



**Benemérita Universidad Autónoma de Puebla**

**Facultad de Arquitectura  
Colegio de Diseño Gráfico**

**Usos de las tecnologías de prototipado rápido y su aplicación  
en la reconstrucción virtual de piezas arqueológicas**

**Septiembre 2020**

**Tesis presentada para obtener el grado de Licenciatura  
en Diseño Gráfico**

**Presenta:**

De la Rosa Zayarzábal Mar Adriana  
Mejía Galeana Mariel  
Parra Clorio Edgar Omar

**Director de tesis:**

Mtro. Benjamín Dueñas Zambrano

**Asesores de tesis:**

Mtra. Elda Emma Lobo Vázquez  
Mtra. Adriana Quiroz Hernández



A mis guías que, con tanto amor y gratitud,  
tengo la fortuna de llamar mamá y papá.

### **Mar Adriana de la Rosa Zayarzabal**

Gracias al único que puede hacer todo posible, Dios.

Para mis papás y hermana por su paciencia, sustento y apoyo.  
Gracias a la mejor compañía Maisha y Kisha.

Para los que fueron y son parte del camino.

### **Mariel Mejía Galeana**

Les agradezco a mis padres Irma y Victor por enseñarme todo lo necesario para poder forjar mi propio camino en la vida, a entender que nada se consigue de manera fácil, que hay que luchar por ello cada día sin descanso, a ser agradecidos con aquellos que te brindan una mano compartiendo un poco de los frutos de tu esfuerzo y saber que toda derrota también es un aprendizaje para ser cada vez mejor.

A mi tío Octavio por ser un gran apoyo en los momentos difíciles, aconsejarme y extenderme su mano sin pedir nada a cambio.

Y por último a mi hermana Diana, que esta conmigo en todo momento apoyándome en todas mis decisiones.

A todos ustedes, muchas gracias por todo, les dedico este logro, se que estarán conmigo en muchos más y que sin importar el tiempo ni las circunstancias siempre estaré en deuda con ustedes.

### **Edgar Omar Parra Clorio**



Agradecemos especialmente a los integrantes de la *Ceramoteca Eduardo Noguera Auza* del *Centro INAH-Puebla* por su contribución, en tiempo y espacio, para el desarrollo de la investigación referente al pasado arqueológico del Estado de Puebla; así como, por la recepción de este proyecto.



## **ÍNDICE**

---

<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>013</b>
<b>SITUACIÓN ACTUAL</b>	<b>014</b>
<b>PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA</b>	<b>016</b>
<b>OBJETIVOS</b>	<b>017</b>
<b>FUNDAMENTACIÓN</b>	<b>017</b>
<b>HIPÓTESIS</b>	<b>018</b>
<b>LÍMITE Y ALCANCES</b>	<b>018</b>
<b>SÍNTESIS</b>	<b>019</b>

# 01

## CONCEPTO DE LA CONSERVACIÓN, RESTAURACIÓN Y DIFUSIÓN DEL PATRIMONIO ARQUEOLÓGICO A TRAVÉS DE LA DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL

<b>Introducción</b>	<b>023</b>		
<b>1.1 Patrimonio cultural</b>	<b>024</b>		
<b>1.2 Bienes culturales</b>	<b>024</b>		
1.2.1 Bienes arqueológicos en México	025		
<b>1.3 Gestión del patrimonio cultural</b>	<b>026</b>		
1.3.1 Conservación	026		
1.3.1.1 Conservación preventiva	026		
1.3.1.2 Conservación curativa	026		
1.3.1.3 Restauración	026		
1.3.2 Difusión	027		
<b>1.4 La implementación de las nuevas tecnologías para la restauración del patrimonio arqueológico</b>	<b>027</b>		
1.4.1 La impresión 3D	028		
1.4.2 Tipos de impresoras 3D	029		
1.4.2.1 Impresoras 3D personales	029		
1.4.2.2 Impresoras 3D profesionales	029		
1.4.2.2.1 Impresora profesional 3D <i>ProJet CJP 460 Plus</i>	029		
1.4.2.3 Impresoras 3D de producción	030		
1.4.3 Tipos de impresión 3D	031		
1.4.3.1 Impresión 3D por fotopolimerización	031		
1.4.3.1.1 Proceso DLP	031		
1.4.3.1.2 Estereolitografía o SLA	032		
1.4.3.2 Impresión 3D por fusión de lechos de polvo	032		
1.4.3.2.1 La sinterización selectiva por láser	032		
1.4.3.2.2 El proceso E-Beam	033		
1.4.3.2.3 La técnica 3DP	033		
1.4.3.3 Impresión 3D por extrusión de material	034		
1.4.3.4 Impresión 3D por encolado de papel	035		
1.4.4 Materiales empleados para los procesos de impresión	035		
1.4.4.1 Plásticos	035		
1.4.4.2 Otros materiales plásticos	037		
1.4.4.3 Metales	038		
1.4.3.4 Cerámicas y arenas	038		
1.4.3.5 Materiales orgánicos	039		
1.4.5 Las etapas del proceso de impresión 3D	040		
1.4.5.1 Etapa 1. Modelado	040		
1.4.5.1.1 Métodos para obtención de modelos 3D	040		
1.4.5.1.1.1 Modelado 3D asistido por computadora	040		
1.4.5.1.1.2 Escaneo 3D	041		
1.4.5.1.1.2.1 El escáner 3D	041		
1.4.5.1.1.2.2 Tipos de escáner 3D	042		
1.4.5.1.1.2.2.1 Escáner de luz modulada o estructurada	042		
1.4.5.1.1.2.2.1.1 Escáner profesional <i>3D Artec EVA</i>	042		
1.4.5.1.1.2.2.2 Escáner láser	043		
1.4.5.1.1.2.2.3 Escáner estereoscópico	043		
1.4.5.1.1.2.2.4 El Kinect	043		
1.4.5.1.1.2.2.5 Otras técnicas	044		
1.4.5.2 Etapa 2. Preparación del archivo	044		
1.4.5.2.1 Reparación del archivo STL	044		
1.4.5.2.2 Laminado del archivo STL	044		
1.4.5.2.3 Exportación del archivo STL	044		
1.4.5.3 Etapa 3. Impresión	045		
1.4.5.3.1 Elección del material	045		
1.4.5.3.2 Configuración de la impresora 3D	045		
1.4.5.3.3 Optimización del proceso	045		
1.4.5.3.3.1 Optimización de costo	045		
1.4.5.4 Etapa 4. Aplicación de acabados	045		
1.4.5.4.1 Limpieza de la pieza	045		
1.4.5.4.2 Solidificación de la pieza	046		
1.4.5.4.3 Preparación de la pieza	046		
1.4.5.4.4 Acabados de la pieza	047		
<b>Aspectos generales</b>	<b>049</b>		

## 02

### LA TECNOLOGÍA TRIDIMENSIONAL Y SU IMPLEMENTACIÓN EN EL PATRIMONIO CULTURAL ARQUEOLÓGICO

#### Introducción 053

#### 2.1 Tecnología 3D aplicada al patrimonio cultural 054

2.1.1 Digitalización 3D 054

2.1.2 Reconstrucción 3D 056

#### 2.2 Situación actual de la reconstrucción 3D 057

2.2.1 The digital Michelangelo Project 057

2.2.2 Impresión tridimensional en la restauración de obras de arte 058

2.2.3 Replica del Arco del Triunfo en Siria 058

2.2.4 Incendio del Museo Nacional de Río de Janeiro 059

2.2.5 Incendio en Notre Dame 059

#### 2.3 INAH 060

2.3.1 Instituto Nacional de Antropología e Historia 061

2.3.1.1 Antigüedad de las piezas 061

2.3.1.2 Recuperación y análisis de las piezas 061

#### Aspectos generales 063

## 03

### COMPARACIÓN METODOLÓGICA DE TECNOLOGÍA TRIDIMENSIONAL APLICADA A PROYECTOS ARQUEOLÓGICOS

#### Introducción 067

#### 3.1 Análisis metodológico 068

#### 3.2 Metodología 1 069

Guía básica para modelado en 3D de objetos cerámicos arqueológicos completos y fragmentados

3.2.1 Categorización de los objetos 069

3.2.2 Métodos y técnicas implementados 069

3.2.2.1 Fotografía de los fragmentos u objetos 069

3.2.2.2 Dibujo arqueológico 070

3.2.2.3 Reconstrucción del perfil / Recreación en 3D 070

3.2.3 Color 071

#### 3.3 Metodología 2 072

Reconstrucción virtual.

Un aporte a la arqueología en 3 dimensiones

3.3.1 Reconstrucciones de piezas cerámicas del sitio Las Marías (partido de Magdalena) 072

3.3.1.1 Categorización de las piezas 072

3.3.1.2 Remontaje de las piezas 072

3.3.1.3 Remontaje total de las piezas mediante reconstrucción virtual 072

3.3.2 Reconstrucciones de piezas cerámicas de sitios de la cuenca del río Salado (partido de Chascomús) 073

3.3.2.1 Agrupación de las piezas 073

3.3.2.2 Aproximación de uso de las piezas 074

3.3.2.3 Selección de la pieza o fragmento a trabajar 074

3.3.2.4 Reconstrucción tridimensional 074

#### 3.4 Metodología 3 075

Escaneado en 3D y prototipado de piezas arqueológicas. Las nuevas tecnologías en el registro, conservación y difusión del patrimonio arqueológico

3.4.1 Descripción de la pieza 075

3.4.2 Descripción del escáner 075

3.4.3 Proceso de escaneado 075

3.4.3.1 Preparación del escáner y la pieza a escanear 075

3.4.3.2 Captura y procesamiento de datos 076

3.4.4 Aplicación de color 076

3.4.5 Impresión 076

### 3.5 Metodología 4

Estudio geométrico de piezas arqueológicas a partir de un modelo virtual 3D

3.5.1 Escaneo tridimensional	077
3.5.1.1 Descripción de la pieza	077
3.5.1.2 Escáner tridimensional	077
3.5.1.3 Proceso de escaneo tridimensional	077
3.5.2 Modelado	078

### 3.6 Metodología 5

Reconstrucción digital de objetos arqueológicos

3.6.1 Adquisición de datos	079
3.6.2 Filtrado y registro de vistas	079
3.6.3 Fusión y corrección de huecos	080
3.6.4 Texturizado	080

### 3.7 Metodología 6

Reconstrucción 3D y cálculo volumétrico de recipientes cerámicos. Alcances y limitaciones para el estudio y conservación cerámica de la Tambería de Guandacol (provincia De la Rioja)

3.7.1 Catalogación y agrupación de los fragmentos	081
3.7.2 Registro de medidas de los fragmentos	081
3.7.3 Remontaje de tiestos	081
3.7.4 Registro fotográfico y reconstrucción tridimensional de los fragmentos	082
3.7.4.1 Registro fotográfico de los fragmentos	082
3.7.4.2 Reconstrucción tridimensional de los fragmentos	082
3.7.5 Cálculo volumétrico	083

### 3.8 Comparación metodológica de tecnología tridimensional aplicada a proyectos arqueológicos

Tabla uno	085
Tabla dos	086
Tabla tres	087

### Aspectos generales

## 077 04

### METODOLOGÍA PARA LA CAPTURA, RECONSTRUCCIÓN Y REPRODUCCIÓN TRIDIMENSIONAL DE UNA VASIJA DE BARRO

<b>Introducción</b>	<b>091</b>
<b>4.1 Proceso experimental</b>	<b>092</b>
4.1.1 Escaneo tridimensional	092
4.1.1.1 Prueba uno: vasija completa	093
4.1.1.2 Prueba dos: vasija fragmentada en dos partes	094
4.1.1.3 Prueba tres: vasija fragmentada en múltiples partes	095
4.1.2 Selección y limpieza de capturas de datos tridimensionales	097
4.1.3 Reconstrucción digital en software modelado 3D	097
<b>4.2 Diagrama de flujo</b>	<b>098</b>
Metodología para la captura, reconstrucción y reproducción tridimensional de una vasija de barro	
<b>4.3 Elección de las piezas</b>	<b>100</b>
<b>4.4 Toma fotográfica de las piezas</b>	<b>101</b>
<b>4.5 Escaneo 3D</b>	<b>101</b>
4.5.1 Procedimiento del escaneo	101
4.5.1.1 Preparación de las piezas	101
4.5.1.2 Conexión e inicio del programa	101
4.5.1.3 Escaneo de las piezas	101
4.5.1.3.1 Pruebas de escaneo	101
<b>4.6 Selección y limpieza del escaneo 3D</b>	<b>102</b>
4.6.1 Selección	102
4.6.2 Limpieza	103
4.6.2.1 Selección de la goma	103
4.6.2.2 Selección de las áreas no deseadas	103
4.6.2.3 Eliminación de las áreas seleccionadas	104
<b>088</b>	<b>088</b>

<b>4.7 Reconstrucción de la pieza en 3D</b>	<b>105</b>	<b>4.11 Acabados</b>	<b>133</b>
4.7.1 Duplicado de piezas	105	<b>4.12 Resultados</b>	<b>133</b>
4.7.2 Fusión de las piezas	107	<b>Aspectos generales</b>	<b>135</b>
4.7.2.1 Registro de las partes escaneadas	107		
4.7.2.2 Limpieza del registro	107		
4.7.2.3 Fusión	107		
4.7.2.4 Cierre de huecos	110		
4.7.2.5 Optimización del modelo	110		
4.7.2.6 Exportación del modelo	110		
<b>4.8 Corrección y optimización del modelo 3D para su impresión</b>	<b>111</b>	<b>ASPECTOS GENERALES FINALES</b>	<b>137</b>
4.8.1 Corrección del modelo	111	<b>GLOSARIO</b>	<b>139</b>
4.8.1.1 Selección del archivo exportado	111	<b>REFERENCIAS</b>	<b>141</b>
4.8.1.2 Generación de grosor al modelo	112	<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>143</b>
4.8.1.3 Retoque del modelo	112		
4.8.1.3.1 Suavizado	112		
4.8.1.3.2 Movimiento	112		
4.8.2 Optimización del modelo	113		
4.8.2.1 Duplicado del modelo	113		
4.8.2.2 Simplificación de la malla	113		
4.8.2.3 Subdivisión del modelo	114		
4.8.2.4 Detalles	114		
<b>4.9 Texturizado</b>	<b>115</b>		
4.9.1 Visualización del modelo en 2D	115		
4.9.2 Duplicado del modelo	115		
4.9.3 Visualización y optimización de cortes	115		
4.9.4 Aplicación de color y textura	119		
4.9.4.1 Escalado y opacidad	119		
4.9.4.2 Proyección, texturizado y pintado del modelo	121		
4.9.4.3 Adición de texturizado y pintado al UV Map	125		
4.9.4.4 Exportación del modelo	126		
<b>4.10 Impresión 3D</b>	<b>127</b>		
4.10.1 Conexión computadora – impresora	127		
4.10.2 Preparación de la plataforma de impresión	127		
4.10.3 Importación del modelo a imprimir	128		
4.10.4 Rotación del modelo a imprimir	129		
4.10.5 Visualización del tiempo y la cantidad de material	131		
4.10.6 Impresión	131		
4.10.7 Postimpresión	133		



## INTRODUCCIÓN

La tecnología ha revolucionado diversos aspectos de la vida del ser humano facilitando el encontrar soluciones alternas a problemas aparentemente sin respuesta. Su impacto es indiscutible, haciéndose patente incluso en aquellos relacionados con la educación, la investigación y el patrimonio cultural.

Con el nacimiento de las tecnologías de prototipado rápido, que permiten la digitalización y el modelado -casi instantáneo- de objetos tridimensionales, se ha abierto un mundo de posibilidades para la creación y reconstrucción de los mismos. Sin embargo, el uso de estas herramientas requiere un nivel de experticia elevado y multidisciplinario.

En tal sentido, las universidades -como instituciones generadoras de conocimiento-, tienen el compromiso con la sociedad de compartir los beneficios de su carácter formativo y el resultado de sus investigaciones.

La Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP), al ser una institución educativa de carácter público, recibe una serie de subsidios que se destinan a la adquisición de infraestructura y materiales que refuerzan la formación académica de los estudiantes, mismos que pueden -y deben- ser compartidos para el beneficio social.

Siguiendo tal premisa, desde el Laboratorio de nuevas tecnologías de la Facultad de Arquitectura (Departamento de Tecnologías 3D), ha surgido la inquietud de trascender los límites propios del entorno educativo y compartir con el Instituto Nacional de Antropología e Historia (INAH), una institución dedicada a la conservación del patrimonio cultural, el cúmulo de herramientas y conocimientos que se han adquirido respecto al uso y aplicación de los instrumentos de digitalización, modelado e impresión de objetos tridimensionales, ya que éstos equipos pueden ser utilizados como una alternativa para la preservación y reconstrucción de piezas con alto valor patrimonial e histórico.

Al realizar las primeras experimentaciones, se ha detectado un área de oportunidad en este intercambio simbiótico: la carencia de una metodología formal de trabajo para el escaneo de piezas arqueológicas, que permita la obtención de imágenes digitales o virtuales de la pieza original, tanto para su impresión como su posterior exhibición en salas y museos; misma que pretende ser abordada en la presente investigación.

## SITUACIÓN ACTUAL

En las últimas décadas, se ha mantenido una tendencia de crecimiento respecto al avance tecnológico y su subsecuente aplicación en las actividades cotidianas del ser humano; dichos avances tecnológicos ha beneficiado numerosas áreas de la labor humana y han tenido un impacto directo de tipo cultural y económico.

Dentro de las tecnologías emergentes que más progreso han reportado, son las tecnologías de fabricación aditiva o impresión 3D, cuya versatilidad de integración con distintas áreas del conocimiento humano, le ha conferido un estatus de oportunidad para el impulso de una creciente cantidad de proyectos que ven, en este tipo de tecnologías, la oportunidad de implementarse. Para Jeremy Rifkin (2011), la integración de las tecnologías de fabricación aditiva forma parte de uno de los cinco pilares esenciales sobre los cuales depende el sostenimiento de los que él llama: “la tercera revolución industrial”.

Desde el año 1987 a 1997 la impresión 3D, como tecnología emergente, mantuvo un crecimiento acelerado del 58% anual, como lo reporta el experto Terry Wholers, especialista en fabricación aditiva, quien estima que el mercado de la impresión 3D debería alcanzar 3,700 millones de dólares en 2015, y más de 6, 000,000 en 2019; porcentaje y cantidad que sigue aumentando año con año. Del mismo modo Bin Maidin (2011), menciona que la industria de las impresoras 3D alcanzó un aumento comparativo, entre los años 2012 y 2013, de un 43%, y ha seguido en aumento exponencial.

La principal ventaja de la manufactura aditiva, es resultado de dos aspectos esenciales; primero, esta tecnología ofrece una libertad geométrica de creación, y segunda, la capacidad de manejar múltiples materiales. La manufactura aditiva, se emplea típicamente para un volumen de producción bajo, y para aplicaciones en piezas que geométricamente son complejas para realizar por procedimientos convencionales. Sin embargo, la manufactura aditiva, no está pensada para sustituir todos los métodos de reproducción en serie. De hecho, los métodos de manufactura tradicionales ofrecen un rango más amplio de posibilidades en el uso de materiales, mejores propiedades mecánicas de los mismos y un mejor acabado de las superficies.

A partir del surgimiento de estas tecnologías, sus características han sostenido una optimización constante, mejorando materiales, optimizando tiempo y reduciendo costos, lo que ha permitido su comercialización, principalmente en países europeos y Estados Unidos. En América Latina, particularmente en México, las referencias sobre el uso y manejo de estos equipos han empezado a tener un auge paulatino.

Después de las consideraciones anteriores, el mercado de la impresión 3D abre nuevas posibilidades para la generación de opciones de emprendimiento, investigación multidisciplinaria y especialización en capacitación técnica; por lo tanto, las competencias en el conocimiento y dominio de esta tecnología es una necesidad que se hace cada vez más patente.

La revista *Forbes*, así como el reporte del Foro Económico Mundial 2016, que se llevó a cabo en Davos, Suiza, identifica una tendencia en el descenso

mundial en la fabricación desde la industria corporativa, en oposición al aumento de la fabricación particular o independiente, basado en las tecnologías de impresión 3D. Al mismo tiempo identifica una serie de tendencias económico-laborales al 2020, que conllevan el desarrollo de habilidades para adaptarse a estas nuevas tendencias; haciendo evidente el papel que estas tecnologías, jugarán como elementos del desarrollo económico futuro.

Es así como la evolución de estas tecnologías ha propiciado la creciente necesidad de tener una capacitación profesional que abarque las características estéticas, prácticas y funcionales, que se requieren para la impresión de objetos y piezas que, muchas veces por su complejidad, no pueden ser realizadas con las técnicas convencionales de producción.

En la Facultad de Arquitectura de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (FABUAP), en el mes de febrero de 2016, se concretó la adquisición de dos equipos de impresión 3D (FDM y SLA), con el objetivo de ofrecer a los estudiantes de Arquitectura, Diseño Gráfico y Diseño Urbano, una herramienta de alta calidad que permitiera obtener piezas prototipo a escala de sus maquetas, dummies y objetos tridimensionales varios.

En el Modelo Universitario Minerva se señala que dentro de los modelos de crecimiento económico a largo plazo, varios autores entre ellos Paul Romer plantean la Teoría del Crecimiento Económico Endógeno o Nueva Teoría del Crecimiento Económico, la cual le da un papel fundamental a la consideración del progreso técnico sustentado en el conocimiento científico y tecnológico.

El desarrollo endógeno, que se enfoca al crecimiento interno de una organización (país, región, comunidad, institución) cuando surge la necesidad de terminar con la dependencia limitada por el ambiente externo y se centra en la educación, entrenamiento y en el desarrollo de ambientes innovativos y uso de nuevas tecnologías dentro de la misma, ofrece una alternativa a la industrialización de los países.

La Universidad, al insertarse con la sociedad, no asume una postura de servicio, sino que participa de manera contextualizada en el modelo de crecimiento y desarrollo endógeno de la sociedad, en una perspectiva local, regional, nacional e internacional, como enfoque alternativo a las políticas de corte neoliberal que han tenido impactos negativos en el desarrollo de América Latina y el Caribe. (Modelo Universitario Minerva, 2006, pp. 50)

Con esta perspectiva se seleccionó el Instituto Nacional de Antropología e Historia (INAH) donde la tecnología de prototipado rápido pudiera aportar. Como parte de su misión, esta institución se encarga de la investigación, conservación y difusión del patrimonio arqueológico, antropológico, histórico y paleontológico de la nación, con el fin de fortalecer la identidad y memoria de la sociedad. Fundado con el objetivo de garantizar la investigación, definiciones técnicas, protección y difusión del patrimonio prehistórico, arqueológico, antropológico, histórico y paleontológico de México.

El instituto calcula que existen alrededor de 200 mil sitios con vestigios arqueológicos, de éstos, 181 están abiertos al público. Asimismo, tiene a su cargo una red de 120 museos entre nacionales, regionales, locales, de sitio, comunitarios y metropolitanos. Colaboran más de 800 académicos en las áreas de historia, antropología social, arqueología, lingüística, etnohistoria,

etnología, antropología física, arquitectura, conservación del patrimonio y restauración; lo que representa un área de oportunidad para la vinculación de nuestra institución con especialistas del área que se encuentran desarrollando proyectos de investigación con un alto impacto social.

Al respecto, la Arq|ga. Elisa Pérez Alemán, investigadora del INAH, identifica que se necesitan medios para la conservación de las piezas arqueológicas, que son afectadas por el paso del tiempo, la manipulación y exhibición. Lo anterior, con el propósito de difundir entre la sociedad tanto el conocimiento como la concientización del cuidado y preservación de los bienes arqueológicos.

## **PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

---

El planteamiento de la función social de la Universidad Pública requiere más compromiso de los universitarios y acciones de mayor impacto para impulsar un desarrollo humano y social más acelerado y equitativo, en corresponsabilidad con todos los sectores sociales. Por lo tanto, siendo consecuente con la autonomía universitaria, la BUAP está comprometida a contribuir activamente a la solución de los problemas sociales, económicos, filosóficos y científicos, asumiendo su responsabilidad en la generación, aplicación y difusión del conocimiento y la cultura para el desarrollo equilibrado, justo y sustentable de nuestro país.

La Facultad de Arquitectura de la BUAP, busca dar apoyo a la sociedad desde su especialización, descansado en el conocimiento de sus docentes y la infraestructura con la que cuenta. A través de su laboratorio de nuevas tecnologías (Departamento de Tecnologías 3D), pretende dar solución a problemas o necesidades subyacentes en la comunidad poblana, considerando que las tecnologías de prototipado rápido son herramientas versátiles que pueden beneficiar a diversas disciplinas. Sin embargo, el uso del equipo se ha limitado a los espacios institucionales.

La novedad de estos equipos ha dificultado el acercamiento a capacitaciones técnicas profesionales sobre el manejo de los equipos, a pesar de esto, se cuenta con mano de obra que se ha autocapacitado, en cuanto a operatividad de los equipos, y por lo tanto se ha visto en la necesidad de generar sus propios procesos de trabajo.

Tomando en cuenta el aporte de estas tecnologías, se buscaron áreas de oportunidad en instituciones externas a la Universidad que se puedan ver beneficiadas con el uso de estos equipos. El Instituto Nacional de Antropología e Historia (Centro INAH-Puebla) es una institución que se enfrenta a la siguiente problemática: un acervo amplio de piezas arqueológicas de las cuales gran parte son piezas incompletas o rotas que, por su estado, impiden su divulgación.

## OBJETIVOS

### OBJETIVO GENERAL

Desarrollar una metodología para la reconstrucción virtual de piezas arqueológicas dañadas del Instituto Nacional de Antropología e Historia (Centro INAH-Puebla) implementando softwares de modelado tridimensional; así como, las herramientas de prototipado rápido de la Facultad de Arquitectura de la BUAP.

### OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Identificar la teoría de la reconstrucción virtual como herramienta para la reproducción de objetos.
2. Analizar las aplicaciones que ha tenido la reconstrucción virtual desde sus orígenes hasta el año 2019.
3. Comparar métodos para la captura de piezas tridimensionales y su posterior reproducción para su manipulación.
4. Diseñar el proceso de reconstrucción virtual de un vestigio arqueológico deteriorado fragmentado.

## FUNDAMENTACIÓN

Dada la naturaleza de la problemática, se ha determinado que el enfoque de la investigación será empírico-deductivo, puesto que destaca lo observacional y la experiencia.

El diseño de la investigación será experimental, pues el resultado de esta será aplicado para demostrar su validez.

El enfoque será de tipo positivista con un alcance explicativo, que posibilite analizar los orígenes de la problemática y las posibles opciones para resolverlo; así mismo permitirá llevar un registro del proceso hasta su finalización.

Serán ocupados los métodos teóricos de análisis/síntesis, inducción/deducción, abstracción/concreción y método dialéctico a lo largo de todo el proceso del desarrollo de la investigación.

Por otra parte, se utilizará el método Histórico Lógico para comprender la evolución del proceso de reconstrucción virtual como actividad para la conservación de patrimonio y el uso de las nuevas tecnologías de prototipado rápido a través del tiempo.

Finalmente, el método Sistémico Estructural/Funcional ayudará a definir y elaborar la metodología para la reconstrucción virtual de piezas arqueológicas usando las tecnologías de prototipado rápido.

## **HIPÓTESIS**

---

Si se desarrolla una metodología para la reconstrucción virtual de piezas arqueológicas dañadas pertenecientes al acervo del Instituto Nacional de Antropología e Historia (Centro INAH-Puebla); entonces, se tendrá una herramienta para optimizar los procesos de reconstrucción tradicionales empleados dentro del acervo del Instituto Nacional de Antropología e Historia (Centro INAH-Puebla).

## **ALCANCE Y LÍMITES**

---

### **ALCANCE**

Diseño metodológico para la reconstrucción tridimensional virtual y física de cualquier pieza arqueológica dañada de pequeño formato perteneciente al acervo del Instituto Nacional de Antropología e Historia del Estado de Puebla.

### **LÍMITES**

1. La metodología se limita a trabajar con piezas arqueológicas deterioradas de pequeño formato pertenecientes al acervo del Instituto Nacional de Antropología e Historia del Estado de Puebla.
2. El proceso para la reconstrucción del modelo tridimensional se sujeta al empleo de los softwares nombrados en este documento.

## SÍNTESIS

El patrimonio cultural, se define a través de los límites históricos y culturales conformados por las ideas y creencias de una sociedad en un tiempo histórico determinado. A su vez, este se integra por bienes culturales, tangibles e intangibles, provenientes de las diversas actividades humanas que poseen un significado de identidad social.

Los bienes arqueológicos, un grupo particular de los bienes culturales, integrado por vestigios fabricados y materiales naturales modificados por el hombre, proporcionan una fuente de información concerniente al pasado histórico de la sociedad a la que pertenecieron; así como, una comprensión de su evolución.

Debido a su importancia, como testimonios del progreso e identificación social, se han llevado a cabo procesos que permiten su apropiada gestión cultural; es decir, su conservación preventiva, curativa, restauración y difusión, a través del empleo de las tecnologías de digitalización e impresión tridimensional.

De esta manera, se ha posibilitado la fabricación de piezas, virtuales y físicas, con información precisa y fidedigna proveniente de vestigios patrimoniales originales mediante herramientas que permiten la captura de datos digitales, la elaboración de modelos virtuales por computadora y la impresión tridimensional en diversos materiales (plástico, metal, cerámica y material orgánico).

Las instituciones dedicadas a la preservación y comprensión del pasado histórico y cultural de la humanidad, han implementado estos procesos para la reconstrucción, restitución y reproducción exacta, tanto de la geometría como del texturizado, de los bienes arqueológicos; ya que, al ser métodos no invasivos, permiten la conservación de la historicidad y autenticidad de las piezas. Así como, la disminución del tiempo requerido para realizar restauraciones manuales con una mínima manipulación e intervención sobre los objetos.

Por otra parte, la digitalización de vestigios arqueológicos, no solo permite la restauración de aquellos existentes también, da apertura a la recuperación del patrimonio cultural no existente; es decir, de aquellos bienes, muebles e inmuebles, que ha desaparecido por la intervención humana o natural, pero que aún cuentan con registros documentales o fotográficos. De esta manera, se permite un mejor acercamiento social para el reconocimiento físico y visual de todos los bienes que conforman el patrimonio cultural.

En México, el Instituto Nacional de Antropología e Historia, dedicado a la excavación, rescate y restauración de monumentos históricos, vestigios y zonas arqueológicas, ha implementado las técnicas de captura tridimensional para la constitución de acervos virtuales donde se encuentran diversos modelos tridimensionales de objetos y zonas arqueológicas.

Al respecto, han surgido metodologías que, a través de diversos casos de estudio, explican el empleo de herramientas y técnicas para la generación de modelos tridimensionales de piezas arqueológicas que presentan algún deterioro.

Este panorama se amplía con el estudio y análisis de seis casos, por el método cuantitativo meta-análisis, para la integración sintetizada de los resultados obtenidos respecto a la implementación de la tecnología tridimensional en el ámbito de la reconstrucción de piezas arqueológicas fragmentadas.

