No	No	No	No
		109	_NARANJA_1_	1:1	Cerámica	No	No	No	No
		110	_NARANJA_2_	1:1	Cerámica	No	No	No	No
		111	_AMATLE_	1:1	Cerámica	No	No	No	No

<b>CLÁSICO O TARDIO</b>	11 2	NEGRO_1	1:1	Cerámica	SÍ	SÍ	SÍ	SÍ
	11 3	NEGRO_2	1:1	Cerámica	SÍ	SÍ	SÍ	SÍ
	11 4	NEGRO_3	1:1	Cerámica	No	No	No	No
	11 5	NEGRO PULIDO_	1:1	Cerámica	No	No	No	No
	11 6	ROJO	1:1	Cerámica	No	No	No	No
	11 7	GRIS_AMARILLENTO_1	1:1	Cerámica	No	No	No	No
	11 8	GRIS_AMARILLENTO_2	1:1	Cerámica	SÍ	SÍ	SÍ	SÍ
	11 9	GRIS_AMARILLENTO_3	1:1	Cerámica	SÍ	SÍ	SÍ	SÍ
	12 0	CAFÉ ROJIZO_1	1:1	Cerámica	SÍ	SÍ	SÍ	SÍ
	12 1	CAFÉ NARANJA	1:1	Cerámica	SÍ	SÍ	SÍ	SÍ

## 13.2. Guía para realizar modelos 3D

### 13.2.1. Agisoft Metashape

- 1) Descargar el software de *Agisoft Metashape* en su página oficial: <https://n9.cl/8i15z>.

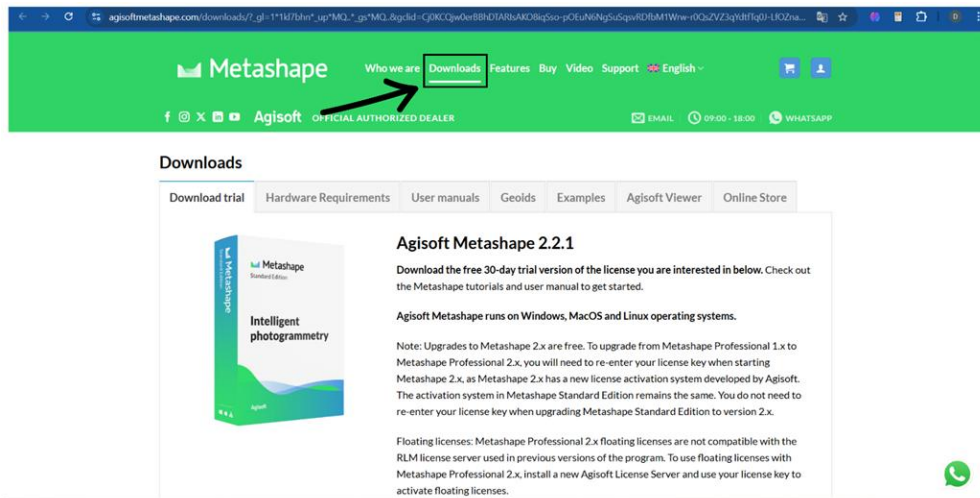


Figura 72. Página principal de Agisoft Metashape

- 2) Elegir la versión de prueba, o de compra si es el caso, que se desea descargar.

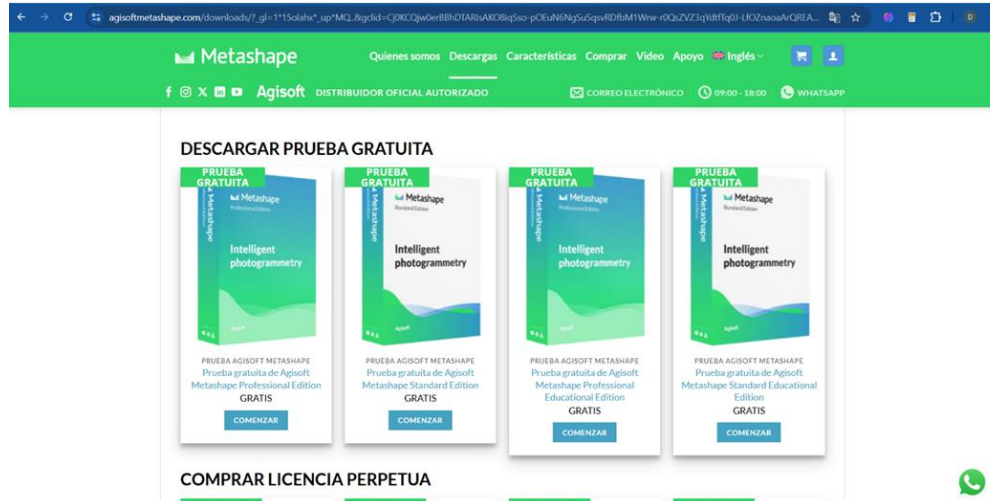


Figura 73. Versiones de prueba Educativas y normales a escoger, si se baja más en la ventana se verán las opciones de compra

- 3) Poner los datos personales, es recomendable crear una cuenta personal en el sitio. Entre los datos solicitados se pedirá un correo confirmar y crear la suscripción temporal o permanente.

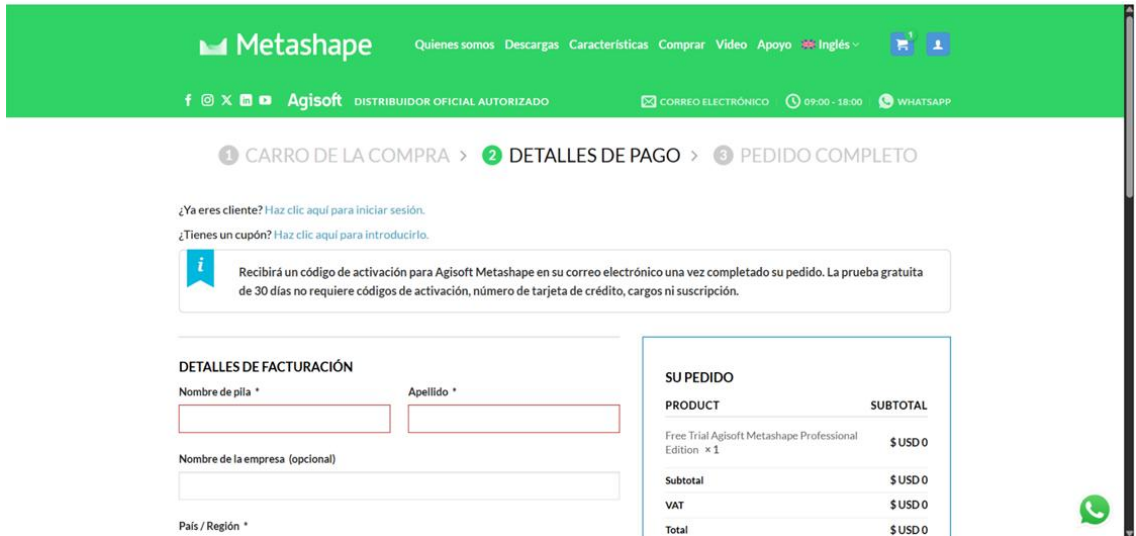


Figura 74. Pestaña de datos para llenar

- 4) Terminado el proceso se descarga la versión dependiendo del sistema que se use (Windows, Apple o Linux)

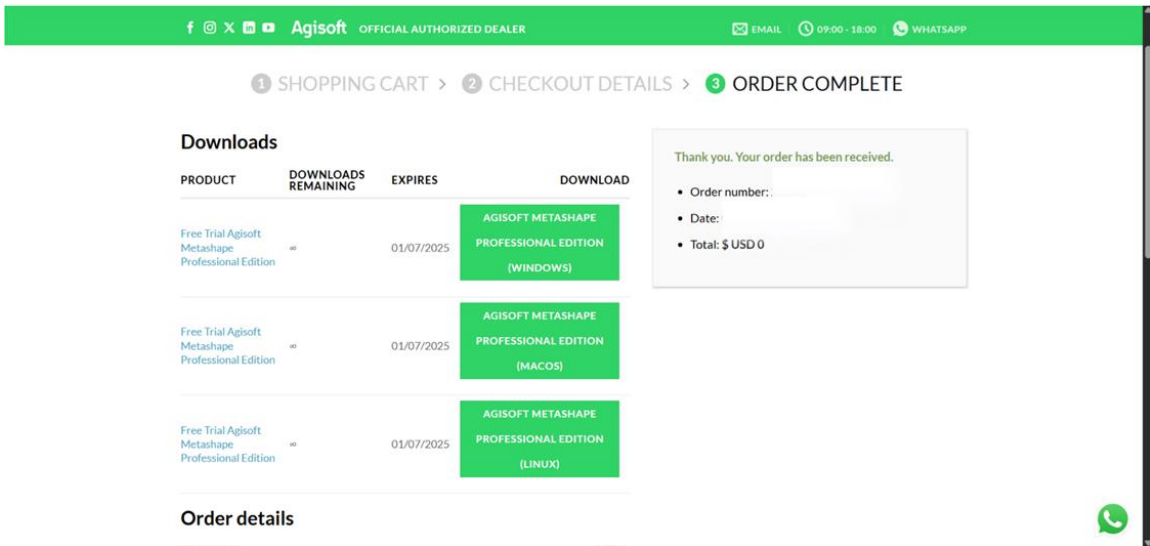


Figura 75. Versiones según el sistema de pc que se use, este mismo se enviara al correo empleado para la suscripción temporal o perpetua

- 5) Seguir los pasos correspondientes para la instalación completa

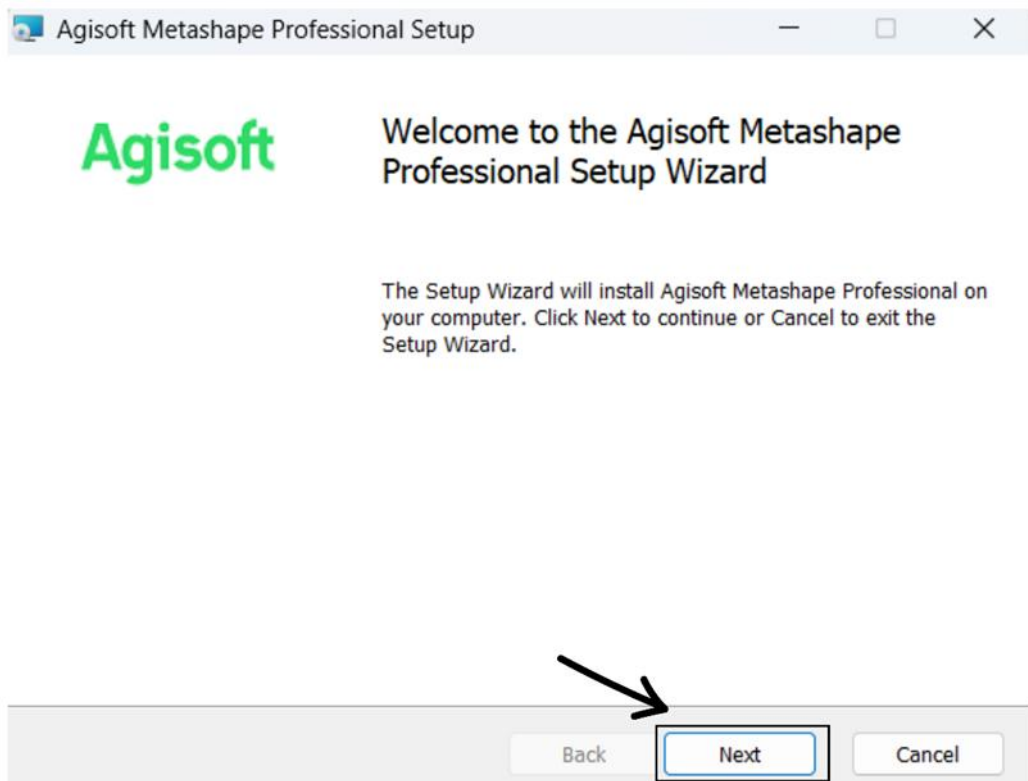


Figura 76. Seguir con el proceso hasta la instalación completa de Agisoft Metashape

- 6) Al iniciar se debe guardar el proyecto con un nombre descriptivo. En la parte superior se encontrará la pestaña “Flujo de Trabajo”. Lo primero que se tiene que hacer es subir las fotografías. *Metashape* permite meter las fotos por lotes o por carpetas. Si se hace por carpetas, puede elegir entre crear un solo bloque de trabajo o en la cantidad de carpetas seleccionadas.

Hecho esto, se debe seleccionar orientar fotos “*Align Photos*”, al aparecer el cuadro de dialogo se debe poner una precisión “media”. Si el RAM de la computadora es muy bajo, usar “alto” o “máxima” ocasionará que sea muy tardado el proceso o simplemente que no se realice el trabajo. Presionar OK y esperar que se complete el proceso.