A través de la síntesis de información, se detectan los pasos recurrentes para el desarrollo metodológico de procedimientos de reconstrucción 3D; tales como: categorización y captura fotográfica de las piezas, proceso de captura de datos (empleo del escáner tridimensional o fotogrametría), reconstrucción digital del objeto a partir de capturas digitales y aplicación de detalles (color y textura).

La recopilación de investigaciones primarias; así como, la aplicación del método empírico-deductivo, derivó en el diseño de una nueva metodología para la implementación de la reconstrucción tridimensional digital en piezas arqueológicas deterioradas de pequeño formato pertenecientes al acervo del Instituto Nacional de Antropología e Historia del Estado de Puebla.

Los pasos presentados permiten al usuario adquirir el conocimiento necesario, respecto al manejo de herramientas digitales y softwares de modelado tridimensional, para la restauración de piezas arqueológicas fragmentadas de pequeño formato elaboradas con barro cocido.

Finalmente, se presenta la reproducción a escala obtenida de la vasija usada para la elaboración de la metodología; a través de la exposición de un procedimiento que explica los procesos para: la clasificación de piezas, el registro fotográfico, el proceso de escaneado tridimensional y la reconstrucción del modelo tridimensional para su posterior texturizado, impresión y aplicación de acabados.

# **01**

## **CONCEPTO DE LA CONSERVACIÓN, RESTURACIÓN Y DIFUSIÓN DEL PATRIMONIO ARQUEOLÓGICO A TRAVÉS DE LA DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL**



## INTRODUCCIÓN

El patrimonio cultural de una nación está conformado por los bienes tangibles e intangibles que por su significación y valoración integran su cultura. Estos, definen su vida en sociedad; así como, una parte significativa de su identidad histórica tanto individual como colectiva.

En México existen diversos patrimonios culturales y, por consiguiente, múltiples bienes culturales que, por su importancia histórica, integran parte de la riqueza cultural de la sociedad. En este aspecto, las disciplinas patrimoniales, como la Arqueología, son poseedoras de un amplio acervo de vestigios tangibles que constituyen parte esencial de los bienes patrimoniales del pasado histórico y cultural de la sociedad.

Debido a su trascendencia para la preservación de la memoria de la existencia humana, los bienes patrimoniales arqueológicos requieren una gestión cultural que propicie su conservación a través de procesos que incluyan una adecuada restauración para su investigación y difusión. Lo anterior, tomando en consideración la mínima intervención de los objetos para evitar la distorsión o la pérdida de información vital.

A través de la implementación de las nuevas tecnologías, la Arqueología ha encontrado una alternativa no invasiva para los procesos de conservación, restauración, investigación y divulgación del material arqueológico mediante la aplicación de la digitalización tridimensional.

## PATRIMONIO CULTURAL

La cultura es dinámica; es decir, se transforma constantemente debido a diversos factores históricos y sociales, tanto internos como externos, que intervienen en ella. Por consiguiente, su definición; así como, los conceptos que derivan de la misma se han transformado respondiendo al momento histórico que presencia la sociedad.

De esta manera, el concepto de patrimonio cultural resulta “[...] una invención y una construcción social”. (Llorenç, 2000, p. 115) determinada por factores históricos, culturales y temporales que intervienen en su interpretación. Es decir, la concepción de patrimonio cultural, se adapta a la renovación ideológica que define la identidad histórica y cultural de los diferentes grupos humanos a través del tiempo.

En consecuencia se entiende como patrimonio cultural “El conjunto de manifestaciones u objetos nacidos de la producción humana, que una sociedad ha recibido como herencia histórica, y que constituyen elementos significativos de su identidad como pueblo. Tales manifestaciones u objetos constituyen testimonios importantes del progreso de la civilización y ejercen una función modélica o referencial para toda la sociedad, de ahí su consideración como bienes culturales”. (Llull, 2005, p.181)

## BIENES CULTURALES

Aunado al concepto de patrimonio cultural es necesario establecer aquello qué es considerado como bien cultural, para obtener una amplia visión de los recursos que lo conforman.

De acuerdo con Prats (como se citó en Evolución del concepto y de la significación social del patrimonio cultural, 2005) la noción de bien cultural incluye “[...] no solo monumentos históricos y obras de arte, sino también elementos folklóricos, bibliográficos, documentales, materiales, etc. cuya significación [...] sea valiosa por tratarse de manifestaciones de la actividad humana en general”.

Complementado el argumento anterior, Josué Llull (2005) considera que el bien cultural es aquel “[...] de carácter histórico y artístico, [...] archivístico, documental, bibliográfico, material y etnográfico, junto con las creaciones y aportaciones del momento presente y el legado inmaterial”. (p.181)

Los bienes culturales se dividen en tangibles e intangibles. Los primeros corresponden a realizaciones materiales, tanto muebles como inmuebles. Los segundos son aquellos que tienen una existencia inmaterial.

Los bienes culturales muebles son aquellos “[...] objetos arqueológicos, históricos, artísticos, etnográficos, tecnológicos, religiosos, artesanales o folklóricos que constituyen colecciones importantes para la ciencia, la historia del arte y la conservación de la diversidad cultural del país”. (FUSDA, 2011, pp.58)

En tanto que los bienes culturales inmuebles están integrados por los “[...] lugares, sitios, edificaciones [...] de interés o valor relevante desde el punto de vista arquitectónico, arqueológico, histórico, artístico o científico [...]”; así como, “[...] producciones humanas que no puede ser trasladados de un lugar a otro [...]”. (FUSDA, Ibidem opus cit)

Los bienes culturales intangibles incluyen el sistema de valores, tradiciones y creencias que caracterizan una sociedad o un grupo social.

### 1.2.1

## BIENES ARQUEOLÓGICOS EN MÉXICO

Para el caso de la Arqueología los bienes culturales que conforman su patrimonio son todos los restos materiales que ha dejado el legado de la humanidad, desde la antigüedad hasta el presente; es decir, los elementos o vestigios fabricados; así como, los materiales naturales que han sido modificados por el hombre para satisfacer sus necesidades y que, en la actualidad, ayudan a comprender el pasado histórico de la sociedad a la que pertenecieron.

La Ley federal sobre monumentos y zonas arqueológicas, artísticos e históricos (México, 1972), en su artículo 28, define como bien arqueológico nacional a los “[...] bienes muebles e inmuebles, producto de culturas anteriores al establecimiento de la hispánica en el territorio nacional, así como los restos humanos, de la flora y de la fauna, relacionados con esas culturas”.

En consecuencia con la legislación, Méndez (s.f.) precisa que estos testimonios materiales <sup>(1)</sup> pueden incluir “[...] bienes muebles de concha, hueso, piedra, barro, papel, fibras naturales, madera, vidrio volcánico y metal [...]”. (pp.6)



1

INAH. (s. f.).  
*Vasija perro cebado* [Fotografía].  
Recuperado de [https://reproducciones.inah.gob.mx/reproduccion\\_.php?rd=MTcx&lang=](https://reproducciones.inah.gob.mx/reproduccion_.php?rd=MTcx&lang=)

## GESTIÓN DEL PATRIMONIO CULTURAL EN MÉXICO

Debido a la importancia que representa el patrimonio cultural y, en particular, los bienes arqueológicos para la nación, es de capital importancia su apropiada, conservación y difusión; es decir, una gestión cultural que permita la trascendencia y disponibilidad, en diferentes lugares y tiempos, de los testimonios materiales que constituyen y definen la identidad social mexicana.

En este aspecto, la era de la digitalización, proporciona a la gestión cultural opciones de intervención más óptimas para llevar a cabo los procesos que la constituyen.

### 1.3.1

#### CONSERVACIÓN

La conservación del patrimonio cultural tiene como objetivo la salvaguarda de las propiedades físicas de un bien cultural, a través de la implementación de acciones que respeten su significado y aseguren su trascendencia; así como, su disponibilidad con la sociedad actual y futura. Esta se encuentra constituida por tres tipos de intervención: la conservación preventiva, la conservación curativa y, finalmente, la restauración.

#### 1.3.1.1

##### CONSERVACIÓN PREVENTIVA

La conservación preventiva incluye las acciones indirectas que son aplicadas en el área circundante del bien cultural; es decir, aquellas acciones que no modifican físicamente al objeto ni interfieren de ninguna manera con su estructura o materiales que lo componen.

Estas acciones tienen como propósito evitar o disminuir deterioros; así como, pérdidas totales de los bienes.

#### 1.3.1.2

##### CONSERVACIÓN CURATIVA

En contraparte, la conservación curativa comprende las acciones directas que son aplicadas para detener los procesos dañinos de un bien; tales como, fragilidad en la estructura o deterioro en los materiales.

#### 1.3.1.3

##### RESTAURACIÓN

Al igual que la conservación curativa, la restauración también aplica acciones directas a un bien cultural que presenta una pérdida parcial de su significado o función debido a alteraciones o deterioros pasados que dificultan su apreciación, comprensión y uso. Así pues, la restauración “[...] se ocupa del objeto y se encarga de preservar su valor histórico-artístico [...]”. (Escriva, F. & Madrid, J.A., pp.13, 2010)

Por otra parte la aplicación de las nuevas tecnologías en este ámbito, ha propiciado la sustitución de las técnicas tradicionales por métodos que permiten la reconstitución, restitución y recreación de los bienes culturales;

a través de técnicas digitales no invasivas que permiten una visualización completa de los mismos sin afectar su historicidad y autenticidad presentes en su modelo original.

En su artículo, *El mundo virtual en la restauración: Aplicaciones virtuales para la conservación y restauración del patrimonio*, Escrivá & Madrid (2010), refieren que Bernardi considera que la restauración virtual es una “[...] serie de metodologías destinadas a restituir virtualmente los caracteres originales de una obra [...]” (pp. 15) mediante la digitalización y modelación de sus restos materiales existentes.

### 1.3.2

## DIFUSIÓN

La difusión, tiene como propósito poner el patrimonio al alcance de la sociedad; es decir, facilitar su desplazamiento, acceso y consulta de manera efectiva para proporcionar herramientas de creación, comunicación e intercambio de información.

A través de la digitalización, los bienes culturales se preservan mediante formatos digitales que permiten la perpetuidad de su contenido; así como, su divulgación a través del ciberespacio que conforma la memoria virtual de las diversas naciones y culturas de las generaciones actuales y futuras.

De esta manera, el proceso de digitalización del patrimonio tangible, no solo obedece a la preservación sino también a la difusión del mismo; ya que, de acuerdo a J. Voutssás (2009), “Se digitaliza [...] para facilitar la [...] distribución, [...] el acceso y la consulta [...] a mayor distancia y durante todo el tiempo [...] a numerosos lectores y usuarios [...] en años o siglos futuros.” (pp.13)

## 1.4

## IMPLEMENTACIÓN DE LAS NUEVAS TECNOLOGÍAS PARA LA RESTAURACIÓN DEL PATRIMONIO ARQUEOLÓGICO

En los últimos años, el empleo de las nuevas tecnologías ha irrumpido de manera impactante en todos los ámbitos de la sociedad. De esta manera, la gestión del patrimonio arqueológico se ha visto beneficiada a través de la implementación de herramientas de digitalización tridimensional que se han convertido en “[...] una fuente de conocimiento y soporte a los procesos de conservación, restauración, difusión [...]” (Tejado, J.M., 2005, p. 136) e investigación del patrimonio cultural.

De acuerdo a José M. Tejado (2005) la inserción de las nuevas tecnologías en este ámbito surge de la necesidad cultural de obtener “[...] una mayor y cada vez más completa información y formación sobre el Patrimonio Arqueológico” (p. 137). Puesto que, los métodos representativos clásicos de la Arqueología, tales como el dibujo bidimensional arqueológico y la fotografía se encuentran limitados por la simplificación volumétrica que generan a través de la representación de los objetos.

En consecuencia, esta disciplina patrimonial, ha implementado el modelado y la impresión 3D como un medio para la elaboración de prototipos y objetos finales, tanto virtuales como físicos, para obtener información más precisa y fidedigna de los modelos arqueológicos originales; ya que, estos métodos, permiten la elaboración de representaciones exactas en cuanto a la calidad geométrica y volumétrica de los mismos.

#### 1.4.1

### LA IMPRESIÓN 3D

La impresión 3D es una técnica de fabricación aditiva para la elaboración de objetos mediante la superposición continua de capas de diversos materiales depositados por una impresora 3D.

En la actualidad este método brinda la posibilidad de elaborar objetos con formas geométricas complejas; por lo que, su implementación, ha beneficiado los procesos tanto de prototipado como de fabricación de diferentes objetos de pequeño y gran formato que requieren un nivel elevado de precisión y optimización en su estructura.

Asimismo, este procedimiento permite el empleo de una amplia gama de materiales que incluyen diversos tipos de plásticos y metales; así como, cerámicas y materiales orgánicos que son empleados dependiendo del proceso de fabricación aditiva que se utilice para la elaboración de los objetos.

De esta manera, la impresión 3D ha llegado a cambiar las técnicas empleadas anteriormente para la fabricación de objetos, tales como: la sustracción, la combinación o la deformación de la materia; puesto que, en comparación con estas, este proceso cuenta con características de fabricación únicas que favorecen el desarrollo y la producción de los mismos.

Entre las características más recurrentes se encuentran:

1. La producción de objetos al alcance de cualquier persona a través del Diseño Asistido por Computadora o CAD, para el desarrollo y la fabricación de objetos.
2. La necesidad de intervención de otros procesos para el ensamblado de los mismos.
3. La reducción de costos de fabricación; debido a que, esta técnica emplea únicamente el material necesario para la realización de las piezas y, en general, el exceso del mismo puede volver a emplearse en la elaboración de otro objeto.
4. La producción única de objetos sin la necesidad de una fabricación industrial en serie.
5. La customización o modificación libre de las formas que componen los diversos parámetros de construcción de los objetos.

## 1.4.2

### TIPOS DE IMPRESORAS 3D

De acuerdo al objeto que se requiera imprimir; así como, del resultado que se desee obtener para el mismo, la producción de este se adaptará a la impresora tridimensional más adecuada para lograr un resultado más cercano al objetivo requerido. Ya que, cada impresora maneja diversos parámetros para la construcción tridimensional.

De esta manera, las impresoras tridimensionales se clasifican, de acuerdo a la técnica, calidad y diversidad de material que permite implementar cada equipo en: personales, profesionales y de producción.

### 1.4.2.1

#### IMPRESORAS 3D PERSONALES

Equipo de impresión 3D diseñado para particulares que desean fabricar objetos en sus hogares (2). Estas se caracterizan por poseer un código fuente abierto; así como, por la adaptabilidad del modelo en cuanto a las piezas que lo componen.

De manera general, la técnica de impresión 3D que implementa este tipo de equipos es el FDM; por lo cual, estos permiten realizar el proceso de impresión con una amplia gama de materiales que incluyen diferentes tipos de termoplásticos, siliconas, metales y diversos materiales orgánicos (alimentos).



2

3D Systems. (s. f.-c).  
*Cube 3D Printer* [Fotografía].  
Recuperado de <https://www.3dsystems.com/sites/default/files/inline-images/cube.png>

### 1.4.2.2

#### IMPRESORAS 3D PROFESIONALES

Dispositivo de impresión 3D diseñado para la elaboración de los procesos de prototipado, pruebas funcionales y producción de objetos que requieran mayor fiabilidad en su producción.

Los equipos emplean procesos de impresión 3D por extrusión de material; así como, por fusión de lechos de polvo.

#### 1.4.2.2.1

##### IMPRESORA 3D PROFESIONAL *PROJET CJP 460 PLUS*

La *ProJet CJP 460 Plus* (3), es una impresora que trabaja con lechos de polvo a través de tres canales de color CMY; por lo cual, permite la validación y construcción de colores y texturas relacionados con el diseño del modelo 3D.

Con respecto a sus propiedades técnicas, la *ProJet CJP 460 Plus* posee un volumen neto de impresión para los ejes x, y, z (correspondientes al ancho (An), a la profundidad (P) y a la altura (Al) del objeto a imprimir) de 203×254×203 mm; así como, una resolución de impresión de 300×450 DPI. Su velocidad de impresión es de 23 mm/hr para un espesor de capas de 0.1 mm. A su vez, es capaz de trabajar con los formatos de lectura STL, VRML, PLY, 3DS, FBX y ZPR.

La aplicación de esta impresora, se concentra en la producción de modelos conceptuales y de simulación.



**3**

3D Systems. (s.f.-g).  
*ProJet CJP 460 Plus* [Fotografía].  
Recuperado de <https://es.3dsystems.com/3d-printers/projet-cjp-460plus>

#### 1.4.2.3

### IMPRESORAS 3D DE PRODUCCIÓN

Equipo de impresión 3D diseñado para la elaboración de piezas de prototipado, pruebas funcionales, utillaje y modelos realistas que posean características muy parecidas al producto final.

Así como, las impresoras 3D profesionales, los equipos de impresión 3D de producción **(4)** emplean las técnicas de impresión por fusión de lechos de polvo y por extrusión de material.



**4**

3D Systems. (s. f.-f).  
*Projet 7000 HD* [Fotografía].  
Recuperado de <https://es.3dsystems.com/3d-printers/projet-7000-hd>

### 1.4.3

## TIPOS DE IMPRESIÓN 3D

Considerando que cada equipo de impresión tridimensional emplea una técnica de impresión distinta, de acuerdo a las características del objeto que se requiera obtener, estas pueden clasificarse en tres grupos generales:

### 1. Fotopolimerización

Técnica que solidifica material líquido por exposición a la luz ultravioleta.

### 2. Ligado o fusión de lechos de polvo

Proceso que aglomera partículas de polvo por la aplicación de un láser o de pegamentos especiales.

### 3. Extrusión o depósito progresivo de material

Método que emplea el depósito de material fundido para su posterior solidificación por exposición a la intemperie.

Es importante señalar que cada uno de estos procesos cuenta con diversas variantes que "No requieren ni los mismos equipos ni los mismos materiales y producen resultados notablemente distintos." (Berchon, M. & Luyt, B., 2014, p.17)

### 1.4.3.1

## IMPRESIÓN 3D POR FOTOPOLIMERIZACIÓN

El proceso de fotopolimerización emplea polímeros líquidos que se solidifican al contacto con la luz ultravioleta emitida por un láser. Su implementación se concentra en las áreas de producción de prototipos y modelos de presentación.

En cuanto a las variantes que comprende la técnica de fotopolimerización se encuentran: el proceso DLP y la Estereolitografía.

### 1.4.3.1.1

## PROCESO DLP

El proceso DLP permite la fabricación de piezas sólidas en un tiempo menor manteniendo una buena calidad en la superficie de los objetos (5). En cuanto a los materiales, esta técnica labora con resinas translúcidas y ceras de modelado.



5

Formlabs. (s. f.).  
SLA vs. DLP: Guide to resin 3D printers [Fotografía].  
Recuperado de <https://formlabs.com/blog/resin-3d-printer-comparison-sla-vs-dlp/#Resolution>

### 1.4.3.1.2

## ESTEREOLITOGRAFÍA O SLA

La técnica de impresión por estereolitografía brinda precisión en la calidad de los detalles y acabado de objetos que, se caracterizan por poseer una apariencia solidificada semitransparente (6).

Sin embargo, su implementación requiere de un tiempo prolongado para la ejecución del proceso de impresión. Asimismo, la gama de materiales que pueden emplearse para la fabricación de los objetos es limitada. Además, una vez que estos se solidifican presentan fragilidad; por lo que, las piezas siempre requieren la aplicación de un proceso de acabado para proveerlas de mayor resistencia.



6

3D Systems. (s. f.-d).

*Materiales transparentes: Acura phoenix (SLA) [Fotografía].*

Recuperado de <https://es.3dsystems.com/materials/accura-phoenix-sla>

### 1.4.3.2

## IMPRESIÓN 3D POR FUSIÓN DE LECHOS DE POLVO

La impresión 3D por ligados de lechos de polvo, consiste en la aglomeración de dichas partículas mediante procedimientos que incluyen la aplicación de láser o pegamento para la solidificación del material. Su implementación se concentra en las áreas de producción de prototipos y objetos acabados.

Con respecto a las técnicas de impresión que existen por ligado de lechos de polvo se incluyen: la sinterización selectiva por láser, el proceso E-Beam y la técnica 3DP.

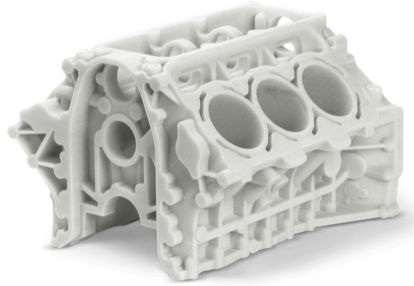
### 1.4.3.2.1

## LA SINTERIZACIÓN SELECTIVA POR LÁSER

El *Selective Laser Sintering* o SLS, es una técnica de impresión 3D que fusiona partículas de polvo mediante un láser que pasa por encima de las mismas siguiendo la forma del objeto a elaborar (7).

Los materiales que trabajan con esta técnica son plásticos (poliamida), cerámicas, vidrios y metales (acero inoxidable, aleaciones de cromo y cobalto; así como, titanio) pulverizados de manera homogénea. Asimismo, este método de impresión permite emplear el material no utilizado durante el proceso en otro proyecto; ya que, este no queda afectado por la aplicación del láser.

Por otra parte el proceso SLS fabrica piezas con alta precisión. Sin embargo, estas requieren la aplicación de diversos acabados que incluyen procesos de lijado, imprimación y pintura; puesto que, la textura final de los objetos tiende a presentar algunas imperfecciones.



7

3D Systems. (s. f.-i).  
*Sinterización selectiva por láser* [Fotografía].  
Recuperado de <https://es.3dsystems.com/on-demand-manufacturing/selective-laser-sintering>

#### 1.4.3.2.2

### EL PROCESO E-BEAM

El *Electron Beam Melting* o E-Beam, es un proceso de impresión que trabaja con partículas de polvo metálico, fundidas y fusionadas por la exposición a un láser de electrones en una cámara de vacío (8).

Los materiales que son compatibles con este proceso de impresión son el titanio, el aluminio, el níquel y el acero inoxidable entre otros. Así como la impresión SLS, la técnica E-Beam permite la reutilización del material no empleado durante el proceso de impresión para su posterior uso en la elaboración de otro proyecto. Sin embargo, este requiere de una revisión previa para eliminar las piezas sólidas; es decir, las partículas que pudieran estar aglutinadas.



8

Sculpteo. (s.f.-b).  
*Pieza de acero inoxidable impresa en E-Beam* [Fotografía].  
Recuperado de <https://www.sculpteo.com/es/materiales/dmls-materiales/dmls-materiales-acero-inoxidable/>

#### 1.4.3.2.3

### LA TÉCNICA 3DP

La Impresión 3D por Policromas o 3DP consiste en el depósito sucesivo de partículas de polvo que son aglutinadas por la adición de diminutas gotas de pegamento (9).

En cuanto a los materiales, este proceso de impresión cuenta con una amplia gama; ya que, trabaja con cerámicas, metales, polímeros y polvos compuestos o mixtos. Asimismo, durante el proceso de impresión, el material pulverizado puede pigmentarse a través del teñido del pegamento empleado para su aglutinamiento.

Por lo que se refiere a los objetos elaborados con esta técnica, a pesar de que poseen un alto grado de precisión en su estructura presentan fragilidad en la misma; por lo que, requieren la aplicación de procesos de acabado.



9

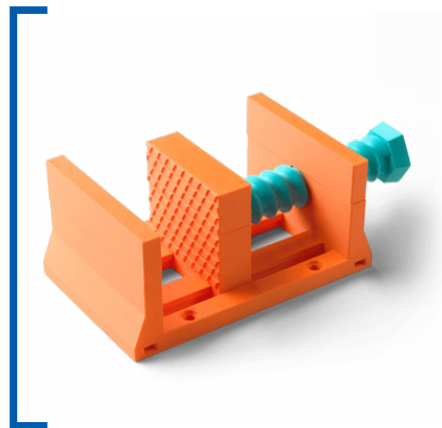
Nicetrails. (s. f.).  
*Mountains & peaks (3DP printed model)* [Fotografía].  
Recuperado de <https://www.nicetrails.com>

### 1.4.3.3

## IMPRESIÓN 3D POR EXTRUSIÓN DE MATERIAL

La técnica *Fuse Deposition Modeling* o FDM, implementa el depósito sucesivo de un filamento fundido compuesto de plástico, metal o materiales orgánicos solidificado al contacto con la intemperie. Su implementación se centra en las áreas de producción de objetos acabados (10).

Los materiales que admite este proceso de impresión son los termoplásticos como el acrilonitrilo butadieno estireno o ABS; así como, el políácido láctico o PLA y, de igual manera, los policarbonatos o PC, las policaprolactonas o PCL, las polifenilensulfonas o PPSF, las ceras y las materias orgánicas como alimentos y tejidos compuestos por células.



10

3D Systems. (s. f.-e).  
*Modelado por deposición fundida* [Fotografía].  
Recuperado de <https://es.3dsystems.com/on-demand-manufacturing/fused-deposition-modeling>

#### 1.4.3.4

### IMPRESIÓN 3D POR ENCOLADO DE PAPEL

El *Selective Deposition Laminated* o SDL es un método de impresión 3D que emplea el corte de hojas de papel para su posterior pegado, prensado y refinado (11). El proceso se divide en cuatro fases: el depósito de una capa de papel; la aplicación de pegamento en las zonas que al final del proceso conformarán la estructura del objeto; la colocación de otra capa de papel y, finalmente, el prensado de todo el conglomerado. Su implementación se concentra en las áreas de producción de objetos acabados.

Las piezas que son elaboradas a través del SDL, cuentan con una amplia gama de colores para su producción; así como, una resolución de alta calidad. En contra parte, los objetos requieren un proceso de acabado que incluye refinado y lijado del material. De igual manera, su aplicación no es recomendada para la elaboración de objetos huecos, demasiado complejos en cuanto a su estructura o con volumen interno.



11

Mcor Technologies. (2018).  
*Naranja impresa mediante laminado por SDL* [Fotografía].  
Recuperado de <https://cleangreen3d.com>

#### 1.4.4

### MATERIALES EMPLEADOS PARA LOS PROCESOS DE IMPRESIÓN 3D

#### 1.4.4.1

### PLÁSTICOS

Los principales materiales que componen este grupo son los polímeros que permiten su modelación por la intervención del calor, tales como los plásticos ABS, PLA y el PET; o la aplicación de luz, como la poliamida y la resina.

#### 1. EL ABS

El acrilonitrilo butadieno estireno o ABS (12), es un termoplástico no biodegradable empleado, generalmente, para los procesos de impresión 3D realizados con impresoras personales de código abierto; así como, de producción que empleen el método FDM.

Se caracteriza por tener un punto de fusión entre los 200 y los 260 °C; por lo cual, las impresoras 3D que trabajan con él deben de poseer una bandeja de impresión térmica que soporte temperaturas entre los 90 y los 105 °C. Asimismo, una vez que el material se solidifica resiste temperaturas mínimas de -20 °C y máximas de 80 °C.

## 2. EI PLA

El políácido láctico o PLA, es un termoplástico biodegradable que también es empleado para los procesos de impresión 3D en los que es aplicado el ABS.

Sus propiedades de fusión se encuentran entre los 160 y los 220 °C; sin embargo, los equipos de impresión 3D que lo emplean no deben de poseer una bandeja de impresión térmica. En este caso, esta puede ser sustituida por una bandeja acrílica o de madera recubierta con algún adhesivo.

Por otro lado, una vez que el material pasa a estado sólido, no resiste altas temperaturas ni procesos de lavado prolongados; por lo que, el objeto impreso puede presentar fragilidad.

## 3. EI PET

El politereftalo de etileno o PET, es un plástico de tipo poliéster saturado adecuado para las técnicas de impresión 3D realizadas con impresoras personales de código abierto y de producción que empleen el método FDM. Los objetos fabricados con PET se caracterizan por poseer flexibilidad, solidez y un nivel de resistencia mayor a los objetos impresos con ABS o PLA.

En cuanto a sus propiedades térmicas, su punto de fusión se encuentra en los 220 °C y, al igual que el PLA, las impresoras 3D que lo emplean no requieren de una bandeja de impresión térmica para llevar a cabo el proceso de impresión.

## 4. La poliamida

La poliamida o PA, es un material empleado para los procesos de impresión 3D en los que es aplicada la técnica de sinterización láser.

Los objetos impresos con poliamidas se caracterizan por presentar mayor estabilidad, resistencia, rigidez y poca flexibilidad en su estructura; así como, una definición más elevada en cuanto a detalles. Por lo tanto, su aplicación es recomendada para la producción de objetos funcionales.



12

3D Systems. (s. f.-a).  
*ABS- like materials* [Fotografía].  
Recuperado de <https://www.3dsystems.com/materials/plastic>

Existen otros materiales que pueden ser implementados por los procesos de impresión 3D, tales como las resinas, los plásticos con transparencia, con resistencia al calor y con flexibilidad; así como, el polipropileno y las aleaciones de poliamidas con metales.

### 1. Plásticos con transparencia

Son polímeros transparentes, translucidos u opacos que permiten el paso de la luz a través de la estructura del objeto. Estos pueden ser implementados por la estereolitografía, el DLP y la sinterización láser.

### 2. Plásticos resistentes al calor

Estos por sus propiedades físicas, no se deforman por la exposición a altas temperaturas provocadas por el contacto con gases o líquidos calientes. Su empleo se destina a la fabricación de piezas que necesitan soportar temperaturas elevadas. Por otra parte, son utilizados por la estereolitografía y la sinterización láser.

### 3. Plásticos flexibles

Son termoplásticos elastómeros caracterizados por emular el comportamiento y la textura del caucho o de la goma. Su aplicación se concentra en la fabricación de modelos dúctiles de presentación y demostración.

### 4. El polipropileno o PP

Es un material que brinda a los objetos impresos mayor resistencia y absorción a los impactos. Es empleado para la fabricación de moldes o piezas finales que requieran un nivel elevado de detalle (13).

### 5. El alumide

Es una poliamida mezclada con aluminio empleada para los procesos de impresión 3D por sinterización láser.

Se caracteriza por brindar solidez y flexibilidad a la pieza impresa; así como, resistencia al calor. Sin embargo, esta requiere de la aplicación de acabados, tales como esmerilado, revestimiento y pulido.

Su aplicación se destina a la impresión de piezas con apariencia metálica, para la elaboración de moldes de series pequeñas y de modelos de presentación.



13

3D Systems. (s. f.-f).  
*Polypropylene- like materials* [Fotografía].  
Recuperado de <https://www.3dsystems.com/materials/plastic>

### 1.4.4.3

## METALES

Los materiales que conforman este grupo son el aluminio, el titanio, el acero inoxidable, el cromo y cobalto, el hierro y los metales preciosos; así como, sus respectivas aleaciones.

### 1. El aluminio

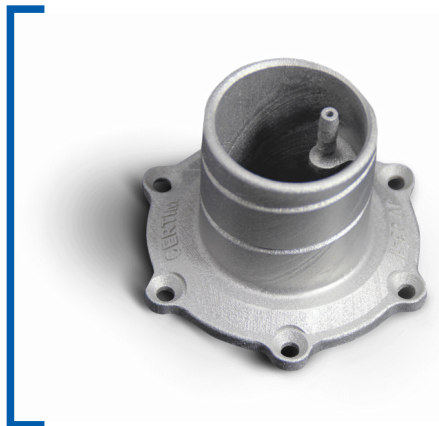
Este metal, al igual que sus aleaciones, son empleados para la producción de moldes finos y piezas con geometría compleja. Estos componentes le proveen al objeto impreso solidez y ligereza. A su vez, permiten el soporte de cargas pesadas y la resistencia a temperaturas elevadas (14).

### 2. Aleaciones de cromo y cobalto

Las aleaciones de cromo y cromo-cobalto proporcionan a la pieza impresa una superficie lisa; así como, solidez, rigidez y resistencia. Estas, son empleadas para la elaboración de prótesis médicas, utillaje y moldes de producción.

### 3. Los metales preciosos

Este grupo de metales esta conformado por el oro, la plata, el bronce y el platino. El depósito de estos materiales, para la construcción de los objetos, principalmente piezas de joyería, es a través de un molde de cera perdida previamente elaborado. Asimismo, las piezas fabricadas con estos deben de someterse a procesos de acabado, tales como el pulido.



14

3D Systems. (s. f.-b).  
Aluminum alloy [Fotografía].  
Recuperado de <https://www.3dsystems.com/materials/metal>

### 1.4.4.4

## CERÁMICAS Y ARENAS

### 1. Cerámica

Este material es utilizado en los procesos de impresión 3D que trabajan con las técnicas de sinterización laser y 3DP. Las piezas producidas con este material, requieren la aplicación de acabados como la aplicación de color y esmaltado caliente (15).

## 2. Arena

Las arenas de silicato, aluminio y cuarzo, son empleadas para la elaboración de moldes que requieren la resistencia de temperaturas elevadas.



15

Reggiani Ceramica. (s. f.).  
*S/VASI terracotta: Unique 3D printed ceramics* [Fotografía].  
Recuperado de <https://www.reggianiceramica.com/svasiterracotta>

### 1.4.4.5

## MATERIALES ORGÁNICOS

Los materiales que componen este grupo son las ceras, la madera, el papel, los alimentos y los tejidos biológicos.

### 1. Cera

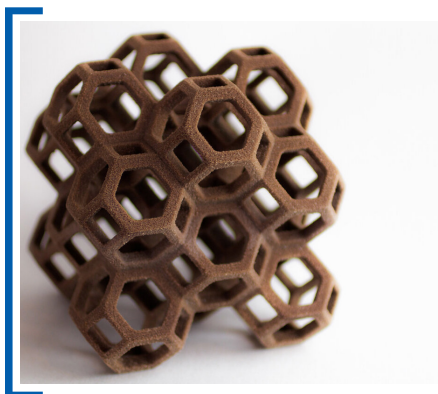
Material empleado para la fabricación de moldes detallados para fundiciones.

### 2. Alimentos

Alimentos triturados utilizados por impresoras 3D que trabajan con el método FDM. El proceso de impresión se limita a la producción de piezas decorativas perecederas (16).

### 3. Tejidos biológicos

Componente elaborado con base en células vivas para la reproducción de tejido humano. Este tipo de tejido, se caracteriza por poseer mayor estabilidad celular que los tejidos de origen animal debido a la base de hidrogel que emplea para la inyección de las células vivas.



16

The Sugar Lab. (s. f.).  
*Water and sugar 3D-printed sculptures* [Fotografía].  
Recuperado de <https://www.the-sugar-lab.com/#gallery>

## 1.4.5

### LAS ETAPAS DEL PROCESO DE IMPRESIÓN 3D

Para llevar a cabo la impresión 3D de un objeto, se requieren cuatro fases:

#### 1. Modelado

En esta etapa, se obtiene un modelo 3D mediante el modelado digital, el escaneo 3D o la descarga del mismo a través de un sitio web.

#### 2. Preparación del archivo

El archivo del modelo 3D obtenido se exporta a un formato universal, el cual se repara, lamina y prepara para su envío hacia la impresora 3D.

#### 3. Proceso de impresión

#### 4. Aplicación de acabados al objeto impreso

### 1.4.5.1

#### ETAPA UNO: MODELADO

#### 1.4.5.1.1

#### MÉTODOS PARA LA OBTENCIÓN DE MODELOS 3D

Un archivo 3D es un “[...] modelo virtual del artículo que se va a imprimir y esta constituido por un conjunto de vértices, aristas y facetas llamadas triángulos o polígonos; cuanto mayores son estos triángulos, menos detalles tendrá el objeto y más simplicidad en sus formas.” (Berchon, M. & Luyt, B., 2014, p.90).

Los métodos para la elaboración de un modelo 3D se dividen en el modelado 3D asistido por computadora, la implementación del escaneado 3D y sus variantes; así como, la descarga del mismo a través de bibliotecas en línea dedicadas al intercambio de los mismos.

#### 1.4.5.1.1.1

#### MODELADO 3D ASISTIDO POR COMPUTADORA

Existen diferentes programas de modelado 3D adecuados a las necesidades del objeto a elaborar; es decir, si se requiere el modelado de un objeto sólido, de una superficie o de un híbrido. Al mismo tiempo, las piezas construidas mediante estos programas se dividen en tres categorías: el modelado o escultura digital de formas orgánicas, la concepción mecánica o arquitectónica y el diseño de objetos.

#### 1. Modeladores de volumen

Componen los objetos mediante el empleo de figuras geométricas básicas denominadas como sólidos 3D. En concreto, conforman este grupo el cubo, la esfera, la pirámide y el cilindro.

Entre los modeladores de volumen se identifican los softwares: *Cinema 4D*, *AutoCAD 3D*, *Solid Works* y *Solid Edge*.

## 2. Modeladores de superficie

Elaboran la cubierta o la envoltura externa del objeto a través de la composición y unión de cada cara que conforma la geometría del mismo.

Dentro de la categoría de modeladores de superficie se encuentran los softwares: *Rhinoceros*, *ZBrush*, *Autodesk Mudbox* y *3D-Coat*.

## 3. Modeladores paramétricos

Definen los objetos a partir de la implementación de ecuaciones o códigos modificables; es decir, el objeto no se dibuja, se programa. Estos, son empleados para la fabricación de piezas que requieren una precisión absoluta.

Entre los softwares paramétricos figuran: *Autodesk 3D Max*, *Autodesk Revit*, *Autodesk Dynamo* y *CATIA (Computer Aides Tree-dimensional Interactive Application)*.

### 1.4.5.1.1.2

#### ESCANEEO 3D

Es posible obtener un modelo 3D por medio del escaneo del objeto que se desea imprimir. Esto, a través de herramientas y métodos que permiten la captura de datos de la superficie del mismo, tales como el escáner 3D, el *Kinect* y la fotogrametría.

No obstante, el empleo de esta técnica requiere de un proceso de corrección en un programa de modelado 3D; ya que, el archivo generado por estas herramientas y métodos no es completamente utilizable en su estado primario. Lo anterior, se debe a las limitantes ópticas de los mismos; puesto que, estas producen algunos resultados erróneos relacionados con la captura de datos del objeto a imprimir.

Por otro lado, el escaneo 3D no es aplicable a todos los objetos; debido a que, las propiedades físicas de cada uno de ellos, como el lustre o la transparencia, pueden producir resultados erróneos en la adquisición e interpretación de datos de los mismos.

### 1.4.5.1.1.2.1

#### EL ESCÁNER 3D

Como herramienta para la obtención de datos digitales, se tiene el escáner tridimensional. El cual permite el análisis de “[...] un objeto y su entorno para recoger datos precisos sobre su forma y a veces sobre su apariencia [...]” (Berchon, M. & Luyt, B., 2014, p.92) a través del empleo de técnicas ópticas de adquisición y análisis de datos espaciales tridimensionales.

En cuanto al proceso de obtención de datos del escáner 3D, este se divide en tres fases:

#### 1. Fase uno: Estación

La fase de estación, corresponde a la adquisición de una muestra de puntos de la superficie del objeto. Esta, se realiza varias veces desde

distintas perspectivas con el propósito de suprimir las zonas de sombra y los ángulos muertos de la pieza escaneada.

## 2. Fase dos: Análisis de puntos

El análisis de puntos, concierne a la interpretación de la forma escaneada a partir de la distribución de las muestras de puntos obtenidas.

## 3. Fase tres: Reconstrucción del objeto

A partir de las muestras de puntos adquiridas durante la fase de estación, se elabora la reconstrucción del objeto escaneado.

### 1.4.5.1.1.2.2 TIPOS DE ESCÁNER 3D

#### 1.4.5.1.1.2.2.1 ESCÁNER DE LUZ MODULADA O ESTRUCTURADA

Escáneres “[...] en los que una imagen (normalmente con rayas negras y blancas) se proyecta sobre el sujeto mientras que una cámara analiza la deformación de dicha proyección.” (Berchon, M. & Luyt, B., 2014, p.93) para la obtención de la muestra de puntos.

##### 1.4.5.1.1.2.2.1.1 ESCÁNER ARTEC EVA

El Artec Eva (17), es un escáner de luz estructurada que permite capturar de manera rápida y precisa tanto la geometría como la textura de un objeto de dimensión pequeña a media. Asimismo, su capacidad óptica, no se ve limitada por las superficies oscuras y brillantes de los objetos; por lo que, permite una amplia captura de datos.

Con respecto a las especificaciones técnicas, el Artec Eva cuenta con una precisión y resolución 3D de 0.1 mm y 0.5 mm respectivamente; así como, una capacidad de escaneo para la captura de color de 24 bpp y textura de 1.3 mp. Por otra parte, su nivel de reconstrucción 3D es de 16 FPS con una velocidad de obtención de datos de hasta 2 000 000 de puntos por segundo. Asimismo, permite la exportación en una amplia variedad de formatos, tales como el STL, OBJ, PLY y BTX.



17

Artec EVA. (s.f).  
Escáner 3D Artec EVA [Fotografía].  
Recuperado de <https://www.artec3d.com/es/portable-3d-scanners/artec-eva>

#### 1.4.5.1.1.2.2.2 ESCÁNER LÁSER

Tipo de escáner en el que “[...] la medida de cada punto se calcula a partir del tiempo que emplea un rayo láser en ir y volver entre el emisor y su objetivo.” (Berchon, M. & Luyt, B., 2014, p.94) (18).



18

Leica Geosystems. (s. f.).  
*Leica scanstation P50: Láser escáner terrestre 3D de largo alcance* [Fotografía].  
Recuperado de <https://leica-geosystems.com/es-mx/products/laser-scanners/scanners/leica-scanstation-p50>

#### 1.4.5.1.1.2.2.3 ESCÁNER ESTEREOSCÓPICO

Escáner que a través de “dos cámaras ligeramente separadas y dirigidas hacia el objeto [...]” (Berchon, M. & Luyt, B., 2014, p.94) calcula la distancia de cada punto que compone al mismo con la comparación de los datos obtenidos por ambas cámaras (19).



19

Matter and Form. (s. f.).  
*V2 3D Scanner* [Fotografía].  
Recuperado de <https://matterandform.net/scanner>

#### 1.4.5.1.1.2.2.4 EL KINECT

Interfaz de la consola de videojuegos Xbox (20) que, a través de sus cámaras estéreo; así como, de su cámara de profundidad infrarroja, permite el reconocimiento de movimientos corporales, comandos de voz, objetos e imágenes para su digitalización.



20

Wikipedia. (2011).  
*The Microsoft Kinect peripheral for the Xbox 360* [Fotografía].  
Recuperado de <https://es.wikipedia.org/wiki/Kinect#/media/Archivo:Xbox-360-Kinect-Standalone.png>

#### 1.4.5.1.1.2.2.5 OTRAS TÉCNICAS

Existen otros métodos para escanear en 3D sin la necesidad de implementar un escáner 3D para la obtención de datos interpretables por programas de modelado tridimensional.

##### 1. Fotogrametría

Técnica que permite la elaboración de modelos 3D a partir de fotografías que capturan al objeto desde diversos ángulos para la adquisición de información relacionada con la forma, la dimensión y la posición en el espacio de cada cara o lado del mismo.

#### 1.4.5.2

##### ETAPA DOS: PREPARACIÓN DEL ARCHIVO

Una vez obtenido el modelo 3D del objeto a imprimir, el archivo que lo contiene debe adecuarse a un formato de exportación universal; en concreto, al *Standard Triangle Language* o STL, para poder llevar a cabo el proceso de impresión 3D.

Un archivo STL “[...] describe la geometría de la superficie del objeto 3D por medio de un mosaico de triángulos [...]” (Berchon, M. & Luyt, B., 2014, p.97). De esta manera, es posible visualizar la posición de las aristas, la orientación de las caras del objeto; así como, el tejido de los mosaicos que componen su estructura.

Por otra parte, para el envío final a impresión, el archivo STL debe someterse a procesos de reparación, laminado y exportación.

##### 1.4.5.2.1

##### REPARACIÓN DEL ARCHIVO STL

El proceso de reparación, implica la modificación o supresión de la geometría mal posicionada o incompleta del objeto.

##### 1.4.5.2.2

##### LAMINADO DEL ARCHIVO STL

El laminado, corresponde al traslado del archivo STL a un *slicer* o *slicing software* para su conversión a instrucciones específicas que leerá la impresora 3D.

Durante este proceso, el programa divide el modelo 3D en varias capas o láminas delgadas imprimibles. Posteriormente, proporciona a la impresora 3D las indicaciones necesarias para llevar a cabo la impresión, por ejemplo: la resolución, la densidad y el grosor de las capas o la cantidad de material a depositar para la construcción del objeto.

##### 1.4.5.2.3

##### EXPORTACIÓN DE ARCHIVO STL

La exportación, corresponde a la conversión del archivo STL en un formato de lectura estándar para las impresoras 3D. En este caso, el formato *G-code*.

### 1.4.5.3

## ETAPA TRES: IMPRESIÓN

Para la impresión del modelo 3D, se consideran aspectos relacionados a la:

#### 1.4.5.3.1

### ELECCIÓN DEL MATERIAL

La elección del material depende del propósito y uso de la pieza; es decir, si esta será un prototipo, una prueba funcional o un producto final. Así como, del tipo de impresora que se empleará para la ejecución del proceso.

De igual manera, se deben considerar las características físicas, como la transparencia, coloración y textura; mecánicas, como el nivel de rigidez, flexibilidad y elasticidad; y térmicas del material, como la resistencia a la deformación en temperaturas mínimas y máximas.

#### 1.4.5.3.2

### CONFIGURACIÓN DE LA IMPRESORA 3D

Para la ejecución del proceso de impresión, el equipo debe configurarse por medio de un software de control que permita la adquisición de datos relacionados con el lanzamiento y el desarrollo de la impresión; así como, el análisis del archivo de la pieza a imprimir relacionado con la lectura de capas imprimibles del modelo 3D.

#### 1.4.5.3.3

### OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO

Dependiendo de la función final del objeto a imprimir se pueden ajustar aspectos relacionados al coste de impresión, a la calidad del objeto y al tiempo de fabricación del mismo.

#### 1. Optimización de costo

Para la optimización del costo de producción, se debe considerar la cantidad de material necesario para la construcción del objeto a imprimir, la cual esta determinada por la forma y las dimensiones que este posee; es decir, por el ancho, la profundidad y la altura.

Por otra parte, es preferible la construcción de objetos huecos en lugar de objetos rellenos por completo; así como, la sección o división de objetos grandes en varias piezas pequeñas para su posterior ensamblado.

### 1.4.5.4

## ETAPA CUATRO: APLICACIÓN DE ACABADOS

Una vez impresa la pieza, se le aplican diversos procesos con el propósito de proporcionarle mejores propiedades mecánicas y estéticas. Estos se dividen en limpieza, solidificación (para algunos procesos de impresión), preparación y aplicación de acabado.

#### 1.4.5.4.1

### LIMPIEZA DE LA PIEZA

Dependiendo del proceso de impresión empleado para la construcción del

objeto 3D, se aplican los procesos de infiltración o desempolvado con el propósito de limpiar su superficie.

#### 1.4.5.4.2

### INFILTRACIÓN

La infiltración, es un proceso de limpieza aplicado a las impresiones realizadas por FDM. Este consiste en el desprendimiento de los filamentos de soporte; es decir, de las tramas ligeras posicionadas en las partes frágiles de la pieza durante el proceso de impresión con un cúter o un baño de agua con sosa.

#### 1.4.5.4.3

### DESEMPOLVADO

El desempolvado, es un tratamiento de limpieza destinado a las impresiones elaboradas con base de polvo a través de la técnica de sinterización láser. En este proceso, se elimina el exceso de material en la pieza impresa con ayuda de un cepillo.

#### 1.4.5.4.4

### SOLIDIFICACIÓN DE LA PIEZA

Los procesos de impresión 3D que aplican la policromía; así como, la sinterización láser por metal, requieren de la solidificación del objeto tras el proceso de impresión. Por el contrario, las técnicas de impresión 3D relacionadas con la estereolitografía, FDM y sinterización láser, por utilizar otros materiales, no requieren la aplicación de este proceso.

#### 1. Impresión policroma

Para la solidificación de las piezas policromas, existen las técnicas de baño de cianocrilato, aplicación de resina epoxi sobre la superficie del objeto para la obstrucción de poros y la infiltración de agua a la pieza mediante un pulverizador. Sin embargo, esta última es menos efectiva que las mencionadas anteriormente.

#### 2. Sinterización láser por metal

El proceso de solidificación de las piezas elaboradas por sinterización láser de metal, consiste en la aplicación de calor, a través de un horneado, para la fusión del aglutinante empleado con las partículas de metal; de esta manera, el aire contenido al interior de la pieza se elimina. Posteriormente, esta es sumergida en un baño de metal líquido para la absorción del mismo.

#### 1.4.5.4.5

### PREPARACIÓN DE LA PIEZA

Posterior al proceso de limpieza y/o solidificación de la pieza impresa, esta debe recibir un proceso de preparación que incluye lijado, pulido, enmasillado y una aplicación de imprimación.

Por otro lado, antes de proceder a la preparación, el objeto impreso debe ser limpiado con desengrasante para eliminar cualquier agente extraño de la superficie. Este proceso debe efectuarse entre cada fase de preparación; así como, antes de la aplicación de un acabado diferente. La pieza debe secarse completamente para evitar el desprendimiento de cualquier material aplicado; esto último, debe efectuarse prescindiendo del empleo de calor excesivo que propicie la deformación de la misma.

### 1. Lijado

El lijado consiste en el alisamiento de la superficie del objeto para eliminar las imperfecciones causadas por el proceso de impresión; así como, para suavizar su textura. Este se realiza mediante el desprendimiento del material sobrante con una serie de lijas que descienden de un grano grueso a un grano fino.

Durante este proceso, debe evitarse el desprendimiento excesivo de material y considerar que el lijado de objetos finos, debe limitarse al grosor de una sola capa.

### 2. Pulido

El pulido es un proceso que se aplica a los objetos impresos por FDM. Este consiste en la eliminación de las capas visibles o escalonadas que se producen durante la impresión a través de la aplicación de las técnicas de pulido, baño o vaporizado de acetona o cepillado.

### 3. Enmasillado

El enmasillado radica en la aplicación de un recubrimiento sobre las zonas irregulares de la pieza para unificar la superficie. De esta manera, esta se prepara para el depósito posterior de los materiales de imprimación y acabado.

### 4. Aplicado de imprimación

La imprimación consiste en la aplicación de una capa protectora que refuerza la impermeabilidad del objeto. Este proceso proporciona una mayor resistencia a largo plazo; así como, una recepción óptima para el material del acabado.

#### 1.4.5.4.6

### ACABADOS DE LA PIEZA

Una vez que el objeto impreso cuenta con la superficie lisa, concertada por los procesos de limpiado y preparado, se procede a la fase de aplicación del acabado.

Para la aplicación de cualquier material, se debe considerar tanto el resultado final que se desea obtener como la compatibilidad del mismo con el imprimado para evitar su desprendimiento.

Asimismo, se debe considerar el desgaste que presentará por el paso del tiempo tanto por sus propiedades físicas; por ejemplo, deformación en plásticos u oxidación en metales, como por los agentes externos que intervienen en ella.

#### 1. Pintura

Material comúnmente empleado para el acabado de las piezas impresas. Su aplicación, consiste en el depósito de dos capas finas de pintura acrílica mate a través de un aerosol para atenuar las imperfecciones y enmascarar las irregularidades que pueda tener el objeto.

### **1. Entintando**

Técnica aplicada a los objetos impresos con poliamida o resina que, por su estructura, son difíciles de cubrir con un acabado de pintura. El proceso se lleva a cabo mediante el sumergimiento de la pieza en un baño de pigmentos de color hasta que el tinte dispuesto se impregna en la superficie de la misma.

### **2. Esmaltado**

Material empleado para volver refractaria la superficie de piezas cerámicas.

### **3. Chapado en metales preciosos**

Proceso por el cual la pieza es sumergida en un baño de metal de oro, plata, bronce o platino para su recubrimiento. Posteriormente, esta se somete a una fase de secado y pulido.

### **4. Flocado**

Técnica de aplicación de fibras textiles sobre la pieza. Esta se divide en el recubrimiento de la pieza con adhesivo, el depósito de la fibra sobre la superficie y la aplicación de energía electrostática para que las fibras aplicadas tomen la misma dirección.

### **5. Fotoimpresión**

Técnica que consiste en la aplicación de una fotografía sobre la superficie del objeto impreso.

## ASPECTOS GENERALES

El patrimonio cultural se constituye por una serie de referentes simbólicos asociados a un determinado conjunto de ideas y valores dictaminados por la identidad de una sociedad en un momento histórico y cultural específico.

Los referentes simbólicos o bienes culturales que integran al patrimonio cultural, se dividen en diversas manifestaciones tanto materiales como inmateriales que poseen un carácter histórico y artístico único de la actividad humana del pasado y el presente.

En México los vestigios arqueológicos, conforman una parte fundamental de los bienes culturales de la nación; ya que estos, ayudan a comprender el pasado de la sociedad. Por consiguiente, la gestión cultural ha aparecido para propiciar su conservación preventiva, curativa y restaurativa; así como, su difusión a través de la implementación de las nuevas tecnologías.

La adopción de las herramientas digitales en la Arqueología, ha permitido la optimización de los procesos para la elaboración de piezas, virtuales y físicas, que buscan conservar información precisa y fidedigna procedente de los vestigios arqueológicos originales.

Lo anterior, a través del desarrollo de modelos digitales elaborados mediante el diseño asistido por computadora (CAD), el escaneo tridimensional o la descarga cibernética legal de los mismos; así como, por la implementación de métodos de fabricación aditiva llevados a cabo mediante la impresión tridimensional por fotopolimerización, extrusión de material o fusión de lechos de polvo.

De esta manera, los vestigios arqueológicos se han reconstruido, restituido y recreado para su estudio y exposición, a través de métodos no invasivos que permiten su elaboración en diversos materiales; tales como, plásticos, metales y cerámicas. Además de la aplicación de diferentes acabados que dotan a la piezas de un mayor realismo.



# 02

---

## **LA TECNOLOGÍA TRIDIMENSIONAL Y SU IMPLEMENTACIÓN EN EL PATRIMONIO CULTURAL ARQUEOLÓGICO**



## INTRODUCCIÓN

La tecnología es algo evidente en la vida del ser humano, la necesidad de avanzar y facilitar procesos se refleja en la creación de nuevas tecnologías, como es el caso de la tecnología tridimensional. Gracias a su versatilidad; así como, a sus resultados y beneficios es aplicada en diferentes ámbitos o campos de estudio.

Dado que esta tecnología abarca un proceso de documentación, reconstrucción y reproducción de un modelo físico existente manteniendo una representación fidedigna de sus características físicas en cuanto a forma y textura, la Arqueología se ha interesado en implementar esta tecnología en el área de la conservación y difusión del patrimonio cultural. Es por ello que ha aumentado el uso de esta tecnología en los museos y organizaciones culturales.

A continuación se dará a conocer como la Arqueología en conjunto con la digitalización, para la reconstrucción y reproducción tridimensional, brinda resultados de gran beneficio para preservar la historia de México y el mundo. Contribuyendo así a la comprensión del pasado histórico y cultural a través de las nuevas tecnologías.

## TECNOLOGÍA 3D APLICADA AL PATRIMONIO CULTURAL

El desarrollo y versatilidad de las nuevas tecnologías han permitido su implementación y adaptación en diferentes campos de estudio para formar parte de la solución de problemáticas existentes. De este modo, la tecnología 3D ha llegado a beneficiar, con su aplicación, al campo cultural dirigido al patrimonio.

Los artefactos pertenecientes al patrimonio cultural frecuentemente se rompen en fragmentos cuando son descubiertos o hallados; lo cual, disminuye su valor científico, histórico y cultural. Así, las técnicas asistidas por computadora para reconstruir o ensamblar objetos en 3D proporcionan ventajas importantes; tales como: la reducción del tiempo y trabajo requerido para efectuar el proceso de manera manual. (Cfr. Zhang, Li, Chen & Geng, 2018)

Por otra parte, las técnicas arqueológicas tradicionales para la restauración de piezas han evolucionado, empleando recursos de manufactura, desde lo más simple hasta lo más complejo. Asimismo, durante este desarrollo, la fotografía y el video llegaron para beneficiar la restauración y el registro de las piezas arqueológicas. Aunque se volvieron herramientas indispensables, no pudieron desplazar en su totalidad al dibujo arqueológico; ya que estas, seguían generando imágenes bidimensionales.

De esta manera, en la última década muchas de las técnicas tradicionales de restauración en piezas arqueológicas fueron remplazadas por herramientas y procesos digitales. Entre los dispositivos digitales introducidos en este ámbito, el escáner 3D mostró un uso más frecuente y desarrollado; ya que, permitió la captura geométrica de las piezas arqueológicas. (Cfr. Di Angelo, Di Stefano, Fratocchi & Marzola, 2018)

Es por ello que ha aumentado la implementación de esta tecnología en los museos y organizaciones culturales; puesto que, su misión reside en mejorar los procesos de restauración para la construcción y enriquecimiento histórico y cultural contribuyendo a la comprensión del pasado a través del uso de las nuevas tecnologías. Es así que, estas han aplicado diferentes métodos para llevar a cabo este proceso. Sin embargo, este se engloba en la digitalización, reconstrucción y reproducción tridimensional.

La digitalización del patrimonio cultural es considerada conservación virtual; ya que, beneficia el enriquecimiento histórico a través del desplazamiento y divulgación del material cultural archivado.

### 2.1.1

#### DIGITALIZACIÓN 3D

Así como la conservación y la restauración del patrimonio cultural es parte fundamental para la preservación cultural, también, lo es la digitalización, debido al registro gráfico y la documentación que genera.

La digitalización tridimensional de las piezas arqueológicas es el modelo que se produce a partir del registro de datos tridimensionales. Dado que es un medio y no el fin, funciona como base e impulsa a la resolución de problemas físicos y visuales referentes al área del patrimonio cultural; es decir, este es un punto partida para la obtención de resultados precisos de reconstrucción digital tridimensional que benefician a los usuarios para tener una manera interactiva de adquirir conocimiento y un mayor acercamiento a la pieza.

Otro beneficio del registro digital tridimensional es que permite conocer y analizar cómo era un objeto o pieza en el momento en que fue creado; así como, obtener su reproducción tridimensional en caso de que este sea destruido o se vea afectado físicamente.

La digitalización de las piezas arqueológicas puede llevarse a cabo mediante la implementación del escáner 3D; ya que, este permite obtener modelos vectorizados en tres dimensiones. Lo anterior, resulta atractivo y motivante para los arqueólogos y profesionales en el patrimonio cultural; debido a que, esta herramienta les permiten realizar una documentación y un análisis arqueológico detallado sobre las piezas.

El empleo de escáneres láseres a finales de los años noventa impulsó y brindó grandes ventajas para el estudio y conservación del patrimonio cultural; ya que, los modelos obtenidos a partir de esta herramienta eran construidos a partir de una nube de puntos que permitía un registro fidedigno con una precisión de decimas de milímetro. (Cfr. Trejo, 2018)

Así, implementando la digitalización a través del uso del escáner 3D es posible reconstruir piezas arqueológicas incompletas, fragmentadas o maltratadas al momento de su hallazgo. En el caso de las piezas muy deterioradas o destruidas el modelo en tercera dimensión permite a los investigadores tener una idea de cómo podría haber sido esa pieza antes de que se dañara. (Cfr. Katz, 2017)

Aunque en un principio el escáner láser era un aparato costoso y la información obtenida resultaba difícil de compartir, si se carecía de las computadoras con la potencia que se necesitaba, ha sido su desarrollo lo que ha hecho posible el capturar de forma rápida y precisa los modelos fieles a la realidad de cada pieza o artefacto arqueológico. ( Cfr. Torres, Cano, Melero, España y Moreno, 2010)

De esta manera, conforme se mejoraba la tecnología de prototipado rápido y el procesamiento de los datos, cada vez más proyectos de carácter arqueológico comenzaron a adoptar su uso.

Por otra parte, la primera aplicación del escáner láser 3D que se tiene registrada en México, surgió en la industria petrolífera para documentar de forma precisa las plataformas petroleras y refinerías. Esto fue un gran beneficio; ya que, en las plataformas predominan formas cilíndricas y esféricas de difícil acceso físico y, en algunos casos, inaccesibles debido a la altura en la que se encuentran instaladas; así como, por la temperatura que emana el acero. (Cfr. Mora, 2012)

Debido a que la reconstrucción 3D implica un mejor resultado gráfico, contribuye de manera positiva al registro digital y la actualización física del patrimonio cultural. Asimismo, esta contempla aspectos interpretativos, de experimentación e inclusión de recursos históricos que resultan en un proceso completo de restauración.

## 2.1.2

### RECONSTRUCCIÓN 3D

Al tener la pieza arqueológica digitalizada, es necesaria la reconstrucción de las partes que se han perdido o deteriorado sobre el modelo digital para obtener su restauración virtual y su reproducción a través de la impresión tridimensional.

La reconstrucción tridimensional, surgida en 1978, es considerada como el proceso que permite reproducir objetos tomados de la realidad a través de un sistema o método computacional. A través de este, se pueden recuperar y restaurar las características físicas del objeto con su forma, volumen y dimensiones. (Cfr. Martínez, 2016)

La restauración virtual, es la reordenación en un modelo virtual de los restos o fragmentos existentes de una pieza para la recuperación visual de lo que fue en algún momento; es decir, la restauración virtual abarca la recomposición de partes existentes desintegradas de piezas arqueológicas en un modelo tridimensional. (Cfr. López-Menchero y Grande, 2011)

Asimismo, la restauración virtual, permite obtener una base de datos digitalizada en 3D de piezas arqueológicas; así como, un modelo tridimensional completo reconstruido para su posterior reproducción.