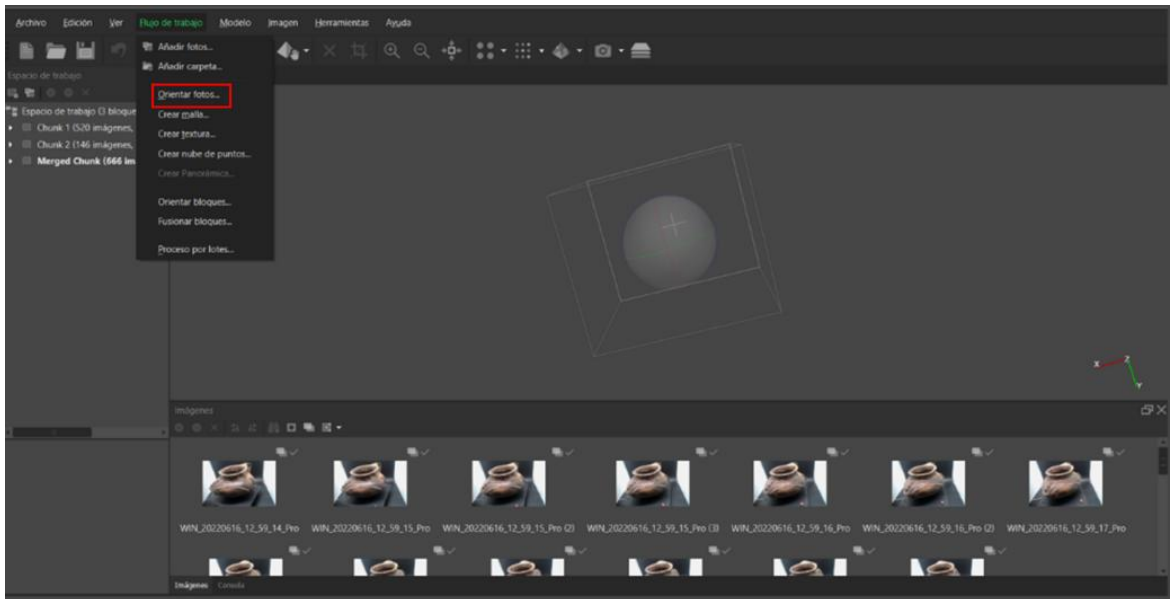


Figura 77. Selección de orientar fotos en la versión estándar de Metashape, En la versión Profesional está en la misma parte

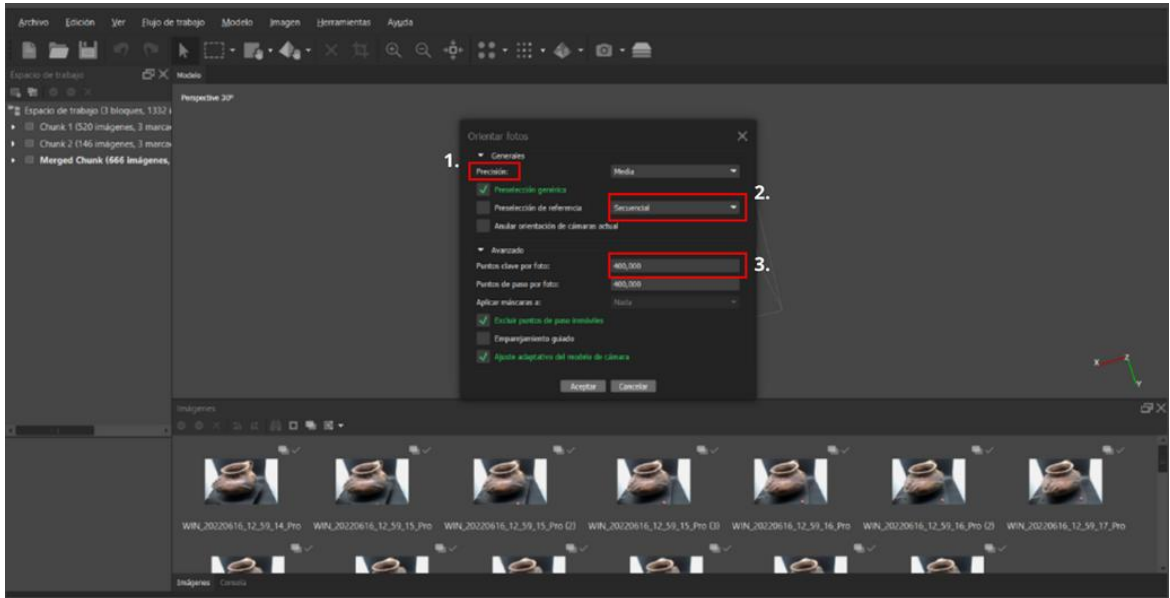


Figura 78. 1. Precisión, si se tiene un equipo con un RAM igual o superior a 32 GB se puede usar las otras opciones. 2. Poner la referencia de posición en secuencial. 3. Tanto en puntos clave y de paso por foto poner un mínimo de 40,000 y máximo de 100,000 para tener buenos resultados sin ser tardados

- 7) Ahora toca realizar la nube de puntos densa. En la versión estándar se selecciona “crear nube de puntos”, en la versión profesional se llama igual. En el cuadro de diálogo “orígenes de datos” se selecciona “mapas de profundidad” (Figura 104; 1), la calidad media (Figura 104; 2) y un filtrado de trabajo moderado (Figura 104; 3), lo demás se deja tal como está.

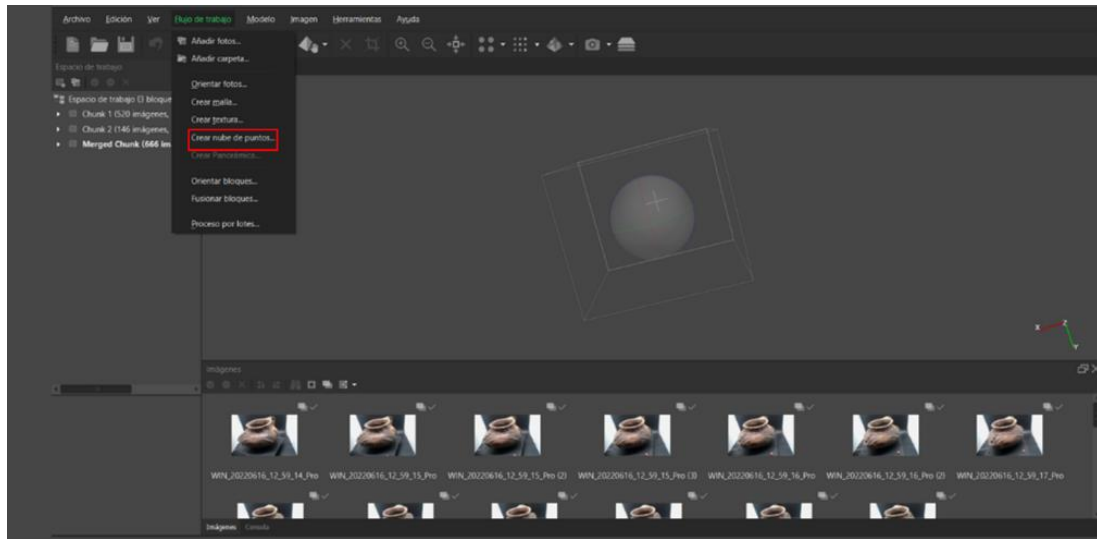


Figura 79. Figura 103. Selección de crear nube de puntos en la versión estándar de Metashape, En la versión Profesional está en la misma parte