Por otra parte, la impresión tridimensional, a demás de contar con un proceso de fabricación con características únicas, que favorecen el desarrollo y la producción de los resultados, también es un proceso flexible; ya que, el modelo o representación digital puede ser editado antes de su reproducción física. Las ediciones incluyen: escalado, cambio de forma e incluso, la impresión de partes seleccionadas del objeto. Por lo tanto, la fabricación digital mejora considerablemente la información extraída de un objeto o pieza perteneciente al patrimonio cultural al disminuir errores que repercuten en la disminución de costes.

Desde que se hicieron posibles las formas de reconstrucción y reproducción 3D, han surgido diferentes proyectos de digitalización tridimensional alrededor del mundo en el campo del patrimonio cultural. Lo cual ha servido para acercar y proporcionar al espectador una valoración y apreciación reconocida del mismo.

## SITUACIÓN ACTUAL DE LA RECONSTRUCCIÓN 3D

La importancia de la recuperación y preservación de piezas, artefactos y monumentos, es indispensable para el seguimiento de la historia en ciertos lugares del mundo.

Con el propósito de aclarar el contexto de la digitalización, reconstrucción y reproducción 3D en los proyectos de patrimonio cultural, se mencionan algunas de las obras más influyentes:

### 2.2.1

#### THE DIGITAL MICHELANGELO PROJECT

Este proyecto describe la experiencia de digitalización de dos interiores de edificios, diez estatuas digitalizadas y 1163 fragmentos de un mapa antiguo de mármol italiano. Los propósitos de este proyecto abarcaron: la generación de los modelos digitales y la disposición de estos de manera abierta en las plataformas de búsqueda digital. (Cfr. Gomes, Pereira & Silva, 2014)

En las imágenes (21-22) se aprecia la gran fidelidad y precisión que tiene esta tecnología; ya que, conserva las formas de manera exacta y de gran calidad resultando en una gran ventaja para la preservación del patrimonio cultural.



21  
22

The Digital Michelangelo Project: 3D Scanning of Large Statues. (2000).  
Arriba: Escultura del David de Miguel Ángel.  
Izquierda: Representación computarizada del David de Miguel Ángel a partir de un modelo geométrico [Fotografía].  
Recuperado de [https://graphics.stanford.edu/papers/dmich-sig00/dmich-sig00-nogamma-comp-low.pdf?fbclid=IwAR2TwLE55VKtaCFie7hGTfcmAGv\\_vvEAK2hqvNmTFdeJ7ForBmR1JPswY](https://graphics.stanford.edu/papers/dmich-sig00/dmich-sig00-nogamma-comp-low.pdf?fbclid=IwAR2TwLE55VKtaCFie7hGTfcmAGv_vvEAK2hqvNmTFdeJ7ForBmR1JPswY)

### 2.2.2

## IMPRESIÓN TRIDIMENSIONAL EN LA RESTAURACIÓN DE OBRAS DE ARTE

Proyecto de restauración patrimonial de Florencia, Italia, realizado por el restaurador Mattia Mercante quien, a través del empleo del escaneo, modelado e impresión tridimensional, completa esculturas, obras de arte (23), piezas fragmentadas; así como decorativas y muebles antiguos de vital importancia para el patrimonio del país. De esta manera, reconoce que esta tecnología puede resolver algunos de los problemas que se presentan en la documentación, valoración y conservación del patrimonio. (Cfr. Imprimalia 3D, 2018)



23

Imprimalia 3D. (2018).

*Izquierda: pieza original dañada.*

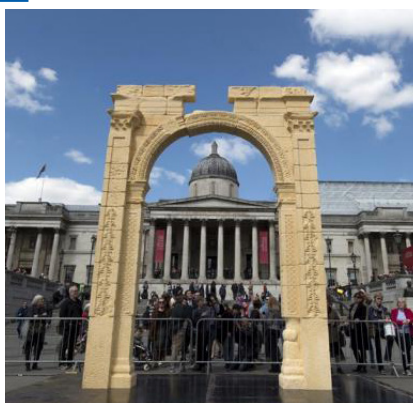
*Derecha: restauración de la pieza con la implementación de la tecnología 3D [Fotografía].*

Recuperado de <http://www.imprimalia3d.com/noticias/2018/07/05/0010149/impresi-n-3d-restauraci-n-obras-arte>

### 2.2.3

## REPLICA DEL ARCO DEL TRIUNFO EN SIRIA

Este caso, está relacionado con los atentados ocurridos durante el año 2015 en Siria que provocaron la destrucción de su Arco del Triunfo con cerca de 2000 años de antigüedad. Ante esa situación, se recurrió a la implementación de la tecnología tridimensional para construir una réplica (24) con el objetivo de que esta tuviera un recorrido por diferentes ciudades del mundo para fomentar la solidaridad con la causa. (Cfr. Marín, 2017)



24

La nación. (2016).

*Réplica del Arco del Triunfo de Siria [Fotografía].*

Recuperado de <https://www.nacion.com/el-pais/patrimonio/recrean-el-arco-de-triunfo-de-palmira-en-la-plaza-de- Trafalgar/U5ENXI6OLBFVDE4CSCJ6OE3Y6U/story/>

## 2.2.4

### INCENDIO DEL MUSEO NACIONAL DE RÍO DE JANEIRO

El 2 de septiembre de 2018, debido a un incendio provocado por un cortocircuito (25), cerca de la mitad de las colecciones originales que el Museo Nacional de Rio de Janeiro en Brasil resguardaba, se destruyeron total y parcialmente. En consecuencia, se suscitó la pérdida irreversible de información de piezas arqueológicas esenciales para el estudio del pasado histórico de la humanidad. (Cfr. Milz, 2019)

El incidente ocurrido, ocasionó una gran necesidad por recuperar las piezas que se hallaron incompletas a través de la aplicación de los métodos de restauración tradicionales y digitales que implicaran la aplicación de la tecnología tridimensional.



25

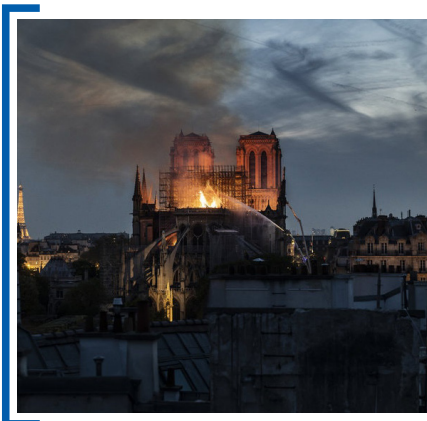
Moraes, R. (s.f).  
*El Museo Nacional de Rio de Janeiro durante el incendio de 2018* [Fotografía].  
Recuperado de <https://www.dw.com/es/brasil-optimismo-a-un-a%C3%B1o-del-incendio-en-el-museo-nacional-de-r%C3%ADo-de-janeiro/a-50261186>

## 2.2.5

### INCENDIO DE NOTRE DAME

Un caso más reciente y trascendental que reafirma la importancia de tener un acervo digital del patrimonio cultural es el incendio de la catedral de Notre Dame en Paris, Francia, (26) el 15 de abril de 2019.

Durante este percance, se consumieron emblemáticos objetos datados del siglo XIX; así como, de la Edad Media. Lo cual dejó como consecuencia una restauración costosa y tardía debido a la falta de un respaldo digital de cada bien cultural dañado.



26

De Vigerie, V. (2019).  
*La catedral de Notre Dame durante el incendio de 2019* [Fotografía].  
Recuperado de <https://www.nytimes.com/es/2019/04/15/espanol/opinion/notre-dame-incendio-patrimonio.html>

Por ello es importante destacar la importancia de implementar cada vez más esta tecnología en el ámbito de la preservación del patrimonio cultural; ya que, este auxilia a la conservación del conocimiento por la pérdida, total o parcial, de bienes culturales ocasionada tanto por eventos naturales como provocados.

Como se mencionó anteriormente, la tecnología 3D aplicada a la arqueología es una gran herramienta; puesto que permite la reconstrucción de faltantes físicos para la representación fidedigna de piezas originales.

En México a pesar de que esta tecnología no es reciente, no existen muchos casos o instituciones que apliquen como herramienta de restauración esta tecnología. Sin embargo, el Instituto Nacional de Antropología e Historia encargado de preservar el patrimonio cultural de México, creó el proyecto *Mediateca*; el cual, ha comenzado la tarea de concentrar gran parte del material generado de forma digital (mapas, audios, videos, entre otros) en un repositorio institucional de consulta pública.

La importancia de recopilar e integrar un acervo tridimensional para el patrimonio cultural del país es muy grande; ya que, en México existe un sentido de apropiación inmenso por el mismo. Es decir, la gente quiere conocerlo para sentirse identificada. De ahí la importancia de llevarlo a su reproducción 3D.

## 2.3

### INAH

El INAH tiene a cargo una red de 120 museos en territorio nacional divididos en: nacionales, regionales, locales, de sitio, comunitarios y metropolitanos. Dentro de sus actividades, destacan la excavación, el rescate y la restauración de monumentos históricos y piezas arqueológicas para la preservación del patrimonio cultural. (Cfr. INAH, 2016)

Desde hace varios años se han utilizado e implementado las técnicas de captura tridimensional para la documentación del patrimonio cultural en México, siendo el INAH uno de sus principales autores en implementar la fotogrametría y escaneo 3D para la constitución de acervos virtuales de modelos tridimensionales en diferentes escalas, que abarcan desde pequeños objetos hasta zonas arqueológicas completas (Cfr. López, M., 2016).

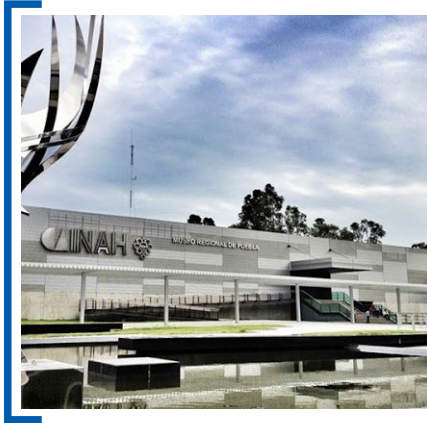
En el 2009 el INAH y la Coordinación Nacional de Monumentos Históricos, a través del Laboratorio de Imagen y Análisis Dimensional (LIAD) inició una base de datos de monumentos históricos y arqueológicos emblemáticos de México con modelos digitales 3D.

Posteriormente, en el 2014 a través del Consejo Nacional para la Ciencia y la Tecnología (CONACYT), se inició el proyecto Tecnología 3D por barrido laser aplicado al estudio, protección, conservación, restauración y difusión del patrimonio cultural de México. (Cfr. Trejo, 2018)

### 2.3.1

## INSTITUTO DE ANTROPOLOGÍA E HISTORIA PUEBLA

En 1969 surgió en la Ciudad de Puebla el Instituto de Antropología e Historia, más tarde en 1971 se construyó la sección de arqueología en la zona de *Los Fuertes*; así como, la ceramoteca, las cuales siguen actualmente en función. Finalmente, en 1976 se creó el Museo Regional (27) con salas de arqueología, historia y etnografía.



27

Twopos. (s. f.).  
INAH: Museo regional de Puebla [Fotografía].  
Recuperado de <http://twopos.mx/2608/16084/museo-de-la-evoluci%C3%B3n>

### 2.3.1.1

#### ANTIGÜEDAD DE LAS PIEZAS

El material arqueológico que se ha obtenido en la ciudad de Puebla, data desde 1521; sin embargo, se han encontrado piezas de 1500 a.C.; es decir, más de 30 siglos de material arqueológico enterrado que ha pasado por diferentes procesos antes de su hallazgo.

### 2.3.1.2

#### RECUPERACIÓN Y ANÁLISIS DE LAS PIEZAS

Al realizar las excavaciones para el descubrimiento de las piezas, los arqueólogos pueden encontrarlas completas o fragmentadas. En este aspecto, es poco el porcentaje de las piezas completas que se obtienen al llevar a cabo esta actividad. Generalmente, este corresponde a entierros o templos donde hubo ceremonias.

Por otra parte, este proceso también incluye el rescate de piezas que fueron extraídas por personas que no poseen el conocimiento para ejecutar una correcta extracción; ya que, por lo general, esta situación se debe a su robo. Como consecuencia, las piezas se maltratan o rompen dejando algunos fragmentos restantes.

Una vez realizada la excavación o la recuperación del material arqueológico, se analiza su situación cronológica; así como, su propósito o función (cuestiones utilitarias, domésticas, ceremoniales, religiosas, etc.) En este caso, los fragmentos de 5 cm permiten el análisis de su forma (convexa, cóncava, recta) y su decorado; sin embargo, los tiestos de 2 cm, 1 cm o menos, dificultan este análisis.

Asimismo, los análisis de fragmentos permiten la deducción del tipo de material, pintura, temperatura empleada para su cocción y técnica de modelado o tipo de molde empleado para su fabricación.

En este aspecto, la recuperación de los fragmentos resulta de suma importancia porque permite obtener la misma información que una pieza completa. De esta manera, se pueden generar conclusiones finales y físicas que ayudan a ampliar el conocimiento cultural e histórico. (E. Pérez, comunicación personal, 29 de octubre de 2018).

La tecnología está avanzando a pasos agigantados, aun se necesita seguir evolucionando a un nivel mayor, sin embargo la tecnología 3D es un gran avance para ayudar al patrimonio cultural a seguir preservando la historia del mundo y del país.

Cada museo u organización en pro de la cultura que han implementado esta tecnología, han llevado a cabo el proceso tridimensional de diferentes maneras; es decir, han creado o seguido diferentes técnicas o métodos que ha permitido el registro o captura de piezas arqueológicas a través de sistemas de captura de datos tridimensionales y softwares específicos asociados a cada herramienta para completar el proceso.

## ASPECTOS GENERALES

---

La implementación de las nuevas tecnologías, en específico de la tecnología 3D en el ámbito cultural, ha beneficiado a los museos y organizaciones culturales; ya que, gracias a sus eficientes procesos de captura, reconstrucción y reproducción de datos aplicados a las piezas arqueológicas, la sociedad ha tenido un mayor acercamiento a los bienes culturales. Contribuyendo a generar un impacto positivo para la preservación y el acercamiento cultural.

En consecuencia, las instituciones interesadas en el rescate y restauración de las piezas arqueológicas como el INAH ha implementado esta técnica para evitar pérdidas materiales del pasado histórico de México a través de la reconstrucción virtual de piezas fragmentadas para su posterior reproducción y difusión.

Sin embargo, los métodos aplicados por esta institución; así como, por otras dedicadas a este ámbito, han variado dependiendo del tiempo histórico, las herramientas y los softwares disponibles.



# 03

---

## **COMPARACIÓN METODOLÓGICA DE TECNOLOGÍA TRIDIMENSIONAL APLICADA A PROYECTOS ARQUEOLÓGICOS**



## INTRODUCCIÓN

Las metodologías recopiladas para la comparativa de las mismas, responden a las necesidades de captura y reconstrucción virtual de cada objeto empleado para su desarrollo; así como, a los objetivos de investigación planteados por las instituciones que las elaboraron.

De esta manera, se presenta cada fase de los procesos implementados para el registro y reconstrucción de piezas arqueológicas completas y fragmentadas mediante la implementación de herramientas de registro digital como: la fotografía, el escaneo tridimensional, el dibujo bidimensional vectorizado, la reconstrucción y el modelado tridimensional en diversos softwares, para la obtención de imágenes digitales fotorealistas y reproducciones impresas con herramientas de prototipado rápido.

Por otra parte, con el propósito de identificar las similitudes en los procedimientos; así como, las diferencias que conforman parte esencial del desarrollo de cada metodología se realizó una tabla comparativa que resume el contenido esencial de estas.

El presente capítulo, expone la recopilación y estudio de seis casos de investigaciones primarias referidas a la reconstrucción virtual de objetos arqueológicos de pequeño formato analizados a través del método cuantitativo Meta-análisis. Por lo que, los resultados obtenidos en estos estudios, se integran a través de una serie de síntesis individuales que derivan en la construcción de una tabla comparativa.

Con respecto a la selección de los estudios, se eligieron aquellos que cumplieran con los siguientes aspectos:

1. Documento publicado por una institución universitaria.
2. Aplicación de la reconstrucción virtual en objetos arqueológicos de pequeño formato.
3. Implementación de herramientas digitales para la captura de datos tridimensionales (escáner tridimensional o fotogrametría); así como, el empleo de softwares especializados para la generación de modelos tridimensionales.

Es importante señalar que, los casos de estudio seleccionados, corresponden a una muestra representativa que permite la generalización de los conocimientos obtenidos en los diversos procesos de investigación referentes a la reconstrucción tridimensional de objetos arqueológicos.

Por otra parte, las síntesis realizadas, tuvieron como objetivo identificar:

1. Los pasos establecidos para la realización del proceso de digitalización tridimensional de las piezas de estudio.
2. Los factores en común que presentaban los métodos.
3. Los resultados conseguidos durante la ejecución de las investigaciones.
4. El producto final obtenido (modelo virtual o impreso).

### GUÍA BÁSICA PARA MODELADO EN 3D DE OBJETOS CERÁMICOS ARQUEOLÓGICOS COMPLETOS Y FRAGMENTADOS

**Autores** | Solórzano, M.S.<sup>2</sup>, Bolaños, J.E.<sup>1</sup>, Urbina, C.J.<sup>2</sup> & Gallardo, V.<sup>1</sup>

**Instituciones** | <sup>1</sup>Universidad Central de Ecuador.  
<sup>2</sup>Universidad Regional Amazónica IKIAM.

**Publicación** | Arqueología y Territorio (revista electrónica).

**País** | España.

**Año** | 2016.

#### RESUMEN

Descripción de los procedimientos para realizar construcciones en tres dimensiones, totales o parciales, de artefactos cerámicos, completos o fragmentados, mediante la implementación del programa *AutoCAD* en su versión 2012.

#### 3.2.1

#### CATEGORIZACIÓN DE LOS OBJETOS

Como punto de partida, se elaboraron dos categorías para la clasificación de los objetos cerámicos:

##### 1. Objetos completos

Categoría aplicada a piezas simétricas y asimétricas que se encontraran íntegras o que presentaran indicios de fracturas en su estructura.

##### 2. Objetos fragmentados

Categoría aplicada únicamente a bordes cerámicos.

#### 3.2.2

#### MÉTODOS Y TÉCNICAS IMPLEMENTADOS

Los métodos y técnicas aplicados para la constitución de esta metodología, toman como base, para el esquema inicial de trabajo, la propuesta planteada en Aplicaciones del 3D en cerámica prehistórica de contextos arqueológicos gallegos: Un estudio sobre percepción visual de Irujo, D. & Prieto, M. (2005); la cual, abarca los siguientes puntos:

1. Fotografía de los fragmentos u objetos.
2. Dibujo arqueológico.
3. Reconstrucción del perfil.
4. Reconstrucción de la decoración.
5. Reconstrucción del objeto.

### 3.2.2.1

## FOTOGRAFÍA DE LOS FRAGMENTOS U OBJETOS

Durante esta fase, se elaboró una serie de tomas fotográficas digitales (28) de los objetos cerámicos con el objetivo de que estas fungieran como base para la realización de los dibujos arqueológicos en *AutoCAD*. Sin embargo, este proceso solo fue empleado para los objetos cerámicos completos; ya que, los elementos fragmentados, se trabajaron directamente sin ningún registro fotográfico previo.



28

Solórzano, M. S., Bolaños, J. E., Urbina, C. J., & Gallardo, V. (2008-a).

*Objeto fotografiado* [Fotografía].

Recuperado de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5906639>

### 3.2.2.2

## DIBUJO ARQUEOLÓGICO

### 1. Objetos completos

Para los objetos cerámicos completos, el dibujo del perfil externo del objeto (29) se realizó implementando las fotografías digitales; así como, las medidas correspondientes al espesor del cuello, el borde y la base del mismo.



29

Solórzano, M. S. et al. (2008-b).

*Objeto simétrico digitalizado y proyectado en 2D* [Fotografía].

Recuperado de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5906639>

### 2. Objetos fragmentados

Por otro lado, para los objetos fragmentados, se seleccionaron piezas que, por su características morfológicas, contaran con una superficie perpendicular plana que pudiera recibir su forma en negativo.

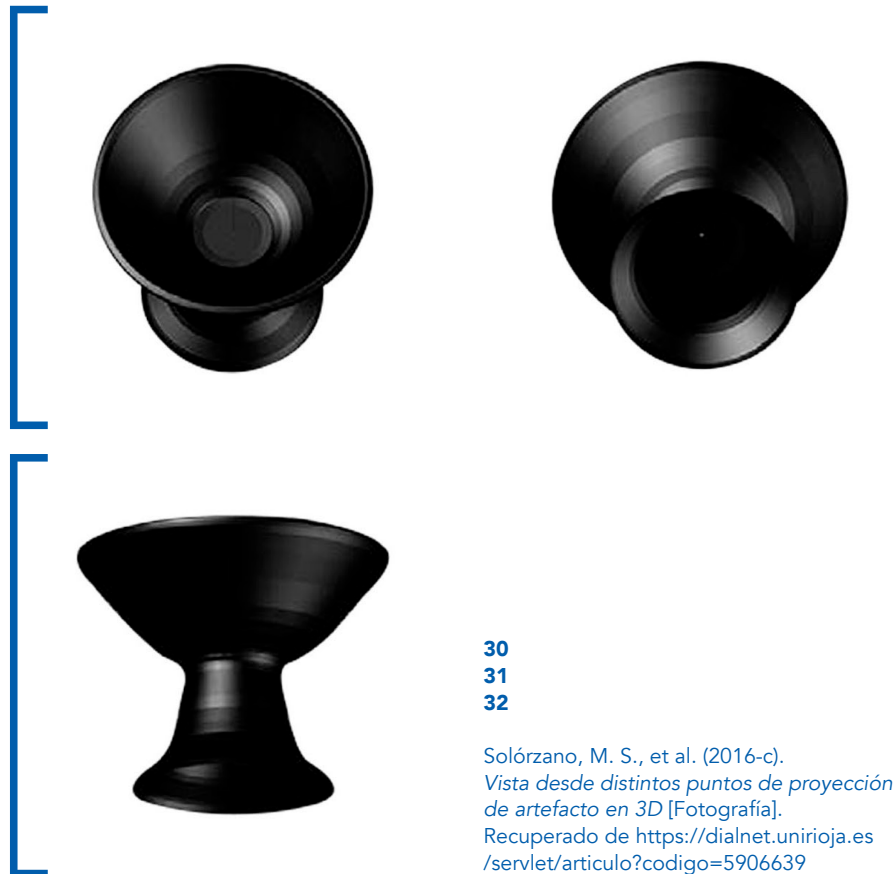
Para su manipulación y captura de datos, se realizaron moldes de las mismas en una espuma florar. Posteriormente, este fue escaneado para realizar su trazado en dos dimensiones.

### 3.2.2.3

## RECONSTRUCCIÓN DEL PERFIL / RECREACIÓN EN 3D

### 1. Objetos simétricos completos y fragmentados

Una vez elaborado el trazado base del objeto cerámico, se procedió a la proyección de la mitad de su contorno para complementar su estructura (30, 31, 32). Para este resultado, se empleo como referencia el diámetro de la boca o base del objeto.



### 2. Objetos asimétricos fragmentados

Por otra parte, para los objetos cerámicos fragmentados, este proceso, se llevó a cabo implementado una secuencia fotográfica de todas las vistas del objeto asimétrico seleccionado para elaborar una rejilla bidimensional de su estructura. Posteriormente, esta se dividió en dos partes iguales, a través de un eje de simetría; lo cual permitió generar un duplicado de la misma y complementar la estructura.

### 3.2.3

## COLOR

La aplicación de color fue basada en el sistema de color *Munsell* con conversión en RGB.

### RECONSTRUCCIÓN VIRTUAL. UN APOORTE A LA ARQUEOLOGÍA EN TRES DIMENSIONES

**Autores** | Echenique, N.G.<sup>1</sup>, Sokol, O.L.<sup>2</sup> & Lozano, M<sup>3</sup>.  
**Instituciones** | <sup>1</sup>Universidad Nacional de la Plata.  
<sup>2</sup>Universidad de Buenos Aires.  
<sup>3</sup>Universidad Nacional de Quilmes.  
**Publicación** | Cuadernos del Instituto Nacional de Antropología y Pensamiento Latinoamericano – Series Especiales.  
**País** | Argentina.  
**Año** | 2017.

#### RESUMEN

Presentación de dos casos de reconstrucción virtual de piezas cerámicas fragmentadas; así como, de las condiciones necesarias para la aplicación del proceso mediante la implementación del programa *Strata 3D CX* y *Solid Edge* para el primer y segundo caso respectivamente.

#### 3.3.1

#### RECONSTRUCCIONES DE PIEZAS CERÁMICAS DEL SITIO LAS MARÍAS (PARTIDO DE MAGDALENA)

##### 3.3.1.1

#### CATEGORIZACIÓN DE LAS PIEZAS

El proceso de reconstrucción virtual, partió con la categorización de los objetos cerámicos con base en sus características físicas y funcionales; de modo que, se obtuvieron clasificaciones por: procesamiento, almacenaje y transferencia.

##### 3.3.1.2

#### REMONTAJE DE LAS PIEZAS

Una vez establecidas las categorías de la piezas, se realizó el remontaje de las mismas con el propósito de determinar el porcentaje de reconstrucción con el que contaban; así como, obtener un indicio de su estructura original.

##### 3.3.1.3

#### REMONTAJE TOTAL DE LAS PIEZAS MEDIANTE RECONSTRUCCIÓN VIRTUAL

Subsiguiente al proceso de remontaje manual, se procedió a complementar las piezas a través de la implementación de herramientas digitales para obtener una mejor comprensión de las mismas a nivel morfológico. Este constó de las etapas de: remontaje virtual, dibujo de perfil y elaboración de imagen vectorial de la pieza.

## 1. Remontaje virtual

Para realizar el remontaje virtual, se seleccionaron piezas que contaran con un perfil que denotara, de manera clara, la tendencia de su forma desde el inicio hasta la base de su estructura. Asimismo, durante esta etapa, se realizaron mediciones para obtener el diámetro de las piezas y determinar su altura.

## 2. Dibujo del perfil

Finalizado el remontaje digital de las piezas, se procedió a realizar el dibujo de su perfil (33), tomando como referencia fotografías digitales de las mismas, en el programa *Strata 3D CX*. Una vez concluidos, estos sirvieron como base para generar el modelo 3D de las piezas.



33

Echenique, N. G., Sokol, O. L., & Lozano, M. (2017-a). *Dibujo de perfil para la reconstrucción virtual de piezas cerámicas del sitio Las Marías (partido de Magdalena)* [Fotografía]. Recuperado de <http://ppct.caicyt.gov.ar/index.php/cinapl-se/article/view/10575/9450>

## 3. Elaboración de imagen vectorial o renderizado

Acabado el modelo 3D de la pieza, se generó un renderizado para visualizar la estructura completa (34) y poder realizar el análisis morfológico de la misma.



34

Echenique, N. G., et al. (2017-b). *Modelo 3D resultante de la reconstrucción virtual de piezas cerámicas del sitio Las Marías (partido de Magdalena)* [Fotografía]. Recuperado de <http://ppct.caicyt.gov.ar/index.php/cinapl-se/article/view/10575/9450>

### 3.3.2

## RECONSTRUCCIONES DE PIEZAS CERÁMICAS DE SITIOS DE LA CUENCA DEL RÍO SALADO (PARTIDO DE CHASCOMÚS)

### 3.3.2.1

## AGRUPACIÓN DE PIEZAS

El desarrollo del proceso de reconstrucción virtual, comenzó con la clasificación de las piezas (vasijas de cerámica) de acuerdo a: el remontaje de los fragmentos, la información documental; así como, las colecciones arqueológicas con las que se contaba anteriormente.

### 3.3.2.2

#### APROXIMACIÓN DE USO DE LAS PIEZAS

Una vez realizada la clasificación de las piezas, se establecieron sus posibles usos para proceder a su toma fotográfica; así como, a la obtención de medidas de su radio, diámetro de boca, perímetro, altura y volumen.

### 3.3.2.3

#### SELECCIÓN DE LA PIEZA O FRAGMENTO A TRABAJAR

Posteriormente, se seleccionó la vasija a trabajar considerando que alguno de sus fragmentos representaran una parte significativa del perfil de la misma; es decir, una parte de borde y base (35).



35

Echenique, N. G. et al. (2017-c).  
*Reconstrucción 3D a partir de un fragmento de vasija experimental* [Fotografía].  
Recuperado de <http://ppct.caicyt.gov.ar/index.php/cinapl-se/article/view/10575/9450>

### 3.3.2.4

#### RECONSTRUCCIÓN TRIDIMENSIONAL

Finalmente, con la información obtenida, se procedió a realizar la reproducción de la pieza seleccionada en el programa *Solid Edge* versión 18 (36).



36

Echenique, N. G. et al. (2017-d).  
*Reconstrucción 3D a partir de un fragmento de vasija experimental* [Fotografía].  
Recuperado de <http://ppct.caicyt.gov.ar/index.php/cinapl-se/article/view/10575/9450>

**ESCANEADO EN 3D Y PROTOTIPADO DE PIEZAS ARQUEOLÓGICAS.  
LAS NUEVAS TECNOLOGÍAS EN EL REGISTRO, CONSERVACIÓN  
Y DIFUSIÓN DEL PATRIMONIO ARQUEOLÓGICO**

**Autor** | Tejado, J.M.  
**Institución** | Universidad de La Rioja.  
**Publicación** | IBERIA, Revista de la Antigüedad.  
**País** | España.  
**Año** | 2005.

**RESUMEN**

Estudio de una hebilla liriforme mediante el uso de herramientas digitales tridimensionales (escáner 3D *Konica Minolta Non-Contact 3D Digitizer VI-910* e impresora 3D *Objet EDEN 500V*) para su análisis y procesamiento de datos.

**3.4.1****DESCRIPCIÓN DE LA PIEZA**

Para el desarrollo del modelo tridimensional, se seleccionó una hebilla liriforme de la segunda mitad del siglo VII y VIII antes de nuestra era. La cual consta de: hebilla, placa, pasador, aguja de hierro con bronce y una superficie decorada con diversos motivos geométricos.

**3.4.2****DESCRIPCIÓN DEL ESCÁNER**

El escáner tridimensional empleado, para la captura de datos de la pieza, fue el *Konica Minolta VI-910*. Este permitió la captura fotográfica a color de la pieza y el registro exacto de la ubicación de la variación de sus matices con una precisión de 8 micras.

**3.4.3****PROCESO DE ESCANEADO****3.4.3.1****PREPARACIÓN DEL ESCÁNER  
Y LA PIEZA A ESCANEAR**

En una primera instancia, para la ejecución del proceso de escaneado, se realizaron diversas pruebas con el propósito de identificar la orientación óptima del escáner que permitiera una lectura completa de la pieza.

Por otra parte, la hebilla fue colocada sobre un torno giratorio que poseía una pantalla blanca para propiciar una lectura de datos más certera por parte del escáner.

### 3.4.3.2

## CAPTURA Y PROCESAMIENTO DE DATOS

El proceso de captura de datos, se realizó conectando el torno giratorio a un ordenador que marcó cuatro giros de 90° hasta obtener una vista total de la pieza de manera digital. Posteriormente, los datos obtenidos fueron procesados y tratados en el software *Rapidform 2006* para conseguir el mallado de la hebilla.

### 3.4.4

## APLICACIÓN DE COLOR

Conseguido el mallado de la hebilla, se procedió a realizar una captura fotográfica de la pieza original con la finalidad de incrustarla en el modelo virtual (37) generado para obtener un resultado más apegado a la realidad.



37

Tejado, J. M. (2005-b).  
*Vista del modelo virtual resultante* [Fotografía].  
Recuperado de <https://publicaciones.unirioja.es/ojs/index.php/iberia/article/view/303/285>

### 3.4.5

## IMPRESIÓN

Después de finalizar el registro digital de la pieza, se realizó su reproducción física en escala 1:1(38) en la impresora *Objet EDEN 500V* con los fotopolímeros *Polyjet™ Poly-mer*.



38

Tejado, J. M. (2005-a).  
*Resultado final del prototipado* [Fotografía].  
Recuperado de <https://publicaciones.unirioja.es/ojs/index.php/iberia/article/view/303/285>

**ESTUDIO GEOMÉTRICO DE PIEZAS ARQUEOLÓGICAS  
A PARTIR DE UN MODELO VIRTUAL 3D**

**Autores** | Mozas, A.T.<sup>1</sup>, Pérez, J.L.<sup>1</sup>, Barba, V.<sup>2</sup>, & López, A.<sup>1</sup>.  
**Instituciones** | <sup>1</sup>Universidad de Jaén.  
<sup>2</sup>Arq13, Estudio de Arqueología S.L.  
**Publicación** | Virtual Archaeology Review - VAR (revista académica electrónica).  
**País** | España.  
**Año** | 2011.

**RESUMEN**

Desarrollo de un estudio geométrico realizado sobre una pieza arqueológica de pequeño formato mediante un modelo virtual 3D a través de la implementación de un escáner tridimensional de tecnología láser.

**3.5.1****ESCANEADO TRIDIMENSIONAL****3.5.1.1****DESCRIPCIÓN DE LA PIEZA**

La pieza, sobre la cual se realizó el proceso de escaneado, corresponde a una representación femenina tallada en un hueso de animal perteneciente al periodo Calcolítico del III milenio antes de nuestra era.

**3.5.1.2****ESCÁNER TRIDIMENSIONAL**

El proceso, se realizó empleando el escáner tridimensional Minolta VI; el cual, se caracteriza por implementar una tecnología láser de corto alcance con una resolución de 0.17 mm para los ejes "x" "y" y de 0.047 mm para el eje "z"; así como, una precisión de captura de datos de 0.02 mm.

**3.5.1.3****PROCESO DE ESCAÑO TRIDIMENSIONAL**

El escaneo se ejecutó, situando la pieza sobre un soporte móvil (39); así como, desplazando el escáner para obtener una captura de datos que abarcara todos los ángulos de la misma.



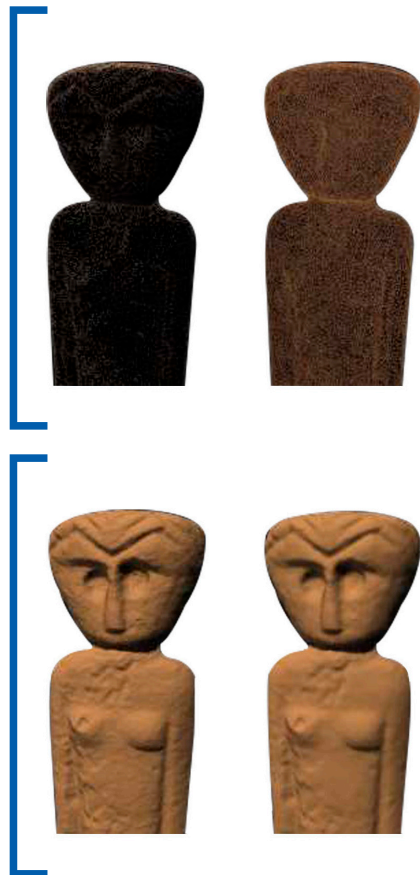
39

Mozas, A. T., Pérez, J. L., Barba, V., & López, A. (2011-a). *Escaneo de la pieza sobre soporte móvil* [Fotografía]. Recuperado de <https://polipapers.upv.es/index.php/var/article/view/4627/4758>

### 3.5.2

### MODELADO

Finalizada la captura de datos tridimensionales, se procedió a realizar el modelado (40-41). Este incluyó, la eliminación de puntos residuales; así como, la alineación y unión de los puntos obtenidos en los diversos escaneos.



40  
41

Mozas, A. T. et al. (2011-b). *Proceso de modelización: nube de puntos, malla de triángulos, modelo triangular y modelo suavizado* [Fotografía]. Recuperado de <https://polipapers.upv.es/index.php/var/article/view/4627/4758>

## RECONSTRUCCIÓN DIGITAL DE OBJETOS ARQUEOLÓGICOS

**Autores** | Sánchez, G.<sup>1</sup>, Leal, E.<sup>2</sup>, & Leal, N.<sup>2</sup>  
**Instituciones** | <sup>1</sup>Universidad del Magdalena.  
<sup>2</sup>Universidad Autónoma del Caribe.  
**Publicación** | Prospectiva. Una nueva visión para la ingeniería (revista académica electrónica).  
**País** | Colombia.  
**Año** | 2014.

## RESUMEN

Aplicación de la reconstrucción tridimensional en un conjunto de vasijas cerámicas indígenas de la región Caribe de Colombia por medio de la implementación del escaneo tridimensional por luz estructurada.

## 3.6.1

## ADQUISICIÓN DE DATOS

Para la obtención de la información geométrica de las vasijas; así como, de sus texturas se implementó el procedimiento de ingeniería inversa. El cual consistió en el posicionamiento de cada pieza cerámica frente a un proyector de video y una cámara fotográfica que les arrojaban patrones de luz.

Una vez finalizado la captura de datos, en el software *David Scanner*, a través de la lectura del conjunto de puntos tridimensionales obtenidos durante el proceso de escaneo, se generó una vista parcial del objeto.

Durante el proceso, se señaló que la complejidad de la captura de datos variaba de acuerdo al tipo de material con el que se encontraban fabricadas las vasijas. Es decir, aquellas realizadas con materiales opacos presentaban menor dificultad para su captura, mientras que aquellas elaboradas con materiales mixtos presentaban mayor problema.

## 3.6.2

## FILTRADO Y REGISTRO DE VISTAS

Obtenida la vista parcial del objeto, se procedió a la detección de los valores atípicos que afectaban la precisión de las medidas en la nube de puntos del mismo. Lo anterior, se realizó mediante la implementación de la distancia *Mahalanobis*; ya que, esta toma en consideración la variabilidad y dispersión de los datos para ajustarlos. Finalizados estos dos últimos pasos, se alinearon las vistas y se registraron.

### 3.6.3

### FUSIÓN Y CORRECCIÓN DE HUECOS

Concluido el proceso de filtrado y registro de vistas en el modelo tridimensional, se buscaron, dentro del mismo, las áreas sin información; es decir, los huecos que necesitan ser cerrados o fusionados. Esta acción fue llevada a cabo con el software *Meshlab (3D-CoForm)*.

El procedimiento de fusión, se desarrolló detectando el contorno y la red de triangulación interna del modelo tridimensional para la posterior aplicación de la opción Avance Frontal; debido a que, esta permite cerrar los huecos del modelo agregando, de acuerdo a la necesidad, triángulos o vértices.

En contra parte, la ejecución de la misma, genera una triangulación plana; por lo cual, se realizó una optimización de la posición de los triángulos y vértices agregados con un modelo basado en curvaturas para recuperar la tridimensionalidad del modelo.

### 3.6.4

### TEXTURIZADO

Finalmente para la conclusión del modelo tridimensional, se incorporó a este la textura propia del modelo original a través de las imágenes adquiridas durante la captura de datos; ya que, estas poseían información concerniente al color de la misma.

Debido a la sensibilidad en los cambios de iluminación de cada imagen, se les realizó una corrección de color y, una vez concluido este paso, se procedió a anexar la imagen en un mapeo de texturas.



42

Sánchez, G., Leal, E., & Leal, N. (2014). *Ejemplo de modelos reales (izquierda) y su reconstrucción tridimensional (derecha)* [Fotografía]. Recuperado de <http://www.scielo.org.com/pdf/prosp/v12n2/v12n2a04.pdf>Piendipsus dolori in et utatate mqu

### RECONSTRUCCIÓN 3D Y CÁLCULO VOLUMÉTRICO DE RECIPIENTES CERÁMICOS. ALCANCES Y LIMITACIONES PARA EL ESTUDIO Y CONSERVACIÓN CERÁMICA DE LA TAMBERÍA DE GUANDACOL (PROVINCIA DE LA RIOJA)

**Autores** | Carosio, S.A.<sup>1</sup>, Aguilar, J.P.<sup>1</sup>, & Bárcena, J.R.<sup>1</sup>  
**Instituciones** | <sup>1</sup>Instituto de Ciencias Humanas, Sociales y Ambientales (INCIHUSA).  
**Publicación** | La Zaranda de Ideas.  
 Revista de Jovenes Investigadores de Arqueología.  
**País** | Argentina.  
**Año** | 2013.

#### RESUMEN

Método experimental de reconstrucción digital tridimensional para el cálculo volumétrico de piezas cerámicas del sitio arqueológico de la Tambería de Guandacol.

#### 3.7.1

#### CATALOGACIÓN Y AGRUPACIÓN DE LOS FRAGMENTOS

Durante esta etapa, se procedió a la identificación de los fragmentos de acuerdo al color, la textura, el tipo de pasta y parte de la vasija (cuerpo, base, cuello y borde).

#### 3.7.2

#### REGISTRO DE MEDIDAS DE LOS FRAGMENTOS

Posterior a la clasificación de los fragmentos, se procedió al registro de dimensiones correspondientes a su espesor, largo, ancho y grado de curvatura.

#### 3.7.3

#### REMONTAJE DE TIESTOS

Con los fragmentos identificados y medidos, se procedió al remontaje de las piezas cerámicas que presentaban una mayor cantidad de piezas para su armado.

Asimismo, durante este proceso, se identificó el tipo de vasija de acuerdo a su morfología con información bibliográfica existente. De esta forma, se obtuvieron clasificaciones por grupos de: tinajas, ollas con boca restringida y no restringida, jarras, cuencos y escudillas.

Por otra parte, se obtuvo una medida estimada del diámetro de bordes y bases de las piezas cerámicas remontadas.

### 3.7.4

## REGISTRO FOTOGRÁFICO Y RECONSTRUCCIÓN TRIDIMENSIONAL DE LOS FRAGMENTOS

Una vez concluida la catalogación, el registro y remontaje de tiosos, se procedió a la captura fotográfica de las piezas a reconstruir y a su modelado y renderizado tridimensional.

### 3.7.4.1

## REGISTRO FOTOGRÁFICO DE LOS FRAGMENTOS

La toma fotográfica de los fragmentos, se implementó para la captura de colores, texturas y relieves; así como, para la identificación de los tamaños y formas de los fragmentos.

El registro fue ejecutado considerando los parámetros de escala, iluminación (lateral y frontal), orientación y selección de vista principal de los fragmentos y captura desde diversos ángulos.

### 3.7.4.2

## RECONSTRUCCIÓN TRIDIMENSIONAL

La reconstrucción tridimensional, fue realizada en los programas informáticos de *Adobe Photoshop CS3*, *Adobe Illustrator CS3* y *Rhinoceros 4.0*. Estos fueron implementados para:

### 1. *Adobe Photoshop CS3*

Edición fotográfica de las capturas correspondientes a los fragmentos para la obtención de colores y texturas de sus superficies. Así como, aplicación de acabados en el modelo tridimensional.

### 2. *Adobe Illustrator CS3*

Elaboración del perfil bidimensional de la vasija con vectores considerando la información morfológica y morfométrica obtenida durante el remontaje de tiosos.

### 3. *Rhinoceros 4.0*

Modelado tridimensional y renderizado a través de la implementación de NURBS (datos matemáticos que permiten la generación de curvas y superficies. Estos fueron: altura, diámetro y espesor de la pieza cerámica).



43

Carosio, S. A., Aguilar, J. P., & Bárcena, J. R. (2013). *Recipientes 3D en su estado final. Escala 5cm* [Fotografía]. Recuperado de [https://www.academia.edu/6322395/Reconstrucción\\_3D\\_y\\_cálculo\\_volumétrico\\_de\\_recipientes\\_cerámicos.\\_Alcances\\_y\\_limitaciones\\_para\\_el\\_estudio\\_y\\_conservación\\_cerámica\\_de\\_la\\_Tambería\\_de\\_Guandacol\\_Provincia\\_de\\_La\\_Rioja\\_](https://www.academia.edu/6322395/Reconstrucción_3D_y_cálculo_volumétrico_de_recipientes_cerámicos._Alcances_y_limitaciones_para_el_estudio_y_conservación_cerámica_de_la_Tambería_de_Guandacol_Provincia_de_La_Rioja_)

**CÁLCULO VOLUMÉTRICO**

Una vez finalizado el modelo tridimensional, se realizó el cálculo volumétrico de las vasijas con el programa *Matrix Laboratory (METLAB)* implementando los dibujos bidimensionales de los perfiles obtenidos durante el proceso de reconstrucción tridimensional; así como, las medidas adquiridas durante el registro de las vasijas.

Los datos obtenidos durante el cálculo volumétrico correspondieron a:

1. Capacidad total del recipiente.
2. Capacidad efectiva del recipiente (tomando como referencia el inicio del cuello o el punto de inflexión de la vasija).
3. Grosor de las paredes del recipiente.

## COMPARACIÓN METODOLÓGICA DE TECNOLOGÍA TRIDIMENSIONAL APLICADA A PROYECTOS ARQUEOLÓGICOS

Los datos obtenidos a través de las síntesis metodológicas, se presentan mediante tres tablas que proporcionan el panorama general de la información adquirida. De esta manera, se integran y vinculan los resultados de las diversas experiencias, mediante rubros que identifican características representativas; así como, la secuencia del procedimiento aplicado para la reconstrucción tridimensional de cada investigación.

La lectura de las tablas debe ser ejecutada de izquierda a derecha. De esta manera, se visualiza el número de la metodología; así como, su respectivo nombre para el posterior desglose de:

1. Resumen de contenido.
2. Objeto de estudio; es decir, pieza en la que se llevó a cabo el proceso de digitalización tridimensional.
3. Enumeración de pasos ejecutados para la construcción de la metodología.
4. Producto final obtenido.

**METODOLOGÍA 1 | GUÍA BÁSICA PARA MODELADO EN 3D DE OBJETOS CERÁMICOS ARQUEOLÓGICOS COMPLETOS Y FRAGMENTADOS**

CONTENIDO	OBJETO DE ESTUDIO	MÉTODOS / TÉCNICAS	RESULTADOS
Procesos para la reconstrucción parcial o total de piezas cerámicas y asimétricos, fragmentados. a través de métodos 2D y 3D.	Artefactos cerámicos, simétricos y asimétricos, fragmentados.	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Categorización de los objetos.</li> <li>2. Fotografía de los fragmentos u objetos.</li> <li>3. Dibujo arqueológico bidimensional para la reconstrucción del perfil del objeto.</li> <li>4. Reconstrucción del perfil.</li> <li>5. Reconstrucción de la decoración.</li> <li>6. Reconstrucción del objeto en 3D (imagen).</li> <li>7. Aplicación de color al modelo obtenido.</li> </ol>	Modelo digital (renderizado).

**METODOLOGÍA 2 | RECONSTRUCCIÓN VIRTUAL. UN APOORTE A LA ARQUEOLOGÍA EN TRES DIMENSIONES**

CONTENIDO	OBJETO DE ESTUDIO	MÉTODOS / TÉCNICAS	RESULTADOS
Descripción de dos casos en los que se implementa la reconstrucción virtual tridimensional en vasijas de cerámica (Las Marías y Santa Coloma Buenos Aires, Argentina).	Vasijas de cerámica divididas.	<p><b>PRIMER CASO</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Categorización de las piezas.</li> <li>2. Remontaje de las piezas.</li> <li>3. Remontaje total de las piezas mediante reconstrucción virtual (Remontaje / Dibujo del perfil / Elaboración de imagen vectorial).</li> </ol> <p><b>SEGUNDO CASO</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Agrupación de piezas.</li> <li>2. Aproximación de uso de las piezas.</li> <li>3. Selección de la pieza o fragmento a trabajar.</li> <li>4. Reconstrucción tridimensional.</li> </ol>	Modelo digital (renderizado).

## TABLA DOS | COMPARACIÓN METODOLÓGICA DE TECNOLOGÍA TRIDIMENSIONAL APLICADA A PROYECTOS ARQUEOLÓGICOS

### METODOLOGÍA 3 | ESCANEADO EN 3D Y PROTOTIPADO DE PIEZAS ARQUEOLÓGICAS. LAS NUEVAS TECNOLOGÍAS EN EL REGISTRO, CONSERVACIÓN Y DIFUSIÓN DEL PATRIMONIO ARQUEOLÓGICO

CONTENIDO	OBJETO DE ESTUDIO	MÉTODOS / TÉCNICAS	RESULTADOS
Implementación de las Nuevas Tecnologías para el registro, la conservación y difusión del Patrimonio Arqueológico mediante el uso de herramientas para la captura y procesamiento de datos tridimensionales (escáner 3D e impresora 3D).	Hebilla de hierro y bronce (completa).	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Descripción de la pieza a escanear.</li> <li>2. Presentación de la herramienta de trabajo para la captura de datos tridimensionales (escáner 3D).</li> <li>3. Proceso de escaneado (Preparación del escáner; así como, de la pieza a escanear / Captura y procesamiento de datos).</li> <li>4. Aplicación de color.</li> <li>5. Impresión.</li> </ol>	Modelo digital e impresión 3D.

### METODOLOGÍA 4 | ESTUDIO GEOMÉTRICO DE PIEZAS ARQUEOLÓGICAS A PARTIR DE UN MODELO VIRTUAL 3D

CONTENIDO	OBJETO DE ESTUDIO	MÉTODOS / TÉCNICAS	RESULTADOS
Estudios geométricos aplicados a piezas arqueológicas de pequeño formato mediante un modelo virtual tridimensional. El cual, es obtenido mediante técnicas de captura con escáner láser.	Ídolo femenino antropomorfo tallado en un hueso de animal.	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Escaneado tridimensional (Descripción de la pieza a escanear / Descripción del escáner tridimensional / Proceso de escaneo digital).</li> <li>2. Modelado.</li> </ol>	Modelo digital (renderizado).

## TABLA TRES I COMPARACIÓN METODOLÓGICA DE TECNOLOGÍA TRIDIMENSIONAL APLICADA A PROYECTOS ARQUEOLÓGICOS

### METODOLOGÍA 5 I RECONSTRUCCIÓN DIGITAL DE OBJETOS ARQUEOLÓGICOS

CONTENIDO	OBJETO DE ESTUDIO	MÉTODOS / TÉCNICAS	RESULTADOS
Estudio en el que se implementa la reconstrucción tridimensional de piezas arqueológicas mediante la adquisición de datos con luz estructurada.	Vasijas de cerámica completas y fragmentadas.	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Adquisición de datos.</li> <li>2. Filtrado de vistas y registro.</li> <li>3. Fusión y corrección de huecos.</li> <li>4. Texturizado.</li> </ol>	Modelo digital (renderizado).

### METODOLOGÍA 6 I RECONSTRUCCIÓN 3D Y CÁLCULO VOLUMÉTRICO DE RECIPIENTES CERÁMICOS. ALCANCES Y LIMITACIONES PARA EL ESTUDIO Y CONSERVACIÓN CERÁMICA DE LA TAMBERIA DE GUANDACOL (PROVINCIA DE LA RIOJA)

CONTENIDO	OBJETO DE ESTUDIO	MÉTODOS / TÉCNICAS	RESULTADOS
Proceso experimental de reconstrucción 3D y cálculo volumétrico de piezas cerámicas divididas.	Piezas cerámicas divididas.	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Catalogación y agrupación de las piezas.</li> <li>2. Registro de medidas.</li> <li>3. Remontaje de tiosos.</li> <li>4. Registro fotográfico y reconstrucción virtual tridimensional de las piezas seleccionadas.</li> <li>5. Cálculo volumétrico.</li> </ol>	Modelo digital (renderizado).

## ASPECTOS GENERALES

---

El objetivo de cada proyecto consistió en la restauración de piezas arqueológicas a través de métodos que respondían al objeto de estudio elegido; así como, a las herramientas de captura de datos y modelado con las que contaba cada institución.

Los pasos recurrentes identificados durante la comparativa de las metodologías incluyen: clasificación y remontaje de fragmentos, fotografía o escaneo tridimensional de las piezas, digitalización de los datos obtenidos (dibujo bidimensional y modelado tridimensional) y renderizado o impresión por fabricación aditiva.

Por otra parte, de las seis metodologías recopiladas, solo una concluyó el proyecto con la impresión tridimensional del modelo elaborado; lo cual, es un indicador de la necesidad de implementar este proceso en las nuevas metodologías para enriquecer los procesos de restauración y preservación de las piezas arqueológicas.

# 04

---

## **METODOLOGÍA PARA LA CAPTURA, RECONSTRUCCIÓN Y REPRODUCCIÓN TRIDIMENSIONAL DE UNA VASIJA DE BARRO**



## INTRODUCCIÓN

El presente capítulo, expone el desarrollo de una metodología diseñada para la reconstrucción tridimensional, digital y física, de piezas arqueológicas de pequeño formato fragmentadas, pertenecientes a la ceramoteca del Instituto Nacional de Antropología e Historia en el Estado de Puebla.

Asimismo, este corresponde a la pertinencia de la conservación, preservación y difusión del patrimonio cultural a través de la gestión cultural por implementación de la tecnología tridimensional para la conformación de material digital.

De esta manera, se busca apoyar los procesos de restauración manuales implementados por el instituto, a través de la aplicación de herramientas y técnicas digitales que permiten la agilización de la reconstrucción, la minimización de la manipulación e intervención sobre las piezas arqueológicas no restauradas.

Así, la implementación de la reconstrucción digital e impresión tridimensional de los bienes arqueológicos, contribuirá tanto a su preservación como a su difusión a través de las exhibiciones organizadas por la institución. Así como, a la conformación de un acervo digital que permita tanto la consulta, para generaciones actuales y futuras, como la recuperación de las piezas digitalizadas en caso de pérdida por siniestro.

Por otra parte, los pasos planteados en la metodología, parten del análisis de los métodos estudiados en el capítulo anterior; es decir, de la identificación tanto de los procedimientos esenciales como de la información ausente y necesaria para la optimización de los procesos referentes a la captura de datos, modelado e impresión tridimensional.

Como resultado, se presenta una secuencia de información detallada que explica el procedimiento para la ejecución de pruebas y empleo de las herramientas digitales; así como, del manejo de sus respectivas interfaces.

## PROCESO EXPERIMENTAL

Aunque la construcción de la metodología partió de la identificación y análisis de las fases más recurrentes para la captura de datos y construcción de modelos digitales tridimensionales, presentadas en investigaciones previas, también se implementó el método empírico-deductivo para el desarrollo de pasos más enriquecidos e integrados para la constitución de modelos tridimensionales, digitales y físicos, a través de los procesos de observación y experiencia.

De esta manera el proceso experimental llevado a cabo para la construcción final de la metodología, se aplicó en las etapas de:

1. Escaneado tridimensional.
2. Selección y limpieza de capturas de datos tridimensionales.
3. Reconstrucción digital en software de modelado tridimensional.

### 4.1.1

### ESCANEADO TRIDIMENSIONAL

Para la ejecución del proceso de escaneado tridimensional, se llevaron a cabo tres pruebas con tres vasijas diferentes de barro cocido que se caracterizaban por presentar una estructura:

1. Completa.
2. Fragmentada en dos partes.
3. Fragmentada en múltiples partes.

Dichas pruebas, tuvieron como propósito:

1. Establecer la distancia pertinente entre el escáner tridimensional y la pieza a escanear.
2. Determinar que elemento debía de ser desplazado durante el proceso de escaneado para obtener las capturas de datos; es decir, si el escáner tridimensional o la pieza a escanear debía moverse o quedarse fijas.
3. Identificar las condiciones de iluminación óptimas para la proyección de luces y sombras en la estructura de la pieza a escanear.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos durante la ejecución de las pruebas de cada vasija.

**PRIMERA PRUEBA****Pieza en movimiento con escáner fijo**

Los resultados obtenidos en esta prueba no fueron idóneos debido a:

1. La falta de una base giratoria mecanizada que proporcionara una rotación constante de la vasija; ya que, al emplear la mano como medio soporte, se obstaculizaba la captura fiel de la estructura.
2. Las condiciones de iluminación del espacio de trabajo que interferían en el cambio de luces y sombras de la vasija provocando su captura incompleta.

**SEGUNDA PRUEBA****Pieza fija con escáner en movimiento**

Los resultados de esta prueba reflejaron una visualización casi completa de la estructura. Esto se debió a:

1. El cambio de iluminación (cenital y frontal).
2. La captura por secciones de la estructura de la vasija. Inicialmente se escaneó la boca, la parte superior de la vasija y el cuerpo. Posteriormente, se detuvo el proceso para reposicionar la vasija y capturar su base.



*Circuito de movimiento (derecha a izquierda)  
del escáner con la vasija fija [Fotografía].*

Al finalizar estas pruebas se identificó que la opción que permitía la obtención de capturas digitales con un porcentaje de información más completo, sobre la pieza a escanear, correspondía a la segunda prueba; es decir, mantener la pieza fija y el escáner en movimiento alrededor de la misma.

Establecidos los parámetros para la captura de datos tridimensionales, se procedió a realizar la toma de las vasijas fragmentadas en dos y en múltiples partes con el propósito de identificar cuál pieza permitía una obtención de datos más precisa respecto a los detalles de la misma.

#### 4.1.1.2

### PRUEBA DOS: VASIJA FRAGMENTADA EN DOS PARTES

#### Pieza fija con escáner en movimiento

La primera captura de datos, se llevó a cabo escaneando cada una de las partes fragmentadas de manera individual partiendo de su exterior a su interior.

La segunda captura de datos, se realizó escaneando las partes fragmentadas de manera conjunta buscando que un fragmento mostrara el exterior y otro el interior.



46

*Boca (vasija fragmentada en dos partes) [Fotografía].*

47

*Cuerpo (vasija fragmentada en dos partes) [Fotografía].*

**Pieza fija con escáner en movimiento**

La adquisición de datos comenzó con el escaneo de las piezas grandes a las pequeñas (50-55). Sin embargo, las piezas pequeñas fueron detectadas con menor precisión en cuanto a sus detalles.

**48***Interior de los tiestos de la vasija [Fotografía].***49***Exterior de los tiestos de la vasija [Fotografía].*

En la página siguiente, se muestra del proceso de escaneo tridimensional llevado a cabo en la vasija fragmentada en múltiples partes



50



51



52



53



54



55

*Proceso de escaneado de la vasija fragmentada en múltiples partes [Fotografía].*

Concluidas las pruebas de escaneo, se decidieron emplear las capturas de datos obtenidas de la vasija fragmentada en dos partes.

#### 4.1.2

### SELECCIÓN Y LIMPIEZA DE CAPTURAS DE DATOS TRIDIMENSIONALES

Una vez conseguidas las capturas de datos tridimensionales concernientes a la pieza, se procedió a la selección y limpieza de las mismas; ya que, estas presentaban elementos ajenos al modelo original. Para este propósito, se implementó el software de captura, lectura y procesamiento de datos tridimensionales, *Artec 3D Scan*.

Para la ejecución del proceso de limpieza, se realizó una práctica previa en una captura de prueba con las herramientas proporcionadas por el programa; ya que, era necesario ensayar y comprender su funcionamiento para lograr un flujo de trabajo más optimizado en las capturas finales seleccionadas para la construcción del modelo tridimensional digital.

#### 4.1.3

### RECONSTRUCCIÓN DIGITAL EN SOFTWARE DE MODELADO 3D

Finalmente, para llevar a cabo la construcción del modelo tridimensional; así como, la unión de las piezas obtenidas en las capturas digitales, se empleó el software de modelado tridimensional *ZBrush* en su versión 2019.

Aunque ya se contaba con experiencia previa en el manejo de las herramientas del programa, se consultaron documentos digitales; así como, videos provenientes del sitio web de la compañía para la resolución de procesos relacionados con:

1. Aplicación del grosor al modelo tridimensional.
2. Adición de texturizado al modelo tridimensional.
3. Preparación del archivo para su exportación a formato de impresión.

## 4.2 DIAGRAMA DE FLUJO

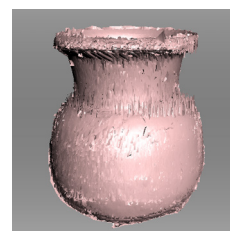
METODOLOGÍA PARA LA CAPTURA, RECONSTRUCCIÓN Y REPRODUCCIÓN TRIDIMENSIONAL DE UNA VASIJA DE BARRO

### 02 TOMA FOTOGRÁFICA DE LAS PIEZAS



### 04 SELECCIÓN Y LIMPIEZA DE ESCaneo 3D

1. Selección.
2. Limpieza.
  1. Selección de la goma.
  2. Selección de las áreas no deseadas.
  3. Eliminación de las áreas seleccionadas.

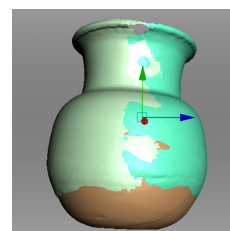


### 01 ELECCIÓN DE LAS PIEZAS



### 03 ESCaneo 3D

1. Procedimiento del escaneo.
  1. Preparación de las piezas.
  2. Conexión e inicio del programa.
  3. Escaneo de las piezas.
    - Pruebas de escaneo.

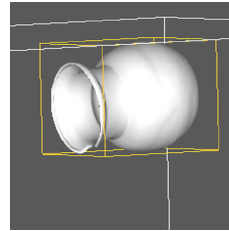


### 05 RECONSTRUCCIÓN DE LA PIEZA EN 3D

1. Duplicado de piezas.
2. Fusión de las piezas.
  1. Registro de las partes escaneadas.
  2. Limpieza del registro.
  3. Fusión.
  4. Cierre de huecos.
  5. Optimización del modelo.
  6. Exportación del modelo.

## 08 IMPRESIÓN 3D

1. Conexión computadora-impresora.
2. Preparación de la plataforma de impresión.
3. Importación del modelo a imprimir.
4. Rotación del modelo a imprimir.
5. Visualización del tiempo y la cantidad de material.
6. Impresión.
7. Postimpresión.



## 10 RESULTADOS



## 06 CORRECCIÓN Y OPTIMIZACIÓN DEL MODELO 3D

1. Corrección del modelo.
  1. Selección del modelo exportado.
  2. Generación de grosor del modelo.
  3. Retoque del modelo.
    - Suavizado.
    - Movimiento.