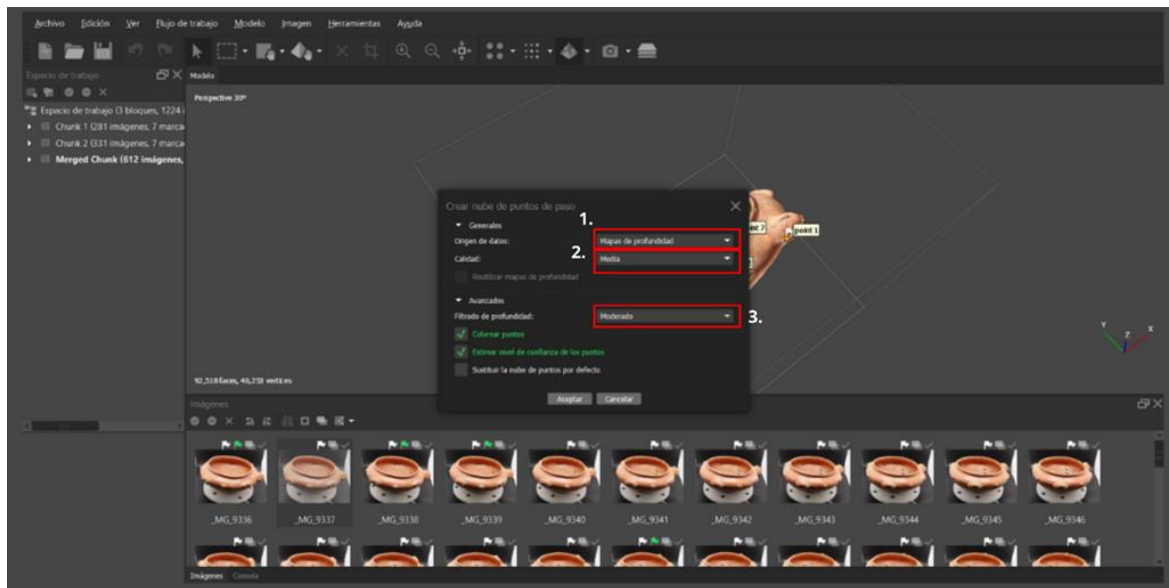


Figura 80. Cuadro de diálogo de la creación de nube de puntos

8) Un paso muy importante es limpiar los puntos que quedan flotantes al modelo, resultantes de artefactos ajenos al que se está trabajando. Para este paso se selecciona la selección de forma libre. Uso básico de la herramienta:

1. Activa la herramienta haciendo clic en su icono o usando el atajo
2. **Para seleccionar:**
  - Haz clic y arrastra para dibujar una forma libre alrededor del área deseada
  - Suelta el clic para completar la selección
3. **Para deseleccionar:** Mantén presionada la tecla Alt mientras dibujas

### Modos de Selección

Puedes alternar entre estos modos en la barra de herramientas superior:

- **Add to selection (+):** Añade a la selección actual
- **Subtract from selection (-):** Elimina de la selección actual
- **Intersect with selection ( $\cap$ ):** Mantiene sólo la intersección

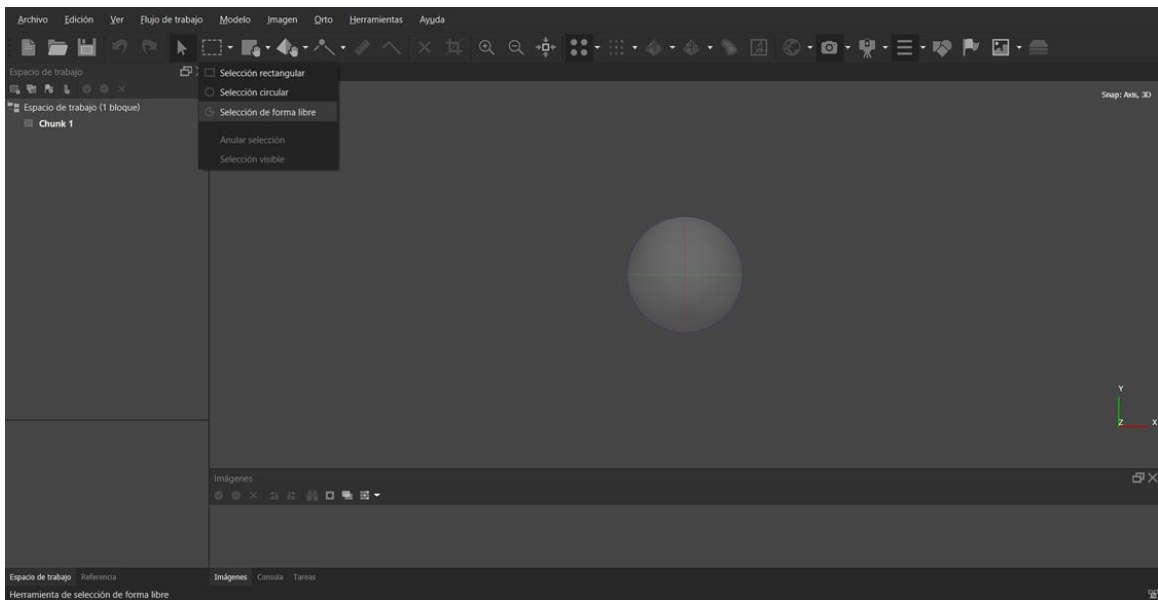


Figura 81. Selección de forma libre en las herramientas de Agisoft Metashape profesional

9) Como paso siguiente se crea la malla, seleccionando siempre en el cuadro de flujo de trabajo. En el cuadro de diálogo en “origen de datos” se elige “nube de puntos” (Figura 107; 1), en “número de caras” se pone en “media”.

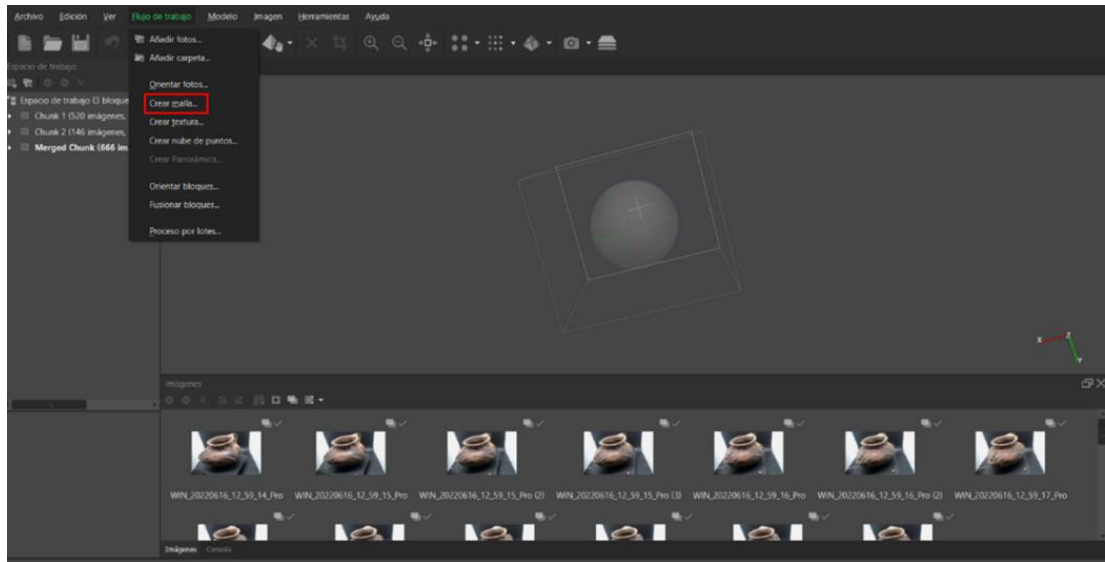


Figura 82. Selección de Crear malla en la versión estándar de Metashape, En la versión Profesional está en la misma parte