## 09 ACABADOS



## 07 TEXTURIZADO

1. Visualización del modelo bidimensional.
2. Duplicado del modelo.
3. Visualización y optimización de cortes.
4. Aplicación de color y textura.
  1. Opacidad y escalado.
  2. Proyección, texturizado y pintado del modelo.
  3. Adición de texturizado y pintado al UV Map.
  4. Exportación del modelo

## ELECCIÓN DE LAS PIEZAS

El desarrollo de esta metodología, tenía como objetivo trabajar directamente con una pieza original de la Ceramoteca del INAH Puebla; sin embargo, debido al protocolo de resguardo, salida y manipulación de los vestigios, se decidió trabajar con un objeto cerámico que emulara las características físicas de estos.

Se adquirieron tres vasijas de barro cocido para realizar pruebas de fragmentación, con el propósito de emular el estado físico de un vestigio que requiere restauración. Estas consistieron en la conservación íntegra de una pieza y la fractura en dos y múltiples partes de las dos últimas.

En cuanto a las características morfométricas de las vasijas empleadas para las pruebas, estas correspondieron a:

1. Altura: 16.6 cm
2. Diámetro de boca: 13 cm
3. Diámetro de cuerpo: 13.5 cm
4. Diámetro de base: 6.5 cm
5. Grosor: 0.75 cm



56  
57  
58

*Boca, base y cuerpo de la vasija [Fotografía].*

## 4.4

### TOMA FOTOGRÁFICA DE LAS PIEZAS

Para tener una referencia del estado de las piezas, durante el transcurso de captura de datos, se procedió a su toma fotográfica.

Las fotografías se realizaron con la cámara semiprofesional *Canon Rebel T3*; ya que, el empleo de esta genera archivos que minimizan la posibilidad de distorsión del contenido permitiendo su incorporación como texturas en el modelo tridimensional.

## 4.5

### ESCANEEO 3D

Posterior a la toma fotográfica, se ejecutaron las pruebas de captura de datos tridimensionales con el escáner profesional *Artec EVA*. Por otra parte para la captura, visualización y limpieza de los datos obtenidos se empleó el software *Artec 3D Scan* en el sistema operativo *Windows*.

#### 4.5.1

#### PROCEDIMIENTO DEL ESCANEEO

De manera general, el procedimiento para la ejecución del escaneo de las piezas consistió en:

##### 4.5.1.1

#### PREPARACIÓN DE LAS PIEZAS

Las piezas a escanear se colocaron en una superficie plana; ya que, esta les proporcionó una mejor estabilidad para la obtención óptima de datos.

##### 4.5.1.2

#### CONEXIÓN E INICIO DEL PROGRAMA

Una vez conectado el escáner al ordenador, se inició el programa y se seleccionó la opción **Nuevo Proyecto**.

##### 4.5.1.3

#### ESCANEEO DE LAS PIEZAS

Al activar el escáner, se proyectó la imagen digital de las piezas en la interfaz, se estableció y fijó una distancia conveniente, entre estas y el escáner, que permitiera su visualización por completo y se procedió al registro de su forma para la obtención de su nube de puntos.

##### 4.5.1.3.1

#### PRUEBAS DE ESCANEEO

Los escaneos fueron realizados hasta que se obtuvieron tomas que mostraron nítidamente la forma de la vasija con las proporciones adecuadas de cada sección; así como, el detalle de su acabado.

Es importante señalar que el material de las vasijas no implicó inconveniente alguno para la realización del proceso de escaneo; ya que, este no presentaba una superficie reflejante que pudiera ocasionar un error en la captura de datos.

Al finalizar las pruebas de escaneo, como se mencionó en el proceso experimental, se decidieron emplear los datos adquiridos de la vasija fragmentada en dos partes para continuar el desarrollo del proceso de reconstrucción tridimensional.

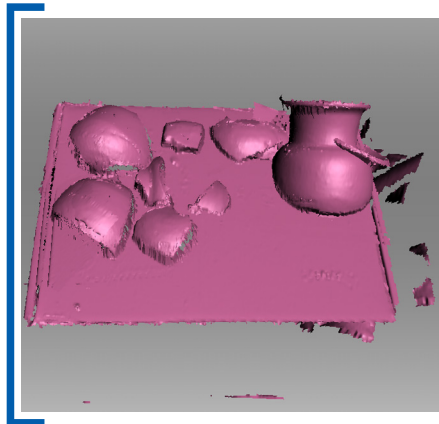
## 4.6

## SELECCIÓN Y LIMPIEZA DE ESCANEO 3D

### 4.6.1

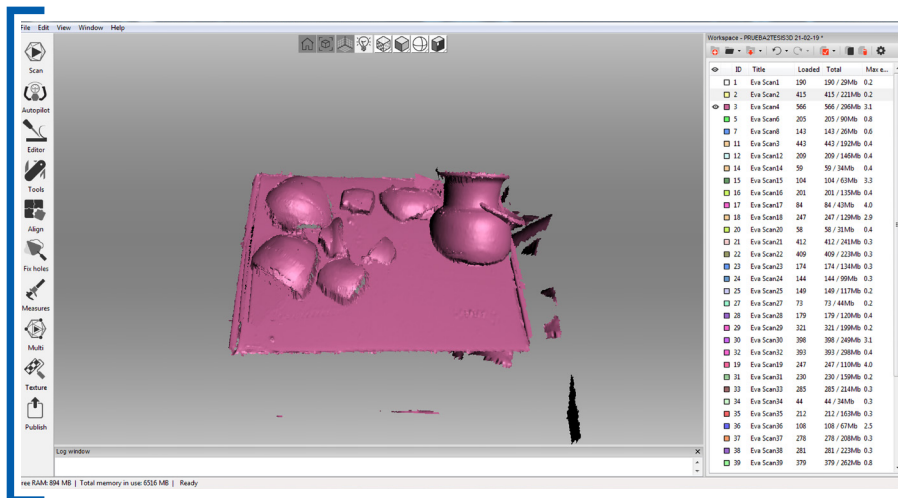
### SELECCIÓN

Una vez que se obtuvieron las tomas de la vasija, se procedió a seleccionar las mejores tomando en consideración que no presentaran superposición de elementos; es decir, que dos o más piezas estuvieran encimadas.



59

*Captura de datos tridimensionales correspondientes a la estructura de la vasija [Captura de pantalla].*



## 4.6.2

## LIMPIEZA

Posterior a la selección de las tomas, se realizó la limpieza de las mismas implementando la herramienta **Eraser** (*Editor >> Eraser*); ya que, esta tiene como función eliminar las partes de un escaneo individual. Los pasos para su implementación consistieron en:

### 4.6.2.1

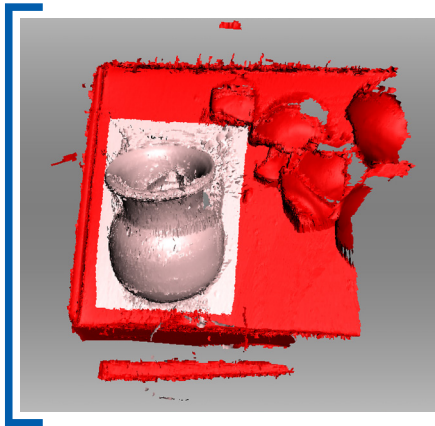
#### SELECCIÓN DE LA GOMA

El proceso comenzó al activar la función **Eraser** (*ctrl + clic izquierdo*) eligiendo el modo 2D; puesto que, este permite seleccionar las superficies planas ajenas a la pieza escaneada.

### 4.6.2.2

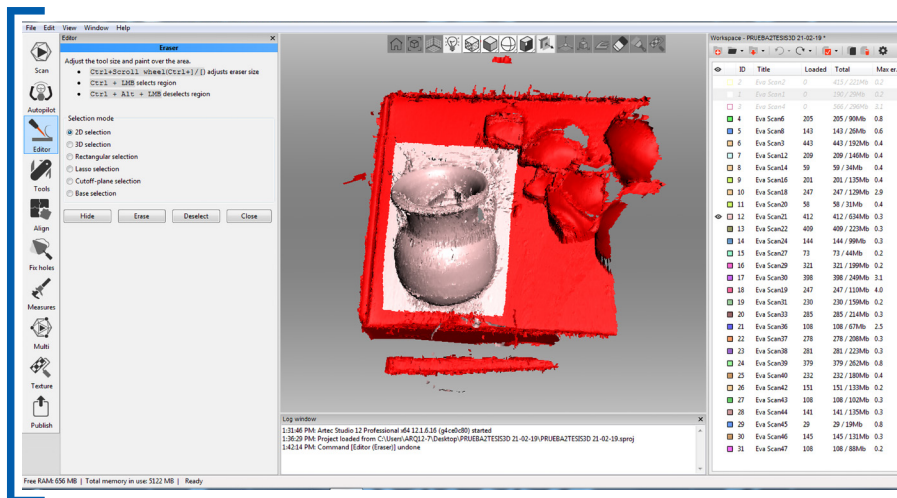
#### SELECCIÓN DE LAS ÁREAS NO DESEADAS

Para la elección de las áreas a eliminar, se aumentó y minimizó el tamaño del puntero de acuerdo a las dimensiones de estas (*ctrl + desplazamiento*). Por otra parte, para la visualización de las áreas ocultas, se rotó la pieza (*clic derecho fuera de la escena + desplazamiento*) hasta obtener la posición requerida.



60

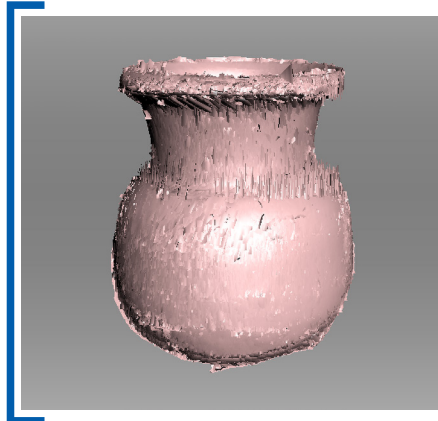
*Selección y eliminación de las áreas no deseadas procedentes del escaneo tridimensional [Captura de pantalla].*



### 4.6.2.3

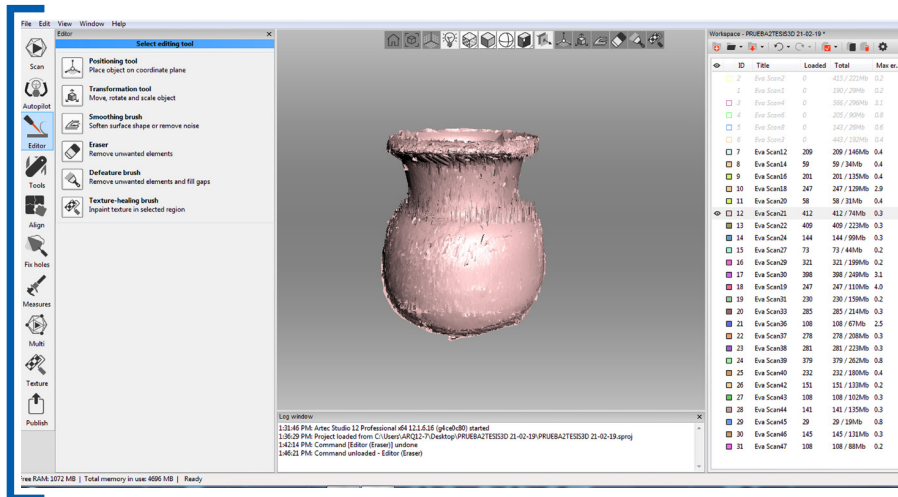
## ELIMINACIÓN DE LAS ÁREAS SELECCIONADAS

Una vez que se terminó la selección de las áreas no deseadas, se procedió a su eliminación ( *clic Erase*) y se concluyó el proceso ( *clic Close*).



61

*Escaneado tridimensional limpio*  
[Captura de pantalla].



## RECONSTRUCCIÓN DE LA PIEZA EN 3D

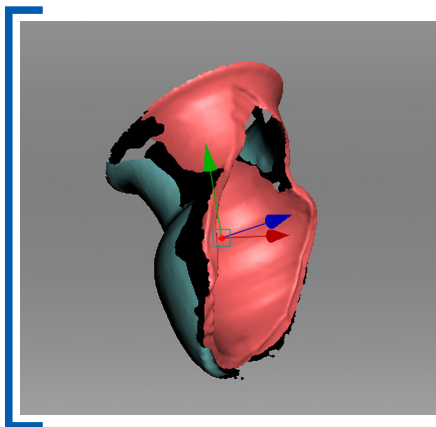
Una vez que se finalizó el proceso de limpieza del escaneo, se procedió a la construcción del modelo de la vasija juntando las piezas individuales.

### 4.7.1

#### DUPLICADO DE PIEZAS

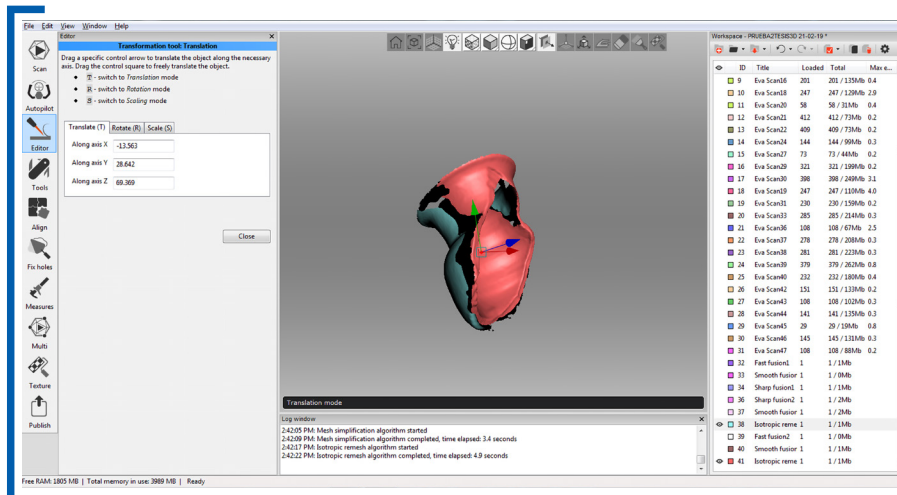
En primer lugar, de la lista que muestra los escaneos, se dejó visible una de las mitades de la vasija.

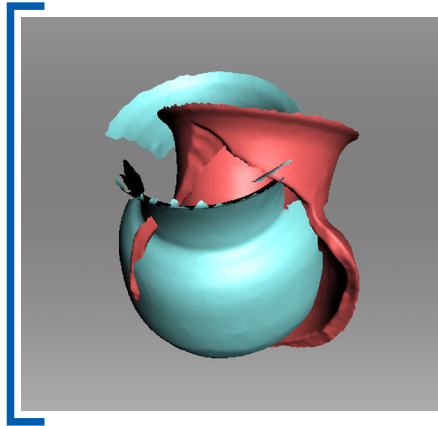
Posteriormente, esta se duplicó posicionando el puntero sobre su nombre (**clic derecho + Duplicate**) dando como resultado una copia fidedigna de la pieza en la misma posición (**62**); por lo cual, se procedió a rotarla (**Editor >> Transformation tool**) ocultando el duplicado e invirtiendo la posición de la pieza visible (**clic sobre el Gizmo en el eje a rotar**) (**63**).



62

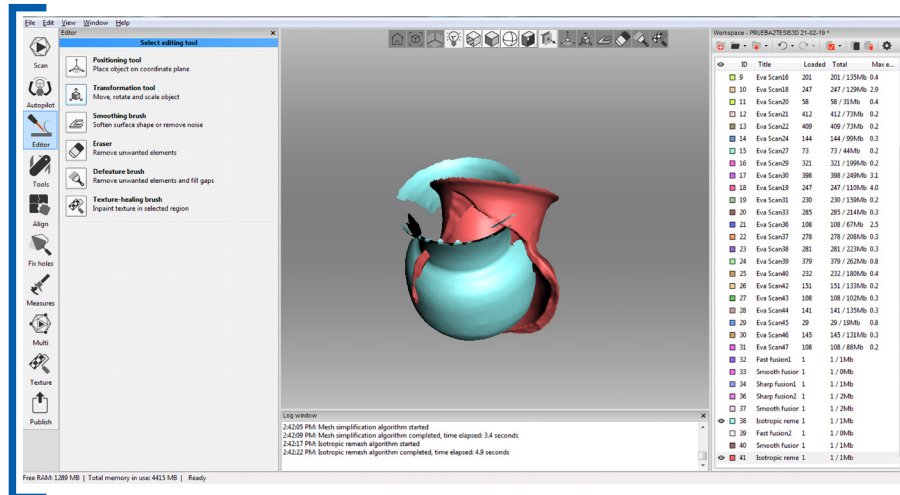
Duplicado de la mitad del cuerpo de la vasija [Captura de pantalla].



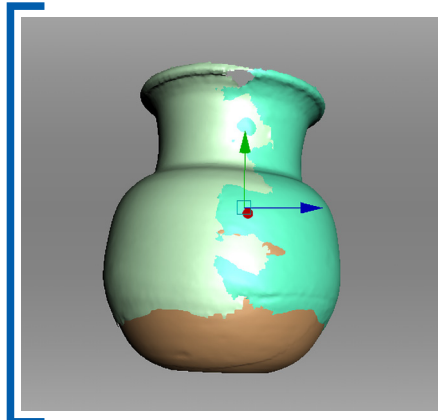


63

Rotación de la mitad del cuerpo de la vasija para conformar la estructura total de la misma [Captura de pantalla].

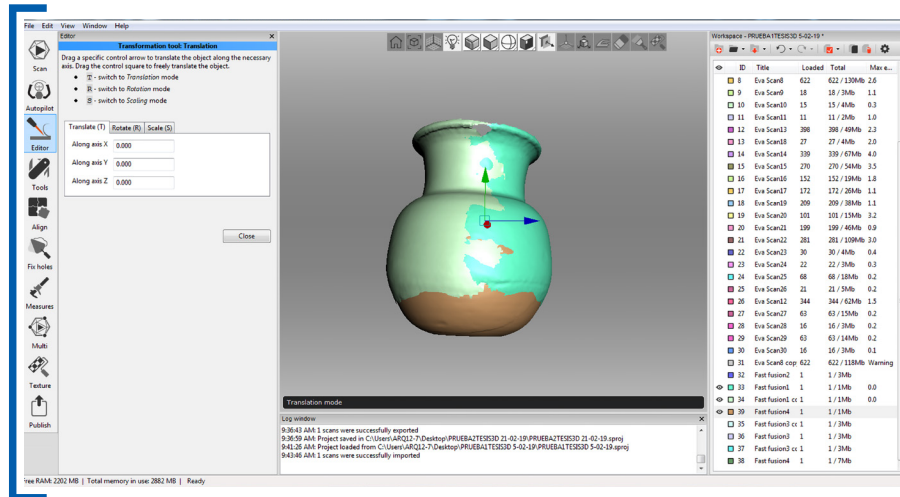


Una vez concluido este proceso, se puso visible la pieza oculta para comprobar que ambas partes coincidieran; acercándolas (*Translate*) hasta que se conformara completamente la estructura de la vasija (64).



64

Conformación del cuerpo de la vasija [Captura de pantalla].



## 4.7.2

### FUSIÓN DE LAS PIEZAS

Después del duplicado de la pieza, se procedió a su fusión implementando el modo manual de **Tools**; ya que, este permite un mejor control de los ajustes.

Este proceso se dividió en tres pasos:

#### 4.7.2.1

#### REGISTRO DE LAS PARTES ESCANEADAS

Durante esta etapa, se generó el registro de cada pieza escaneada (*Registration >> Apply >> Global Registration*) y se eliminaron los elementos ajenos a la misma.

Este paso fue aplicado para poder ejecutar las opciones que complementan el proceso.

#### 4.7.2.2

#### LIMPIEZA DEL REGISTRO

Posterior al registro de las piezas, se removieron los fragmentos de menor escala (*Fusión >> Outlier removal*) no pertenecientes a la estructura que se encontraban esparcidos en la escena.

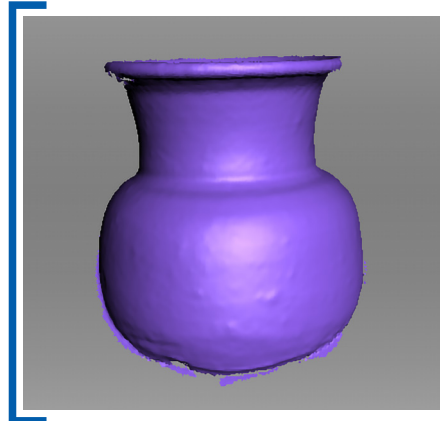
#### 4.7.2.3

#### FUSIÓN

Para proceder a la fusión de los elementos y crear un objeto sólido, se aplicaron los tres modos de fusión que ofrece el programa con el propósito de seleccionar el acabado más adecuado para la pieza. Los métodos aplicados fueron: **Fast fusion**, **Smooth fusion** y **Sharp fusion**.

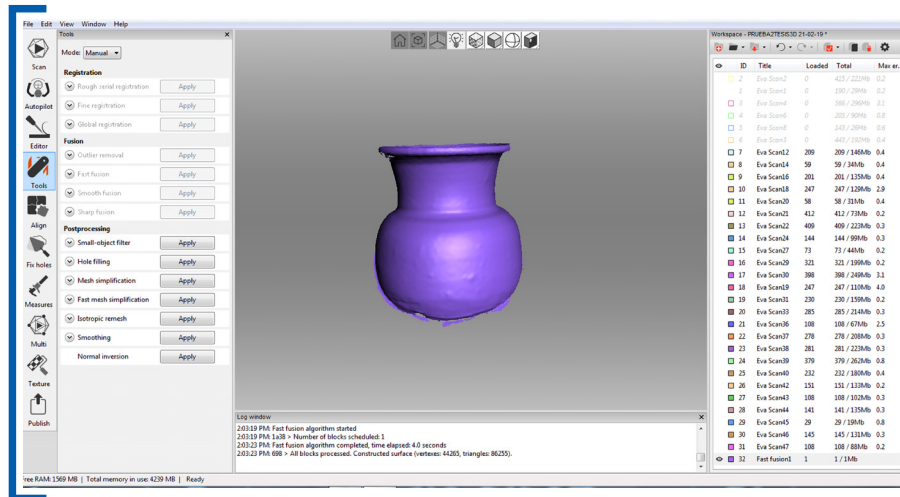
## 1. Fast fusion

Crea una fusión de los elementos de manera rápida sin cuidar mucho el detalle; ya que, deja huecos en la estructura de la pieza (65).



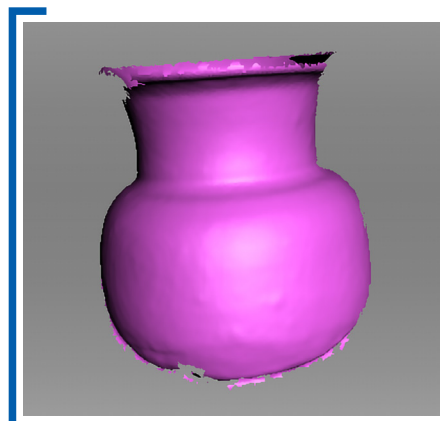
65

Aplicación del modo de fusión Fast fusion [Captura de pantalla].



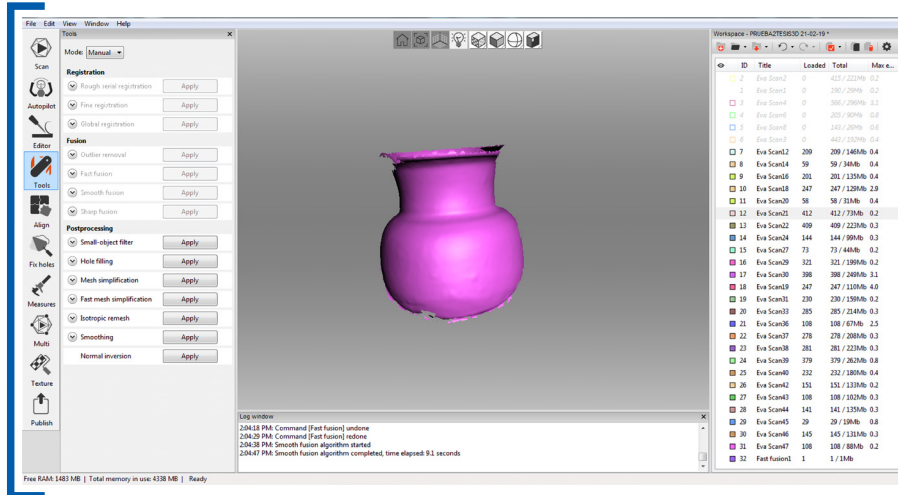
## 2. Smooth fusion

Genera un suavizado en cada cara del objeto perdiendo algunos detalles de la pieza original (66).



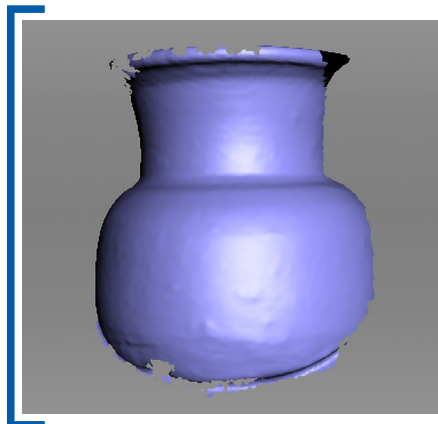
66

Aplicación del modo de fusión Smooth fusion [Captura de pantalla].



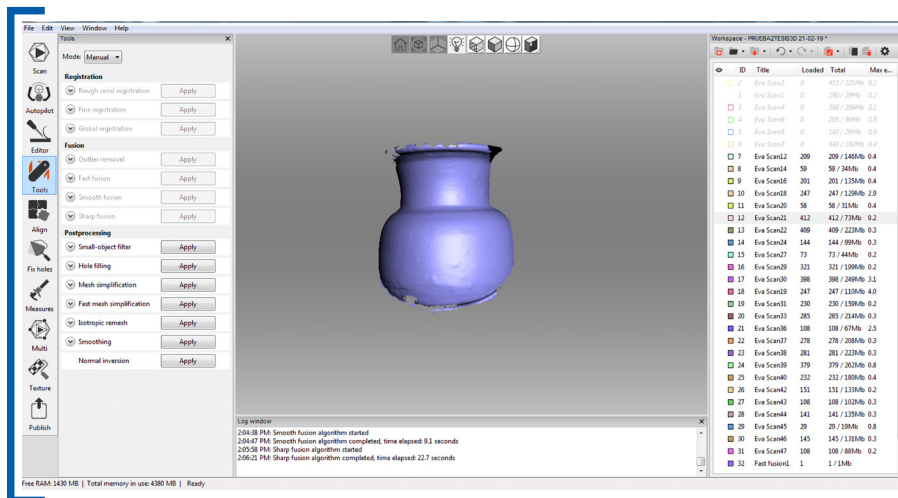
### 3. Sharp fusion

Pierde partes y provoca irregularidades, pero genera un acabado nítido (67).



67

Aplicación del modo de fusión Sharp fusion [Captura de pantalla].



Finalizadas las pruebas, se decidió aplicar el modo de fusión *Fast Fusion* con la configuración proporcionada por defecto; ya que, esta es suficiente para obtener buenos resultados. Asimismo, la aplicación de este proceso generó una copia del modelo ocultando los fragmentos.

#### 4.7.2.4

#### CIERRE DE HUECOS

Obtenida la fusión de las piezas, se ejecutó la reparación de los huecos que presentaba el modelo unido (*Fix Holes*) seleccionando cada uno de ellos de manera individual. Una vez que se contó con la selección completa, se procedió a su cierre (*Close Holes + Apply*).

#### 4.7.2.5

#### OPTIMIZACIÓN DEL MODELO

Los acabados del modelo en cuanto a su estructura, se mejoraron aplicando las funciones (*Tools >> Postprocessing*):

**1. *Small-object filter***

Filtra elementos sobrantes o alejados que aún queden del modelo.

**2. *Hole filling***

Cierra huecos de la malla que le da forma al objeto.

**3. *Mesh simplification***

Simplifica la cantidad de polígonos que conforman al modelo sin perder forma ni detalles para generar un modelo menos complejo y un archivo ligero.

**4. *Fast mesh simplification***

Simplifica la cantidad de polígonos que conforman al modelo. Sin embargo, puede perder la forma y los detalles de la estructura.

**5. *Isotropic remesh***

Reestructura la malla en triangulaciones.

**6. *Smoothing***

Suaviza la malla.

**7. *Normal inversion***

Invierte la orientación de las normales que se encuentran mal posicionadas para la correcta interpretación del modelo.

#### 4.7.2.6

#### 4.7.2.6 EXPORTACIÓN DEL MODELO

Por último el modelo se exportó al formato de lectura estándar *.stl* (*Menu >> File*) para asegurar su interpretación en cualquier programa de modelado 3D.

## CORRECCIÓN Y OPTIMIZACIÓN DEL MODELO 3D PARA SU IMPRESIÓN

A pesar de que se visualizó una forma definida de la vasija en el programa *Artec 3D Scan*, el modelo obtenido carecía del grosor necesario para proceder a su impresión. Por lo cual, se procedió a la optimización del modelo en el software *ZBrush 2019*.

### 4.8.1 CORRECCIÓN DEL MODELO

#### 4.8.1.1 SELECCIÓN DEL ARCHIVO EXPORTADO

Se importó el archivo (*Menu >> Zplugin >> 3D Print Hub >> Import STL File*) (68) para la visualización del modelo y proceder a su modificación (*Edit*) (69).

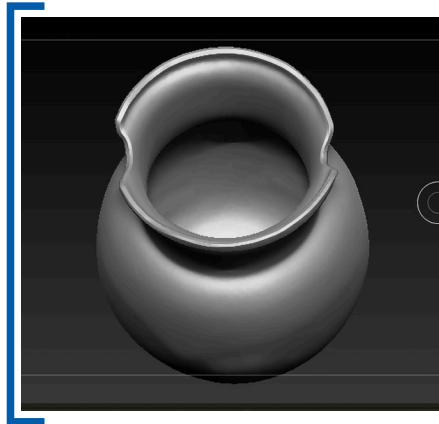


- 68 Importación del archivo del software
- 69 *Artec 3D Scan* a *ZBrush 2019*  
[Captura de pantalla].

#### 4.8.1.2

### GENERACIÓN DE GROSOR AL MODELO

El grosor del modelo (*Tool >> Geometry >> Edge Loop >> Panel Loops*) se ajusto entre los parámetros de 0.05 y 0.09 (*Thickness*) para evitar la deformación del mismo (70).



70

Generación del grosor al modelo tridimensional exportado [Captura de pantalla].



#### 4.8.1.3

### RETOQUE DEL MODELO

Una vez que se aplicó el grosor al modelo, se identificaron las partes que no presentaban coincidencia con la vasija implementando las herramientas de suavizado y movimiento.

##### 4.8.1.3.1

#### SUAIVIZADO

El suavizado se aplicó al cuerpo de la vasija (*Shift + clic izquierdo + desplazamiento*) modificando el tamaño del puntero (*tecla S*); así como, su intensidad de acuerdo a la superficie en donde se aplicaba (*ZIntensity*).