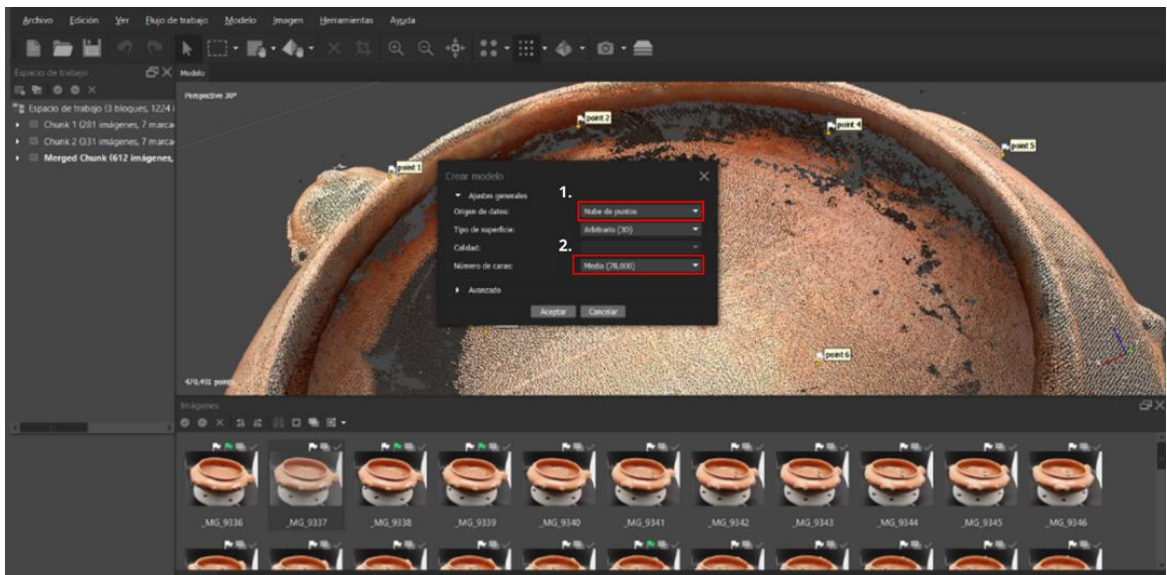


Figura 83. Cuadro de diálogo de la creación de la malla.

- 10) El último paso para crear el modelo 3D completo, es la creación de la textura, en “origen de los datos” se tiene que seleccionar “imágenes” y en “modo de mezcla” se deja el que está por defecto.

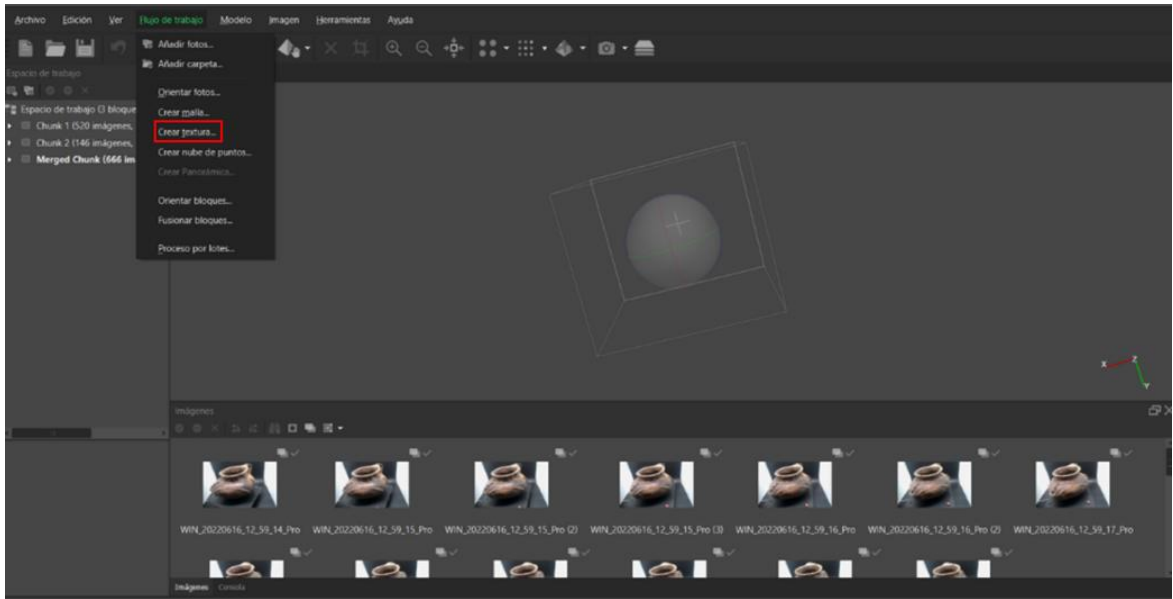


Figura 84. Selección de Crear textura en la versión estándar de Metashape, En la versión Profesional está en la misma parte

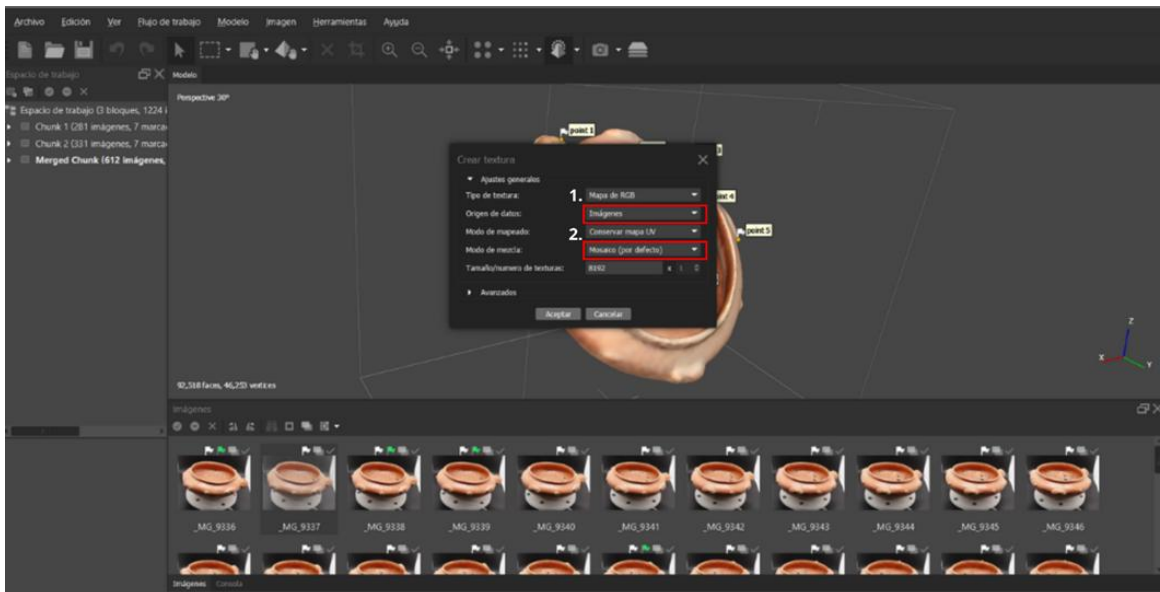


Figura 85. Cuadro de diálogo de la creación de textura

### **13.2.2. Polycam**

- 1) La aplicación se encuentra tanto para dispositivos Android y IOS, por lo cual para descargarla se tiene que seguir los siguientes pasos:

➤ **Para Dispositivos Android**

1. **Abra Google Play Store:**

- ✓ Seleccione el ícono de Play Store en tu pantalla de inicio

2. **Busque Polycam:**

- ✓ Escriba "Polycam" en la barra de búsqueda
- ✓ Use este enlace directo: [Polycam en Play Store](#)

3. **Descargar la app:**

- ✓ Seleccione el botón "Instalar"
- ✓ Espere a que se complete la descarga e instalación

4. **Abrir la app:**

- ✓ Toca "Abrir" desde Play Store o busca el ícono en tu menú de apps

➤ **Para Dispositivos iPhone/iOS**

1. **Abra App Store:**

- ✓ Seleccione el ícono azul de App Store

2. **Busque Polycam:**

- ✓ Ve a la pestaña "Buscar"
- ✓ Escribe "Polycam" en la barra de búsqueda
- ✓ Usa este enlace directo: [Polycam en App Store](#)

3. **Descargar la app:**

- ✓ Seleccione el botón "Obtener"
- ✓ Confirmar con Face ID, Touch ID o tu contraseña de Apple ID

✓ Espere a que se complete la instalación

4. **Abra la app:**

✓ Seleccione "Abrir" desde App Store o busca el ícono en tu pantalla de inicio

2) La aplicación se puede utilizar tanto en dispositivos móviles, como en computadora. En el dispositivo móvil se puede tomar las fotografías de dos maneras: Manual y automática. Se recomienda siempre usar el modo manual. La forma automática se puede realizar únicamente si se tiene un auto estabilizador para el celular. También se puede poner en un trípode y poner el artefacto que se desea realizar en 3D en una base giratoria automática.

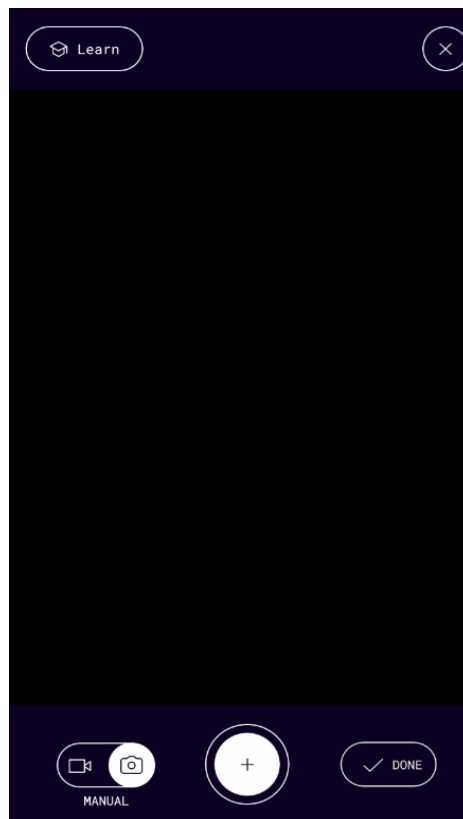


Figura 86. Modo manual de *Polycam*.



Figura 87. Modo automatico de *Polycam*

3) Para tomar fotografías se recomiendan los siguientes ángulos:

- ✓ Vista frontal:  $0^\circ$  (horizontal)
- ✓ Vista superior:  $90^\circ$  (desde arriba)
- ✓ Vista inferior:  $-90^\circ$  (desde abajo, si es necesario)
- ✓ Vistas laterales:  $45^\circ$ ,  $-45^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $-90^\circ$  (izquierda/derecha)
- ✓ Vistas oblicuas:  $30^\circ$  y  $60^\circ$  para mejor solapamiento

Una fila de fotos de vista frontal, superior o interior suelen ser suficientes para crear un modelo 3D aceptable.

Si se toman desde una cámara externa, estas se tienen que subir a la computadora.

4) En la computadora se debe seleccionar la opción “create.”

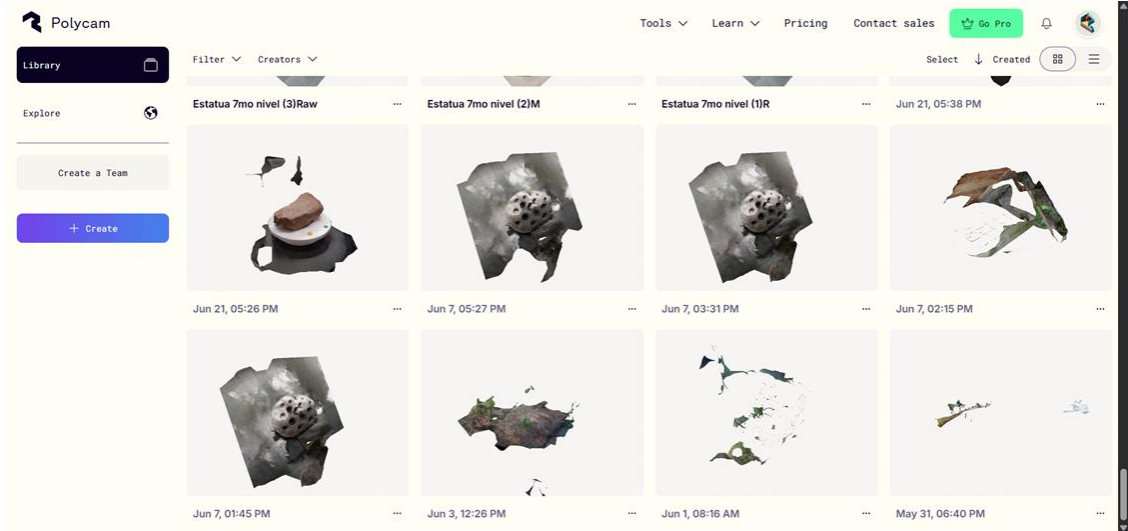


Figura 88. Vista de la pestaña principal de *polycam* en Google

5) Se selecciona la opción de “Create a *Photogrammetry model*”.