##### 4.8.1.3.2

#### MOVIMIENTO

El movimiento (*tecla B + M + V*) fue implementado para modificar las partes que se visualizaban incompletas o que presentaban incongruencias morfológicas con la vasija.

## 4.8.2

## OPTIMIZACIÓN DEL MODELO

Debido al generado del grosor; así como, a la aplicación del suavizado y el movimiento en el modelo, se produjeron modificaciones en la malla del mismo. Por lo que, esta se optimizó para poder proceder a la impresión.

### 4.8.2.1

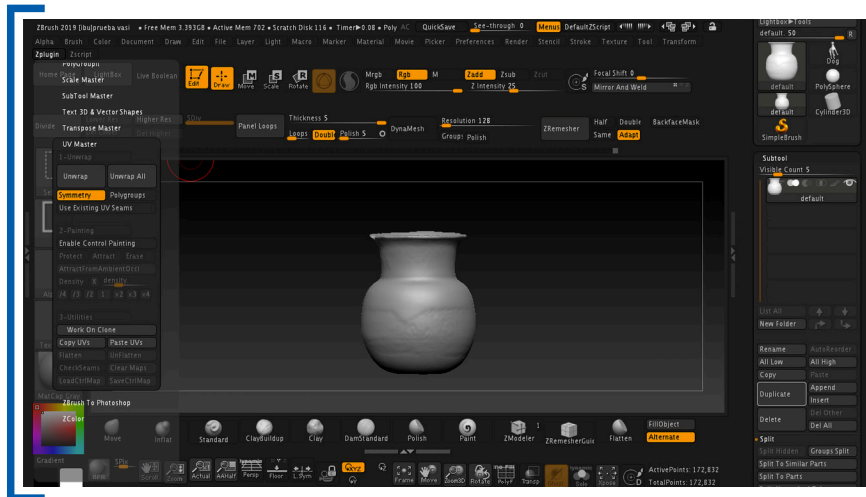
## DUPLICADO DEL MODELO

Primeramente, se realiza el duplicado de las piezas escaneadas (*Tool >> Subtool >> Duplicate*) ocultando alternadamente cada parte del objeto (71).



71

*Duplicación del modelo tridimensional del cuerpo de la vasija [Captura de pantalla].*



### 4.8.2.2

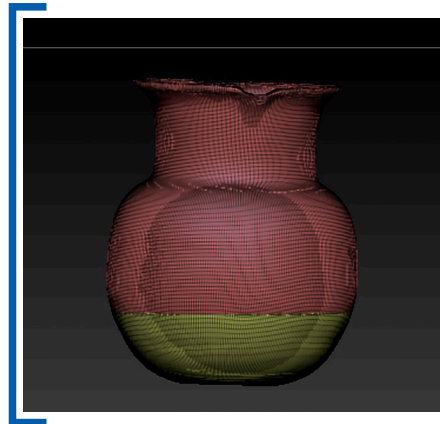
## SIMPLIFICACIÓN DE LA MALLA

Posterior al duplicado del modelo, se realizó la simplificación de la malla (*Tool >> Geometry >> ZRemesher*); la cual, impidió la pérdida de la estructura del modelo, pero descuidó detalles de textura (rugosidad) y deformó algunas partes del modelo que se recuperaron posteriormente.

### 4.8.2.3

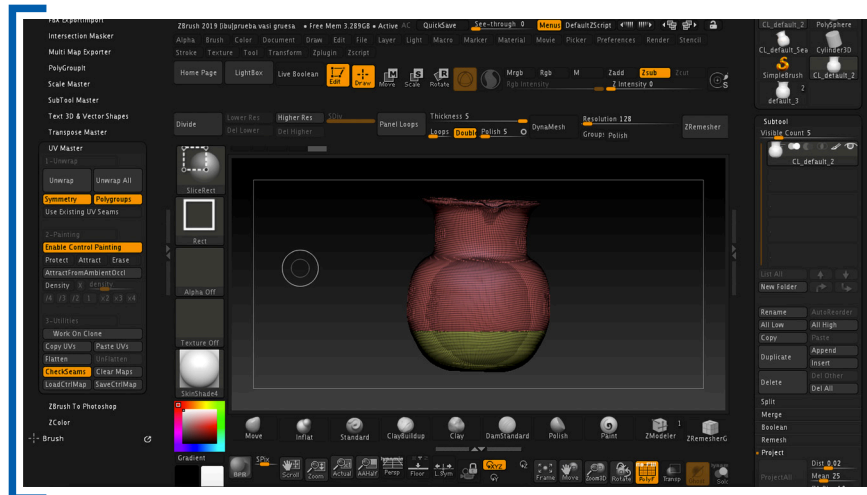
## SUBDIVISIÓN DEL MODELO

Una vez ejecutada la simplificación de la malla, se incrementó la resolución (*Tool >> Geometry >> Subdivision*) entre los niveles 3 y 4 del modelo para que se obtuviera un mejor acabado; es decir, se aumentaron la cantidad de polígonos en el modelo tridimensional (72).



72

*Incremento en la resolución del modelo tridimensional del cuerpo de la vasija [Captura de pantalla].*



### 4.8.2.4

## DETALLES

Aplicadas las subdivisiones al modelo, se proporcionaron los detalles perdidos durante el proceso. Esto se logró volviendo a poner visible el modelo original sobre el duplicado y activando sobre este último la proyección de detalles (*Project*).

Con la optimización del modelo, se procedió a la aplicación de color y texturizado implementando las tomas fotográficas previamente realizadas con el propósito de emular los acabados originales de la vasija.

#### 4.9.1

#### VISUALIZACIÓN DEL MODELO BIDIMENSIONAL

El proceso comenzó con la conversión del modelo tridimensional a uno bidimensional (*Menu >> ZPlugins >> UV Master >> UV Maps*) para obtener una plantilla de la estructura que permitiera colocar el color y la textura de la vasija.

#### 4.9.2

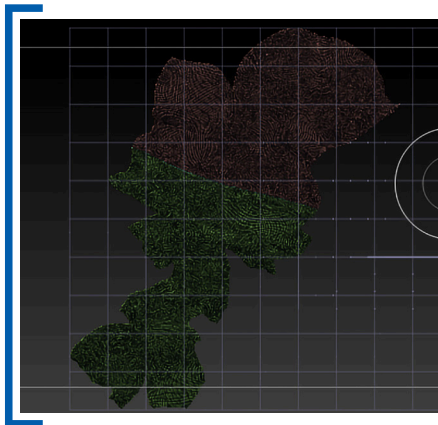
#### DUPLICADO DEL MODELO

Posteriormente, se duplicó el modelo (*Work on Clone*) en una menor resolución.

#### 4.9.3

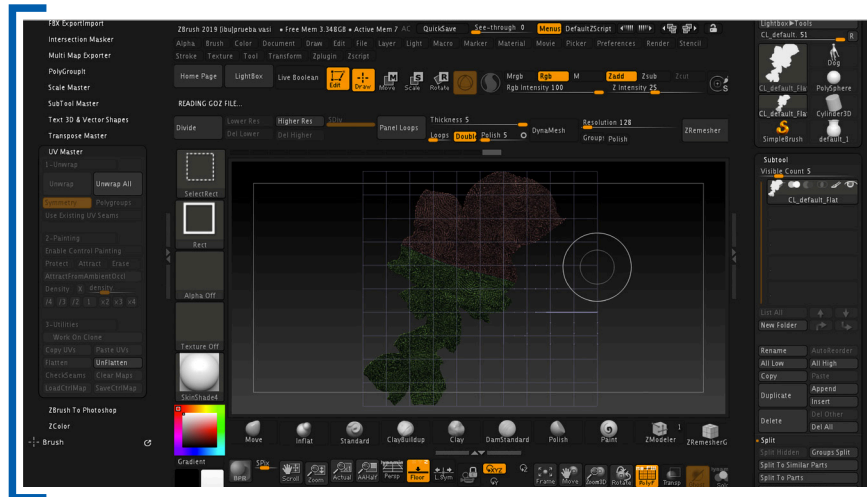
#### VISUALIZACIÓN Y OPTIMIZACIÓN DE CORTES

Una vez duplicado el modelo, se visualizaron sus cortes (*Check Seams*) (73). Sin embargo, se observó que estos no permitían la identificación de cada lado del modelo; por lo cual, con el propósito de optimizar la visualización del mismo, se implementaron las siguientes tres opciones (*UV Master >> Enable Control Painting*): **Protect**, **Attract**, **Erase**.



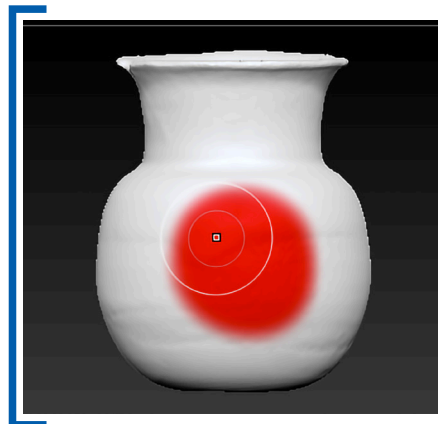
73

*Visualización bidimensional de los cortes del cuerpo de la vasija [Captura de pantalla].*



## 1. Protect

Permitió seleccionar las áreas que no requerían ser afectadas por el corte (74).



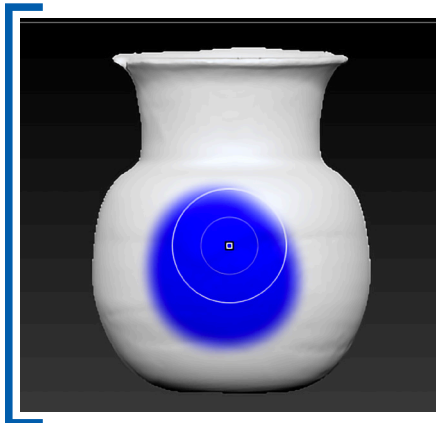
74

Aplicación de la herramienta Protect al modelo tridimensional [Captura de pantalla].



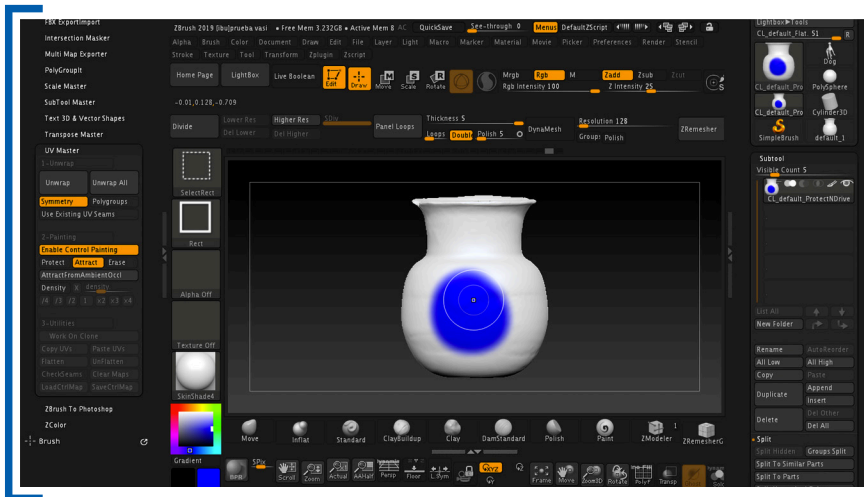
## 2. Attract

Facilitó la elección de las áreas donde se necesitaba realizar un corte (75).



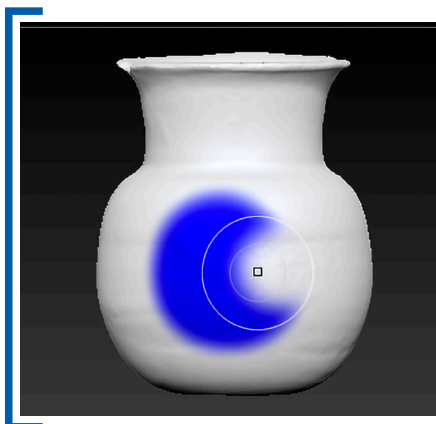
75

Aplicación de la herramienta Attract al modelo tridimensional [Captura de pantalla].



## 3. Erase

Elimino las áreas que no requerían de ningún tipo de selección (76).

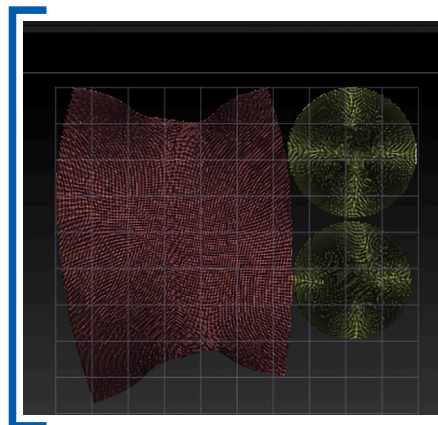


76

Aplicación de la herramienta Erase al modelo tridimensional [Captura de pantalla].



Al finalizar la aplicación de este proceso, se visualizó un modelo bidimensional mejor distribuido (*Unwrap >> Flatten*) (77).



77

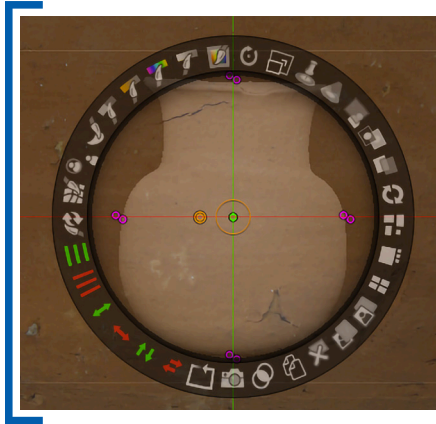
Visualización del modelo bidimensional del cuerpo de la vasija posterior a la optimización de los cortes [Captura de pantalla].



#### 4.9.4

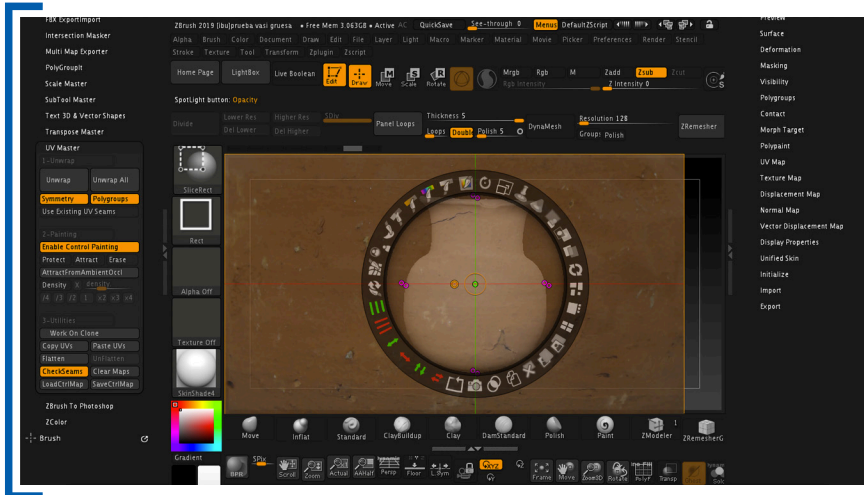
### APLICACIÓN DE COLOR Y TEXTURA

Al obtener la visualización de los cortes, se añadió el color y la textura al modelo (*Menu >> Texture >> Texture Off*) (78) seleccionado y añadiendo las imágenes (*Add to Spotlight*) concernientes a la vasija. Posteriormente, se realizaron los siguientes ajustes:



78

*Adición de color y textura la modelo tridimensional del cuerpo de la vasija [Captura de pantalla].*



#### 4.9.4.1

### OPACIDAD Y ESCALADO

Se aplicó la herramienta de escalado (79) para ajustar la imagen de manera proporcional al modelo tridimensional de la vasija aplicando la opacidad (80) para tener una visualización clara entre ellas.

## OPACIDAD



79

Aplicación de opacidad a la textura de la vasija para proceder al proceso de escalado [Captura de pantalla].



## ESCALADO



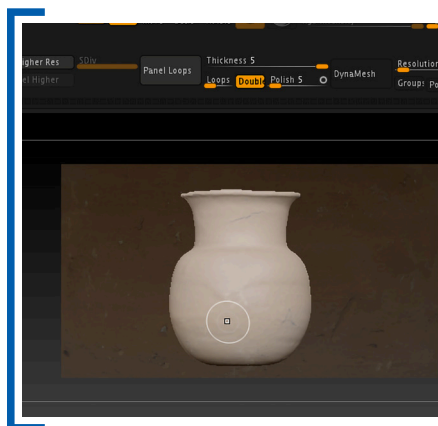
80

Escalado de la imagen que muestra la textura correspondiente a la vasija [Captura de pantalla].



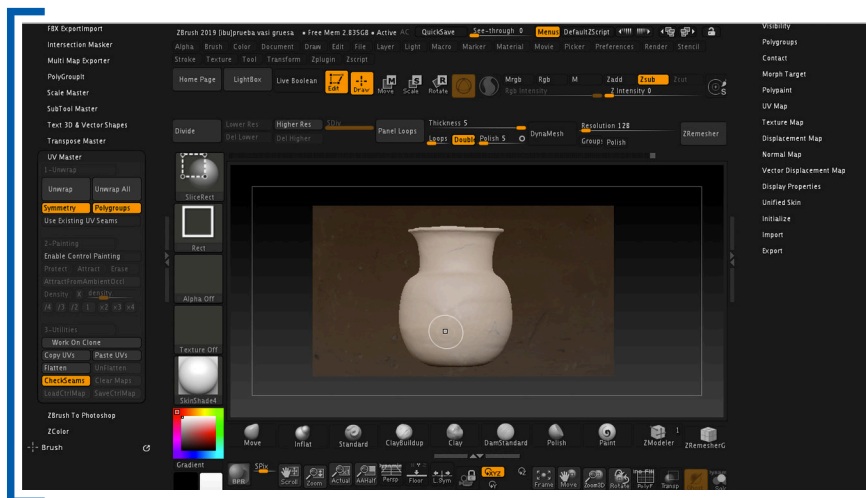
#### 4.9.4.2 PROYECCIÓN, TEXTURIZADO Y PINTADO DEL MODELO

Al finalizar el ajuste del escalado y la opacidad, se ocultaron estos parámetros (tecla Z) y se procedió a la proyección de la imagen (81); así como, al pintado de la vasija (clic + desplazamiento) (82, 83, 84).



81

*Proyección de la imagen correspondiente a la textura de la vasija [Captura de pantalla].*





82



83

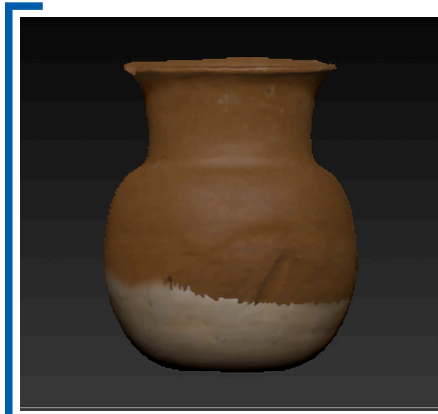


84

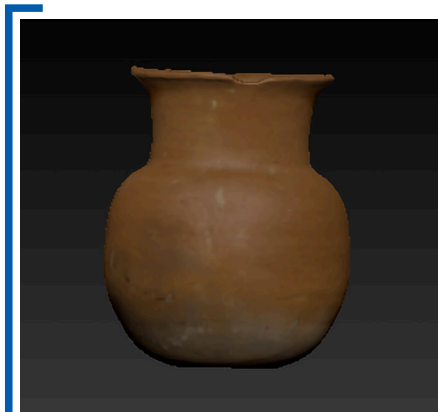


Proceso de pintado del cuerpo de la vasija [Captura de pantalla].

Dado que el color de la base de la vasija era diferente, se añadió una imagen extra para proporcionarle el color adecuado a esta (85, 86, 87).



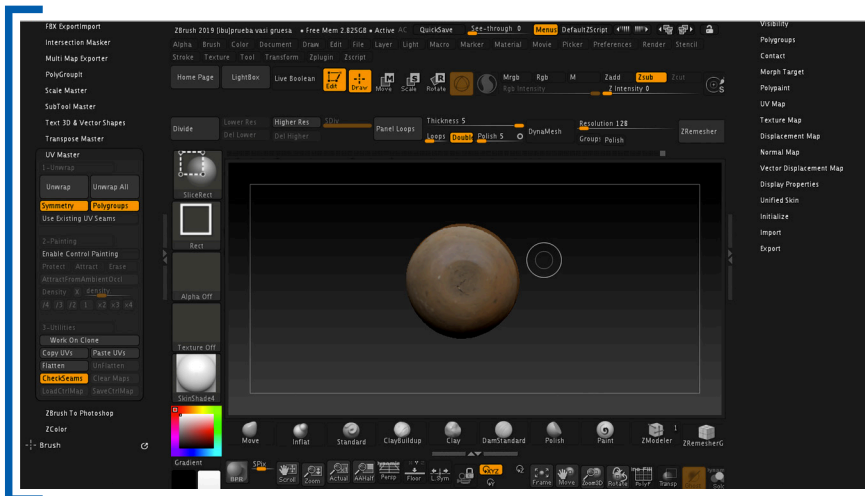
85



86



87



Proceso de pintado de la base de la vasija [Captura de pantalla].

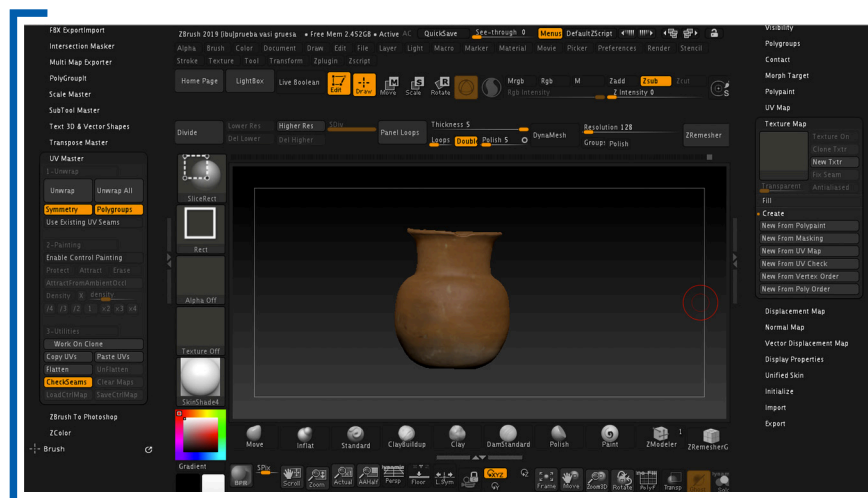
Posteriormente, se difuminó el corte entre la textura del cuerpo y la base manipulando el parámetro saturación de cada imagen aplicada (*RGB Intensity*) (88, 89).



88



89

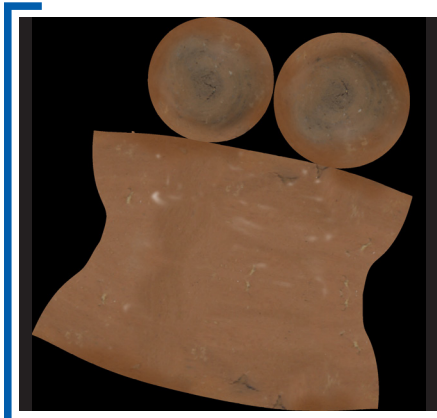


*Difuminado del corte entre la textura del cuerpo y la base de la vasija [Captura de pantalla].*

### 4.9.4.3

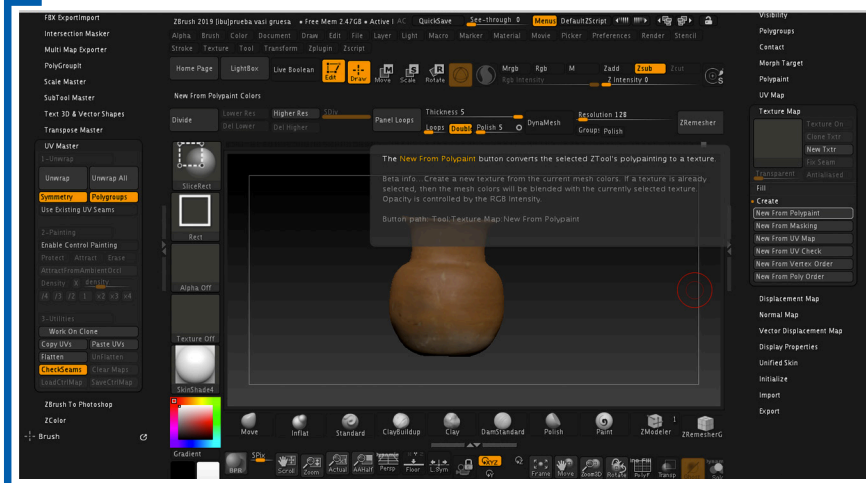
## ADICIÓN DE TEXTURIZADO Y PINTADO AL UV MAP

Realizado el proceso de texturizado y pintado de la vasija, el resultado (90) se añadió al **UV Map** (Texture Map >> New from Polypaint) (91, 92, 93).

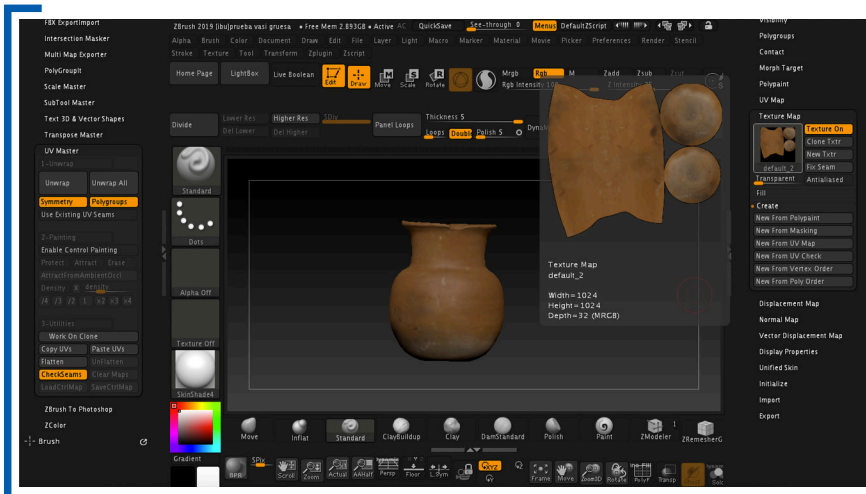


90

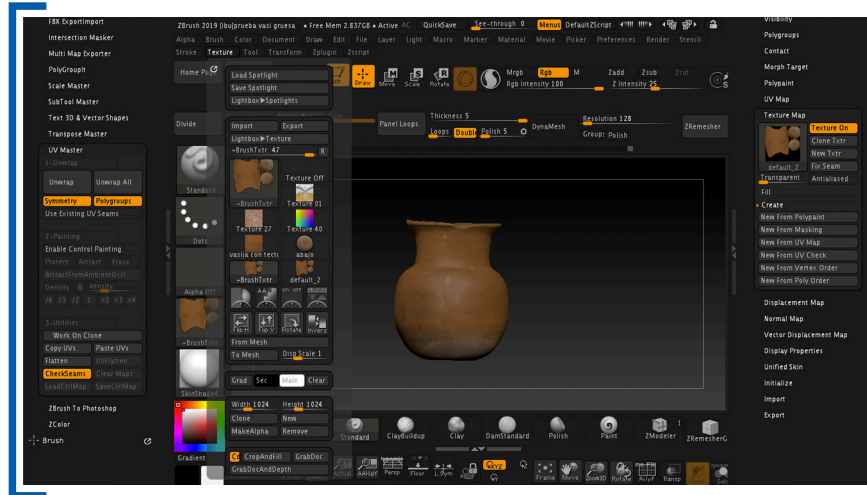
Textura final del modelo tridimensional de la vasija [Captura de pantalla].



91



92



93

Proceso de adición de una nueva textura al UV Map [Captura de pantalla].

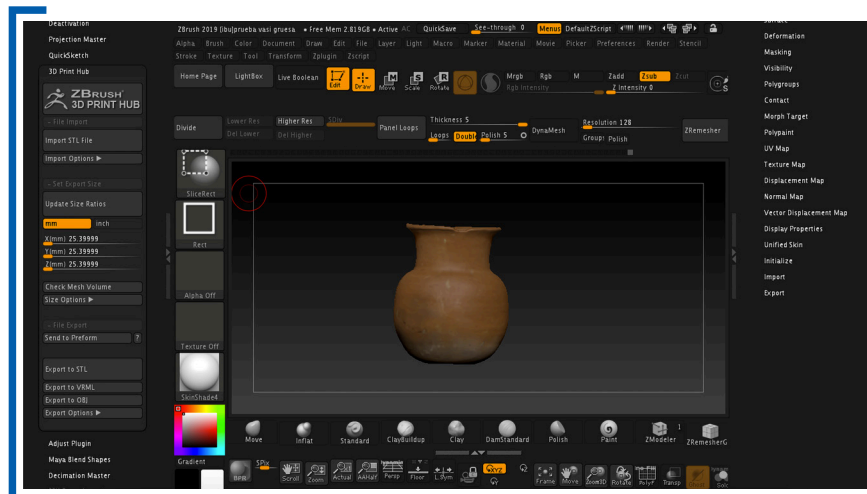
#### 4.9.4.4

### EXPORTACIÓN DEL MODELO

Finalmente se exportó el modelo al formato de impresión a color **.wrl** implementando la siguiente configuración:

#### Configuración de la exportación del modelo tridimensional

Menu ZPlugin >> 3D Print Hub >> Export Options >> Selección de *Textures and Polypaint* y deselección de *Export to separate Files* >> *Export to VRML (94, 95)*.



94



95

Configuración de la exportación del modelo tridimensional de la vasija [Captura de pantalla].

## 4.10

## IMPRESIÓN 3D

La impresión se llevó a cabo en la impresora de estereolitografía con el perfil de color CMY, *Projet 460 Plus* de *3D Systems* implementado el programa que proporciona la misma, *3D Print*.

El proceso se realizó de la siguiente manera:

### 4.10.1

### CONEXIÓN COMPUTADORA-IMPRESORA

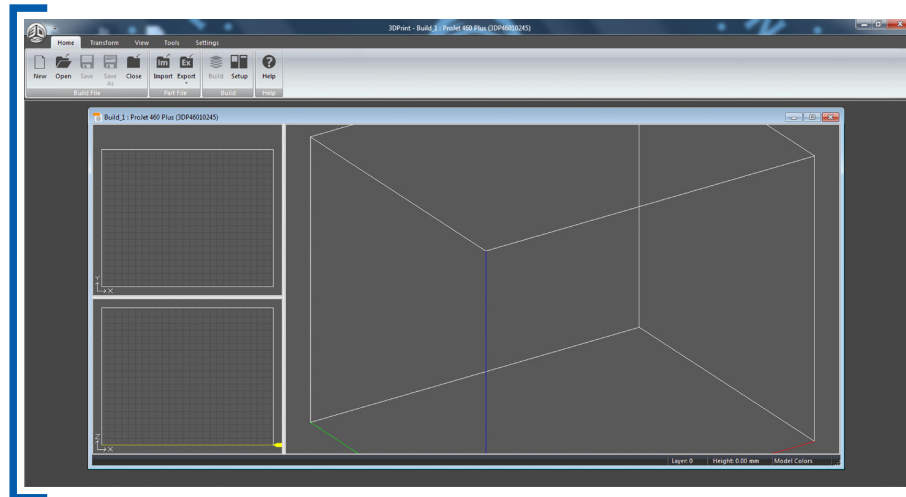
Primeramente, se encendió la impresora y se conectó a través de su cable *ethernet* a la computadora.