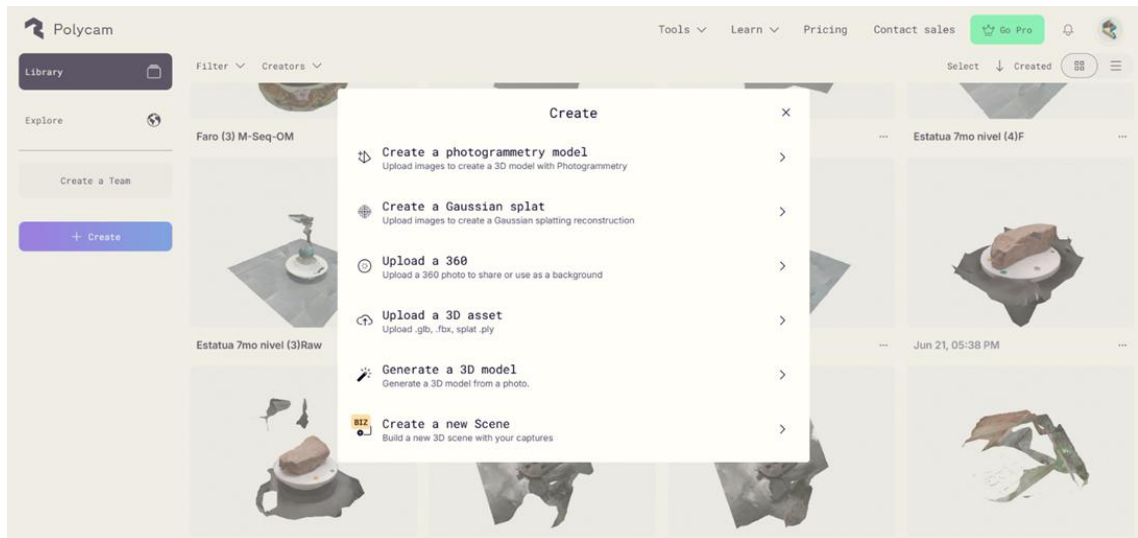


Figura 89. Opciones de creación que realiza *Polycam*

- 6) Mientras que en el dispositivo móvil se toman las fotos, en la página web se tienen que subir arrastrándolas o buscando la carpeta donde se encuentran las fotos.

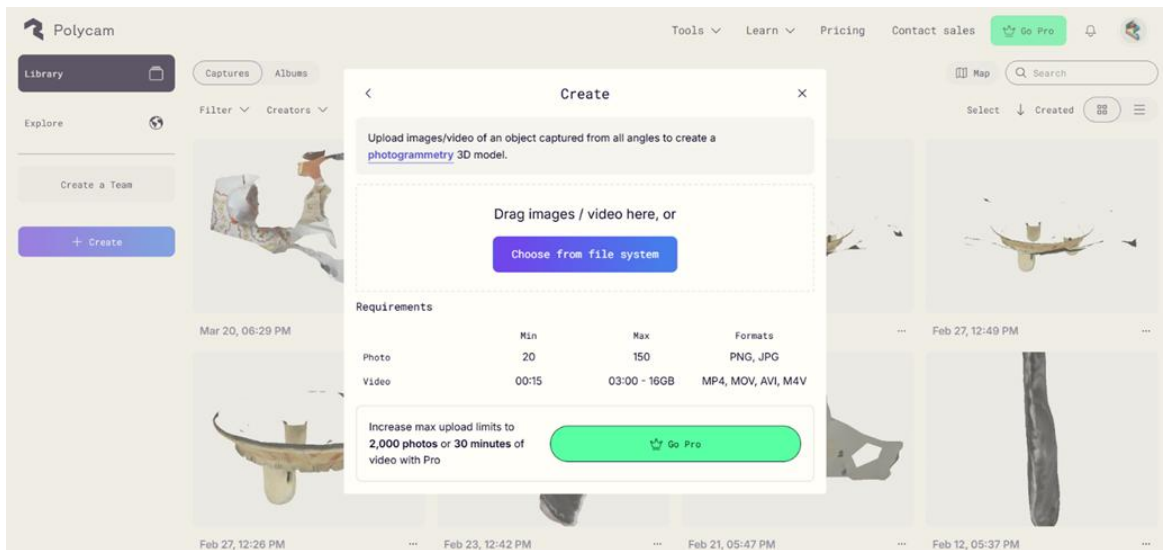


Figura 90. Ventana donde se suben las fotografías

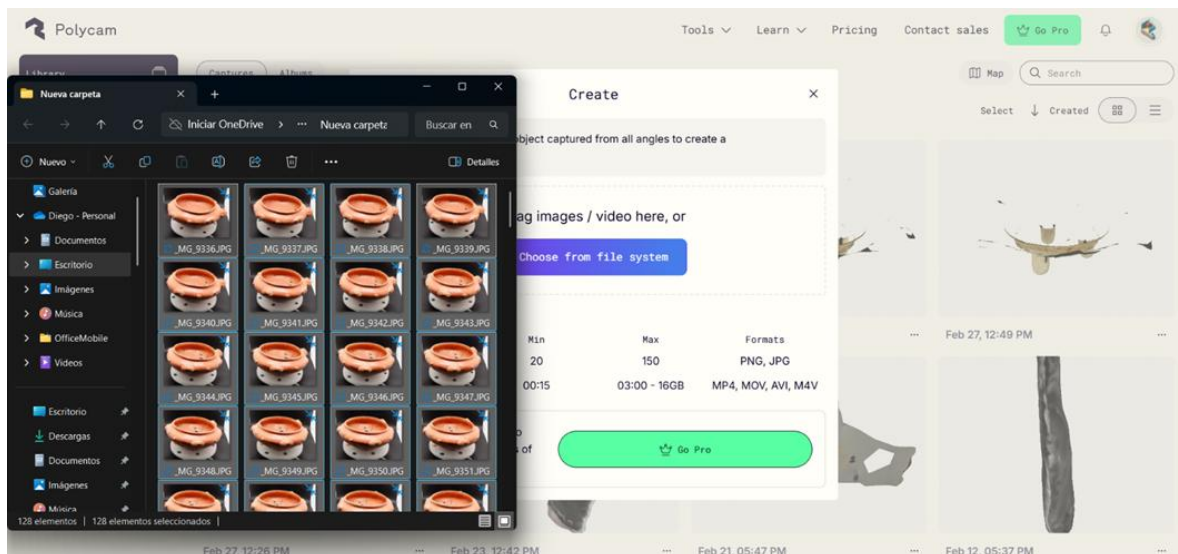


Figura 91. Selección de fotos del artefacto que se desea realizar en 3D

- 7) Ya con las fotos, estos pasos se siguen tanto en móvil como en computadora. Se crea el nombre con el que se guardará el archivo. Los detalles deseados ya dependen de cómo quiera uno el modelo 3D, normalmente se recomienda desde “Medium” hasta

“Raw”. Lo bueno de la aplicación es que describe cómo saldrá el modelo 3D por cada selección.

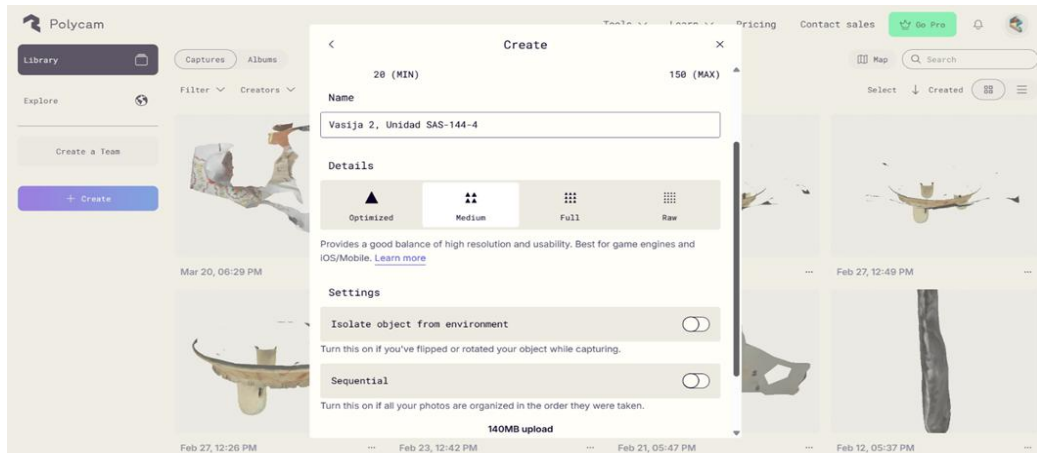


Figura 92. Vista de la ventana general donde se eligen los parámetros para crear el modelo 3D

Si se tomaron las fotografías de forma secuencial, se puede activar la opción “*sequential*”.

Si se ha volteado el objeto para tomar una fotogrametría completa de la pieza, se activa también “*settings*”.

8) Después el modelo aparecerá ya en la colección personal de *Polycam*. Del lado izquierdo se nos presenta un panel de herramientas con las siguientes opciones:

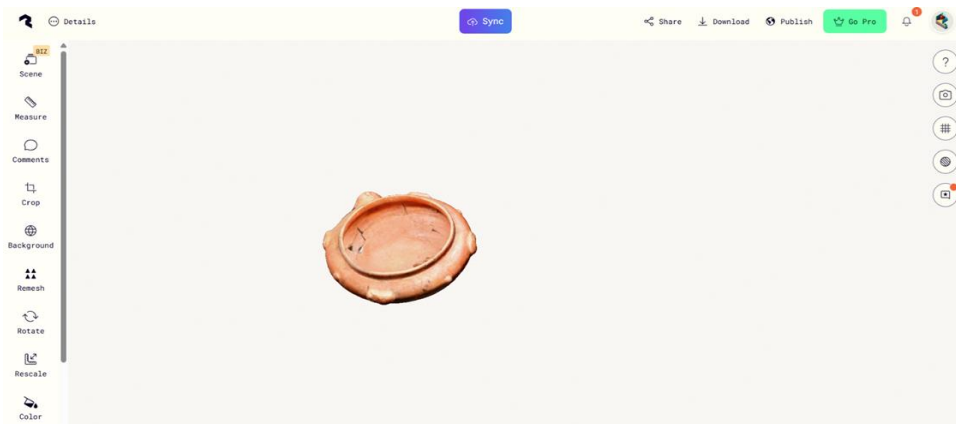


Figura 93. Vista general del espacio de trabajo en Polycam después de crear el modelo 3D

➤ ***Measure (Medir)***

**Función:** Permite tomar medidas exactas entre puntos en tu modelo 3D.

**Uso práctico:**

- ✓ Medir dimensiones de objetos escaneados
- ✓ Calcular tamaños para impresión 3D

➤ ***Comments (Comentarios)***

**Función:** Añadir notas o información a cada parte del artefacto creado.

**Uso práctico:**

- ✓ Marcar áreas específicas del modelo
- ✓ Registrar detalles importantes del escaneo

➤ ***Crop (Cortar)***

**Función:** Eliminar partes de piezas externas al modelo deseado.

**Uso práctico:**

- ✓ Borrar zonas no deseadas.
- ✓ Dejar un modelo único sin puntos flotantes.

➤ ***Background (Fondo)***

**Función:** Cambiar o eliminar el fondo del modelo.

**Uso práctico:**

- ✓ Crear fondos transparentes para integración en otros proyectos
- ✓ Mejorar la presentación visual
- ✓ Preparar modelos para áreas virtuales.

➤ ***Remesh (Retopología)***

**Función:** Reconstruye la malla 3D.

**Uso práctico:**

- ✓ Reducir el número de caras
- ✓ Suavizar superficies irregulares
- ✓ Preparar modelos para animación o vista de realidad virtual o aumentada

➤ **Rotate (Rotar)**

**Función:** Gira el modelo en cualquier eje.

**Uso práctico:**

- ✓ Corregir la orientación del escaneo/fotogrametría
- ✓ Posicionar el modelo para mejor visualización
- ✓ Preparar para exportación a otro software

9) El último paso consiste en exportar el modelo 3D al formato deseado. Siendo el OBJ o FBX las mejores opciones generales para utilizarlos posteriormente. Dos rasgos muy importantes de Polycam es que genera videos automáticos del modelo 3D y permite exportar las fotos tomadas desde el celular para editarlas y volverlas a subir.

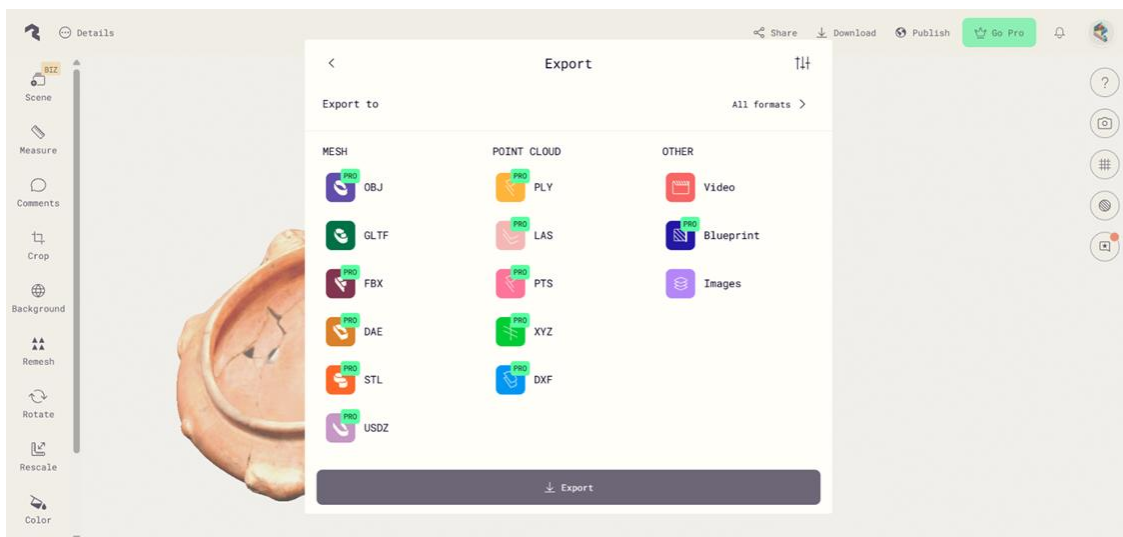


Figura 94. Formatos que permite Polycam exportar