### 4.10.2

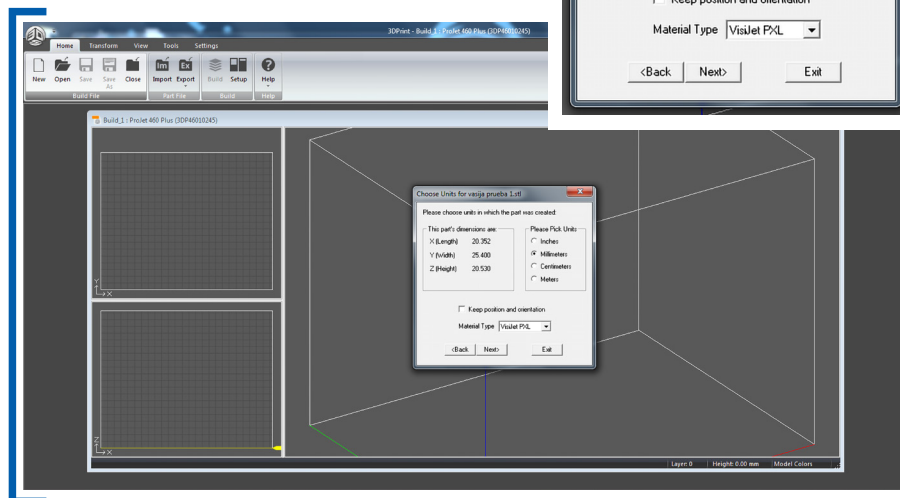
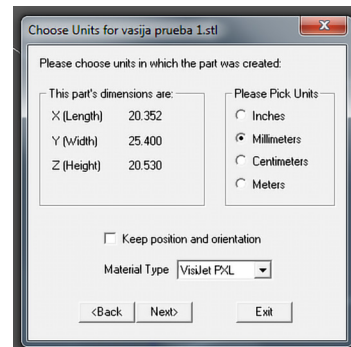
### PREPARACIÓN DE LA PLATAFORMA DE IMPRESIÓN

Finalizada la conexión, la impresora comenzó su proceso de inicio y se procedió a su configuración una vez que el panel se mostró *ONLINE*. Esta última comenzó girando y presionando el botón de control hasta la opción *Build Chamber* y, posteriormente, hasta la opción *Raise Platform* aplicando continuamente presión en el botón hasta que el panel se mostró en 8 pulgadas.

Al terminar la configuración de la impresora, se abrió el programa de impresión, se añadió el modelo 3D de la vasija (*Import/Open*) seleccionando la opción milímetros como la unidad de medida para ejecutar la impresión (96-97). Asimismo, se ajustó la ubicación del modelo dentro de la plataforma de impresión.



96



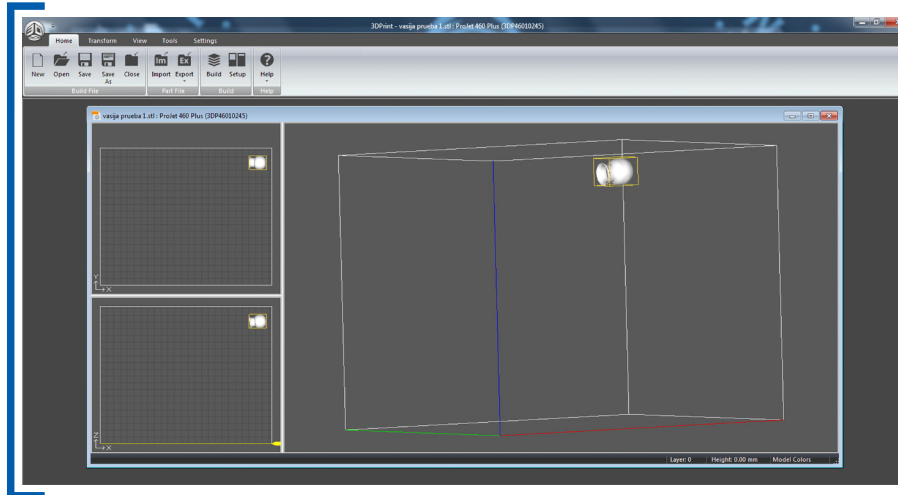
97

*Importación del modelo tridimensional en el software 3D Print [Captura de pantalla].*

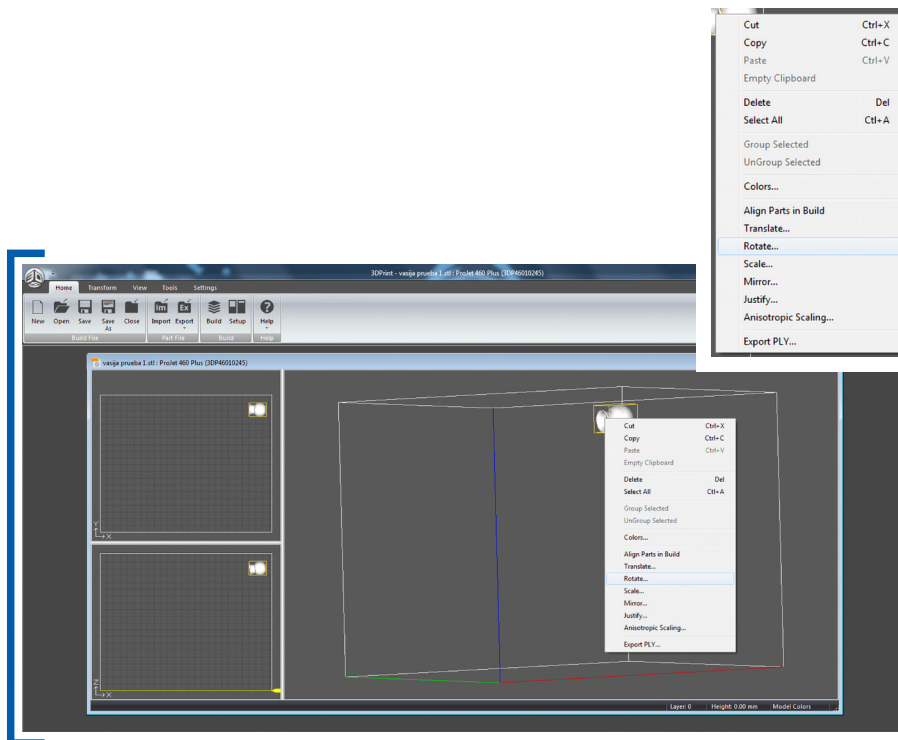
#### 4.10.4

### ROTACIÓN DEL MODELO A IMPRIMIR

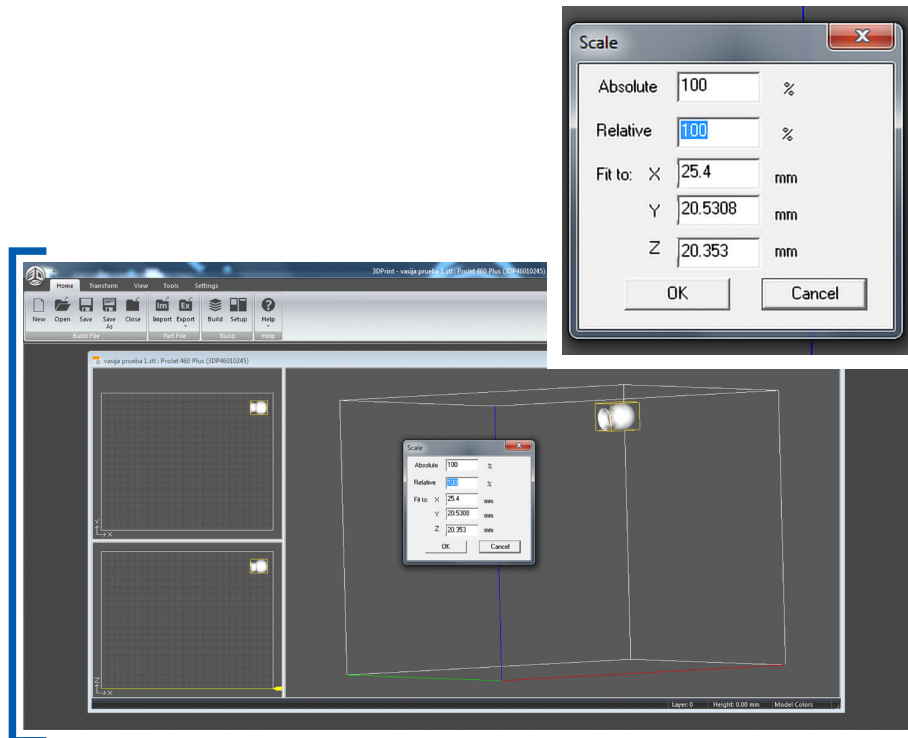
El modelo se rotó a una posición vertical, para reducir el tiempo de impresión y generar una pieza con menos imperfecciones (98,99,100,101).



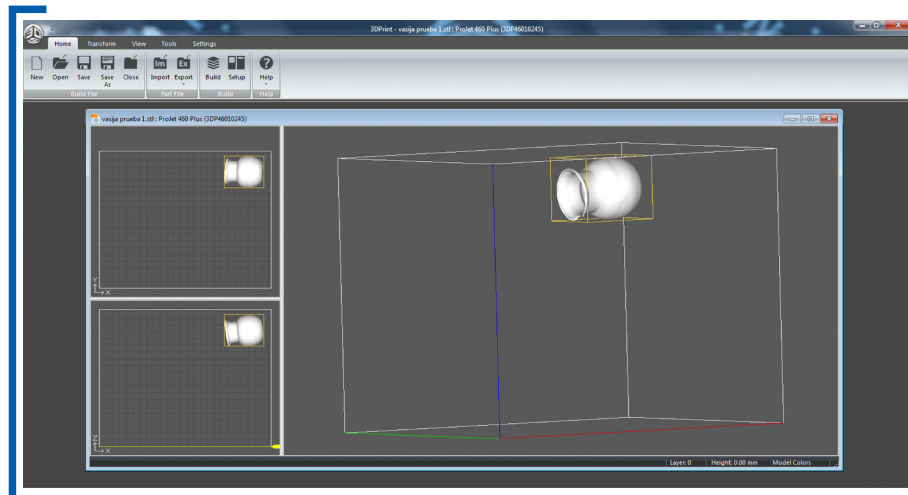
98



99



100



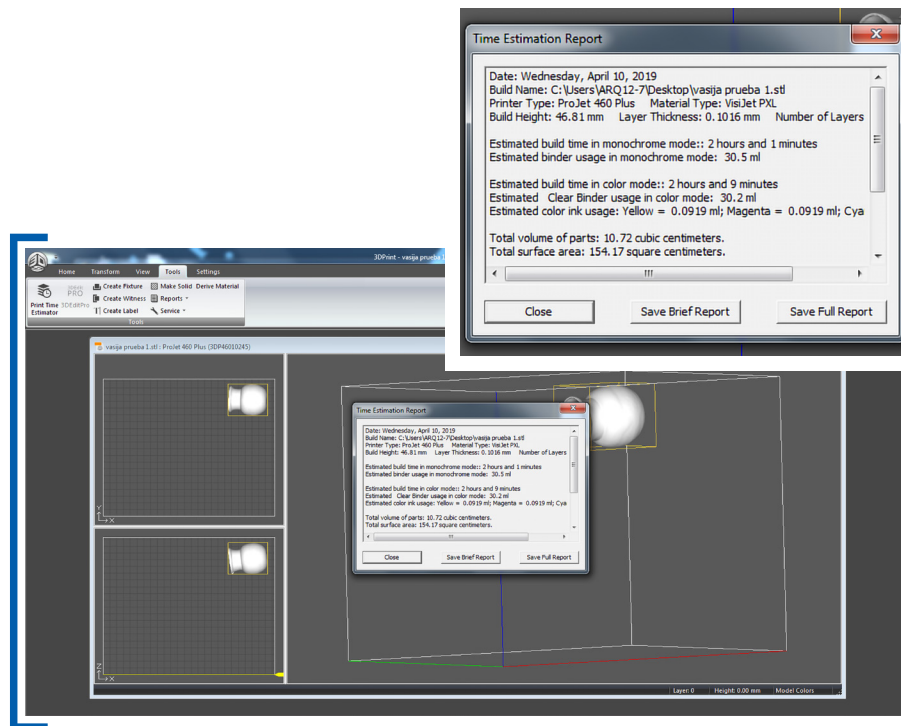
101

*Rotación del modelo tridimensional para optimización del proceso de impresión [Captura de pantalla].*

#### 4.10.5

### VISUALIZACIÓN DEL TIEMPO Y LA CANTIDAD DE MATERIAL

Terminados los ajustes se revisó el tiempo estimado de impresión (2 hrs 1 min); así como, la cantidad de material (aglutinante: 30.2 ml y polvo: 10.72 cm<sup>3</sup>) (102) que se emplearía durante el proceso (*Tools >> Print Time Estimator*).



102

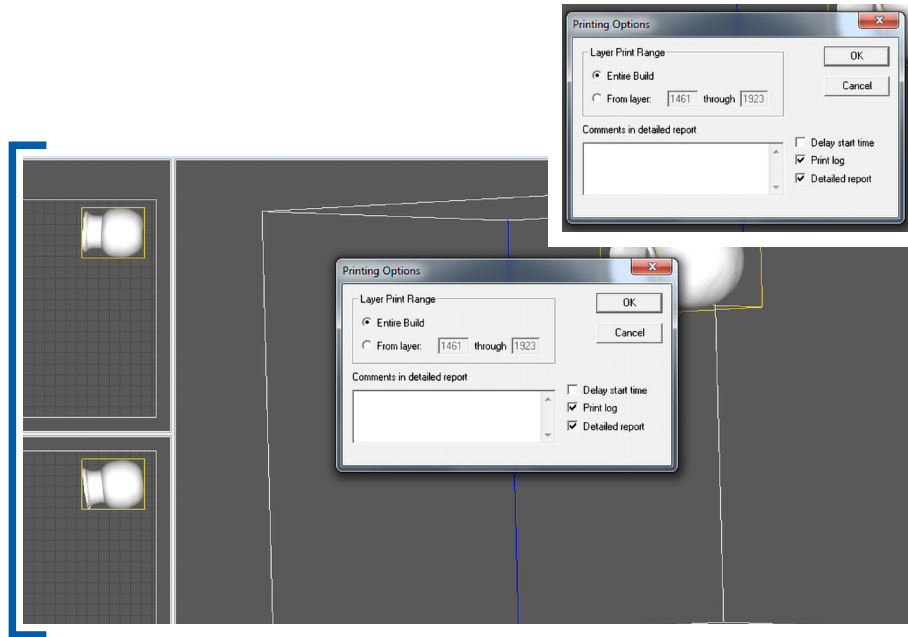
*Visualización del resorte de tiempo estimado para el proceso de impresión [Captura de pantalla].*

#### 4.10.6

### IMPRESIÓN

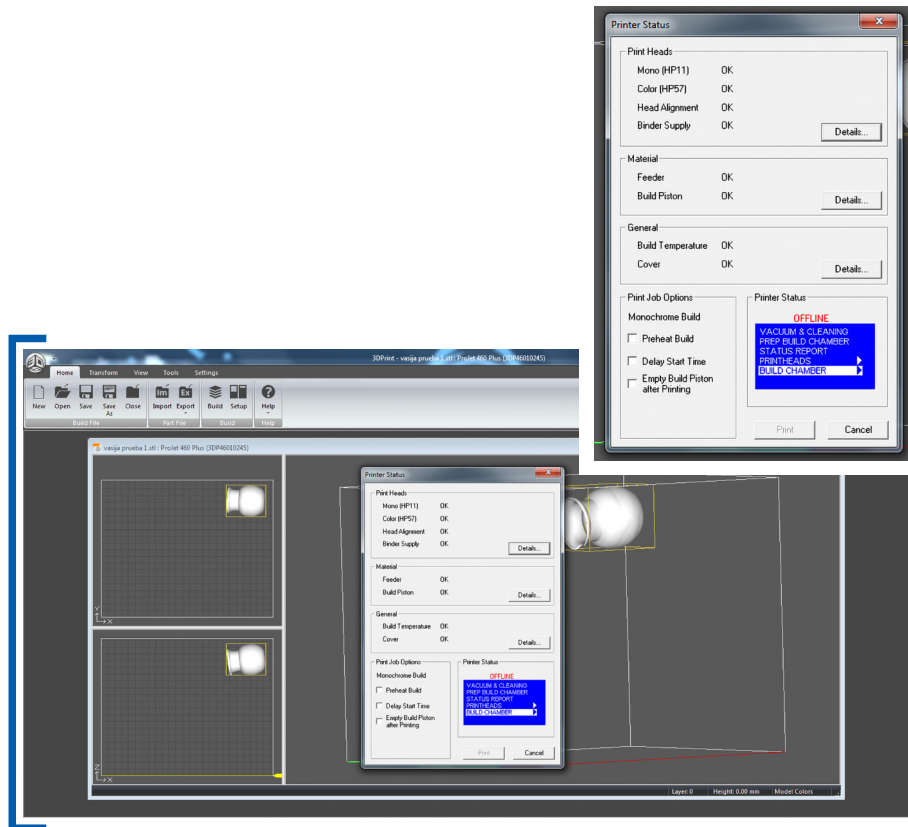
Concluido el proceso de configuración, se ejecutó la impresión del modelo (*Build >> Ok*) (103) constatando que el rango de impresión de las capas del modelo correspondieran a la impresión completa de su estructura (*Printing Options >> Layer Print Range >> Entire Build*) (104).

Asimismo, durante esta etapa, se verificaron el estado de los materiales y la impresora para corroborar que se pudiera iniciar la impresión (*Print*).



103

Configuración para la impresión completa de la estructura del modelo tridimensional [Captura de pantalla].



104

Envío a impresión del modelo tridimensional [Captura de pantalla].

## POSTIMPRESIÓN

Una vez concluido el proceso de impresión, se procedió a la remoción del material sobrante de la vasija impresa.

## 4.11

## ACABADOS

Para proteger la pieza impresa y minimizar su deterioro se le realizó una imprimación con *Color Bond*; ya que, este provoca un sellado exotérmico al reaccionar con la superficie del material. Asimismo, proporciona a los colores de la pieza mayor intensidad.

## 4.12

## RESULTADOS

Durante el proceso de reconstrucción tridimensional, se empleó la escala 1:1 para el trabajo del modelo. Sin embargo, para ejecutar su impresión este se redujo a un 42% con el objetivo de minimizar el tiempo de impresión y el consumo de material. De esta manera se obtuvo una réplica, blanca y sin textura (105, 106, 107, 108), de la vasija con las siguientes dimensiones:

1. Altura: 7.00 cm.
2. Diámetro de boca: 5.48 cm.
3. Diámetro de cuerpo: 5.69 cm.
4. Diámetro de base: 2.74 cm.
5. Grosor: 0.15 cm.

En adición al modelo impreso, se elaboró uno interactivo a color.

**ESTRUCTURA DEL MODELO TRIDIMENSIONAL OBTENIDO MEDIANTE EL PROCESO DE IMPRESIÓN TRIDIMENSIONAL**



105



106



107



108

*Frente, espalda, boca y base de modelo tridimensional obtenido mediante el proceso de impresión tridimensional [Captura de pantalla].*

## ASPECTOS GENERALES

---

Aunque la metodología no fue desarrollada con una pieza perteneciente al acervo de la ceramoteca del INAH Puebla, esta es aplicable a los vestigios que presenten similitudes con sus propiedades físicas; ya que, los procesos de captura de datos para la reproducción tridimensional no presentaron ninguna interferencia por el tipo de material.

Las pruebas ejecutadas en los diferentes estados de la vasija (completa, dividida en dos y múltiples partes) permitió la elección del mejor proceso de captura de datos para la implementación de las fases de captura fotográfica, escaneo tridimensional, selección y limpieza del escaneo tridimensional, reconstrucción e impresión del objeto.

Los resultados obtenidos muestran una solución no invasiva para la conservación, restauración y reproducción de los objetos arqueológicos que presentan un estado de deterioro significativo mediante la aplicación de las tecnologías tridimensionales.



## ASPECTOS GENERALES FINALES

El patrimonio cultural, delimitado por los fenómenos temporales, históricos y culturales de una determinada sociedad, comprende diversas manifestaciones humanas que, por su significado, constituyen un testimonio de identidad. Este, se manifiesta a través de los bienes culturales, tangibles e intangibles, tales como, los bienes arqueológicos; es decir, los vestigios que auxilian la comprensión y la preservación de la memoria de la existencia humana.

Debido a su importancia, como herramientas para el estudio del pasado histórico y cultural, se han implementado nuevos métodos que permiten su conservación y difusión a través de la gestión cultural que implementa las nuevas tecnologías como un instrumento para la preservación de los mismos. Lo anterior, mediante el uso de herramientas y técnicas tridimensionales que permiten la captura de datos, el modelado y la impresión.

Así, la implementación de las nuevas tecnologías y la adopción de estas para la reconstrucción de los bienes arqueológicos, han enriquecido los procesos de conservación curativa y restauración empleados por las instituciones dedicadas a la salvaguarda del patrimonio. Ya que, estas han permitido la reconstrucción, restitución y recreación de bienes, fragmentados o perdidos, a través de métodos no invasivos que permiten la elaboración y obtención precisa de modelos virtuales y físicos.

En la actualidad, existe una gran variedad de metodologías que abordan la restauración virtual como una técnica de digitalización tridimensional para la recuperación de información geométrica y volumétrica detallada de los vestigios arqueológicos. Sin embargo, en su mayoría, estas se limitan a presentar los pasos para la captura y elaboración de modelos tridimensionales digitales omitiendo la mención de la impresión para la obtención de modelos imprimibles.

En consecuencia, se elaboró un método para el Instituto Nacional de Antropología e Historia en el Estado de Puebla que presenta, de manera detallada, los pasos necesarios para llevar a cabo la captura y reconstrucción digital de piezas arqueológicas de pequeño formato para su posterior reproducción y aplicación de acabados mediante el empleo de las herramientas de prototipado rápido del Laboratorio de 3D de la Facultad de Arquitectura de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.



## GLOSARIO

### **BPP**

Bit por pixel · Unidad de medida empleada para calcular el número de bits que ocupa la información del color en un pixel.

### **CMY**

Cian, magenta, amarillo · Mezcla de colores sustractivos que se utiliza en los procesos de impresión a color.

### **DPI**

*Dots per inch* · Unidad de medida empleada para dictaminar la resolución de una impresión.

### **FPS**

Fotogramas por segundo · Velocidad con la cual que un dispositivo genera consecutivamente en un segundo cierta cantidad de imágenes denominadas cuadros o fotogramas.

### **Modelo 3D**

Representación en tres dimensiones de un objeto realizada por un software de modelado.

### **Mp**

Megapíxel · Unidad de medida que expresa la resolución de captura de una imagen por una cámara digital.

### **OBJ**

*Wavefront 3D Object File* · Formato de archivo que contienen la información geométrica de un objeto tridimensional.

### **Render**

Imagen digital fotorealista creada a partir de un modelo o escenario 3D.

### **VRML**

Lenguaje de modelado de realidad virtual · Formato de exportación, empleado particularmente en la web, para la visualización de escenas u objetos interactivos tridimensionales



## REFERENCIAS

- Berchon, M., & Luyt, B. (2014). La impresión 3D. Barcelona, España: Gustavo Gili.
- Bonfil, G. (1999-2000). Nuestro Patrimonio Cultural: Un laberinto de significados. *Revista Mexicana de Estudios Antropológicos*, XLV- XLVI, 16-39.
- Carosio, S. A., Aguilar, J. P., & Bárcena, J. R. (2013). Reconstrucción 3D y cálculo volumétrico de recipientes cerámicos. Alcances y limitaciones para el estudio y conservación cerámica de la tambería de Guandacol (Provincia de La Rioja). *La Zaranda de Ideas*, 57-76. Recuperado de [https://www.academia.edu/6322395/Reconstrucci%C3%B3n\\_3D\\_y\\_c%C3%A1lculo\\_volum%C3%A9trico\\_de\\_recipientes\\_cer%C3%A1micos.\\_Alcances\\_y\\_limitaciones\\_para\\_el\\_estudio\\_y\\_conservaci%C3%B3n\\_cer%C3%A1mica\\_de\\_la\\_Tamber%C3%ADa\\_de\\_Guandacol\\_Provincia\\_de\\_La\\_Rioja\\_](https://www.academia.edu/6322395/Reconstrucci%C3%B3n_3D_y_c%C3%A1lculo_volum%C3%A9trico_de_recipientes_cer%C3%A1micos._Alcances_y_limitaciones_para_el_estudio_y_conservaci%C3%B3n_cer%C3%A1mica_de_la_Tamber%C3%ADa_de_Guandacol_Provincia_de_La_Rioja_)
- Di Angelo, L., Di Stefano, P., Fratocchi, L., & Marzola, A. (2018). An AHP-based method for choosing the best 3D scanner for cultural heritage applications. *Journal of Cultural Heritage*, 34,. Recuperado de 109–115. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2018.03.026>
- Echenique, N. G., Sokol, O. L., & Lozano, M. (2017). Reconstrucción virtual. Un aporte a la arqueología en tres dimensiones. *Cuadernos del Instituto Nacional de Antropología y Pensamiento Latinoamericano - Series Especiales*, 4(4), 20-29. Recuperado de <http://ppct.caicyt.gov.ar/index.php/cinapl-se/article/view/10575/9450>
- FUSDA. (2011). El patrimonio cultural en México. *Nueva visión socialdemócrata*, 7(25-26), 57-72. Recuperado de <http://www.fusda.org/Revista25-26EL%20PATROMONIO%20CULTURAL%20EN%20MEXICO.pdf>
- Garstki, K. (2016). Virtual Representation: the Production of 3D Digital Artifacts. *Journal of Archaeological Method and Theory*, 24(3), 726–750. <https://doi.org/10.1007/s10816-0169285-z>
- Imprimalia 3D. (2018, 23 julio). Recuperado de <http://www.imprimalia3d.com/noticias/2018/07/05/0010149/impresi-n-3d-restauraci-n-obras-arte>
- Katz, J. (2017). Digitized Maya music: The creation of a 3D database of Maya musical artifacts. *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*, 6, 29–37. <https://doi.org/10.1016/j.daach.2017.08.004>
- Llull, P. (2005). Evolución del concepto y de la significación social del patrimonio cultural. *Arte, individuo y sociedad*, 17, 177-206.
- López-Menchero, V., & Grande, A. (2011). Hacia una carta internacional de Arqueología Virtual. El Borrador SEAV. *Virtual Archaeology Review*, 2(4), 71–75. Recuperado de <https://polipapers.upv.es/index.php/var/article/view/4558/4692>

- Martínez, A. (2017, 5 agosto). El patrimonio arqueológico de México. Recuperado 25 noviembre, 2018, de: <http://arqueologiamexicana.mx/mexico-antiguo/el-patrimonio-arqueologico-de-mexico>
- Martínez, C.P. (2016). Digitalización a bajo costo de objetos religiosos usando reconstrucción tridimensional con luz blanca (Tesis de grado). Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia.
- Mora, A. (2012, febrero). El escáner láser, una herramienta tecnológica aplicada al patrimonio arquitectónico. *Boletín de monumentos históricos, tercera época*(24), 171–177. Recuperado de [www.revistas.inah.gob.mx/index.php/boletinmonumentos/article/download/2601/2506](http://www.revistas.inah.gob.mx/index.php/boletinmonumentos/article/download/2601/2506)
- Mozas, A. T., Pérez, J. L., Barba, V., & López, A. (2011). Estudio geométrico de piezas arqueológicas a partir de un modelo virtual 3D. *Virtual Archaeology Review*, 2(3), 109-113. Recuperado de <https://polipapers.upv.es/index.php/var/article/view/4627/4758>
- Sánchez, G., Leal, E., & Leal, N. (2014). Reconstrucción digital de objetos arqueológicos. *Prospect*, 12(2), 41-48. Recuperado de <http://www.scielo.org.co/pdf/prosp/v12n2/v12n2a04.pdf>
- Solórzano, M. S., Bolaños, J. E., Urbina, C. J., & Gallardo, V. (2016). Guía básica para modelado en 3D de objetos cerámicos arqueológicos completos y fragmentados. *Arqueología y territorio*, 13, 123-132. Recuperado de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5906639>
- Tejado, J.M. (2005). Escaneado en 3D y prototipado rápido: Las nuevas tecnologías en el registro, conservación y difusión del patrimonio arqueológico. *IBERIA: Revista de la antigüedad*, 8, 135-160. Recuperado de: <http://dialnet.uniroja.es/servlet/articulo?codigo=2526197>
- Torres, J. C., Cano, P., Melero, J., España, M., & Moreno, J. (2010). Aplicaciones de la digitalización 3D del patrimonio. *Virtual Archaeology Review*, 1(1), 51–54. Recuperado de <https://polipapers.upv.es/index.php/var/article/view/4768/4902>

## BIBLIOGRAFÍA

- 3D Systems. (s.f.-a). ColorJet Printers [Documento electrónico]. Recuperado 16 marzo, 2019, de <https://es.3dsystems.com/3d-printers/projet-cjp-460plus/specifications>
- 3D Systems. (s.f.-b). ProJet CJP 460plus. Recuperado 16 marzo, 2019, de <https://es.3dsystems.com/3d-printers/projet-cjp-460plus>
- 3D Systems. (s.f.-c). ProJet 7000 HD. Recuperado 5 marzo, 2020, de <https://es.3dsystems.com/3d-printers/projet-7000-hd>
- ALL3DP. (2019, 14 noviembre). SLA 3D Printing (Stereolithography) – Simply Explained | All3DP. Recuperado 20 noviembre, 2019, de <https://all3dp.com/2/stereolithography-3d-printing-simply-explained/>
- Artec 3D. (s.f.). Artec Eva. Recuperado 16 marzo, 2019, de <https://www.artec3d.com/es/portable-3d-scanners/artec-eva>
- Aura, E. (2015, 4 mayo). Documentación del material arqueológico mediante técnicas de registro en 3D [Documento electrónico]. Recuperado 2 mayo, 2019, de <https://riunet.upv.es/handle/10251/49583>
- Díaz, M. D. (2016, 29 noviembre). Digitalización de una imagen de la virgen del carmen y usos del 3D en la conservación y restauración [Documento electrónico]. Recuperado 2 mayo, 2019, de <https://riull.ull.es/xmlui/handle/915/3451>
- Escriva, F., & Madrid, J. A. (2013, 26 junio). El mundo virtual en la restauración. Aplicaciones virtuales para la conservación y restauración del patrimonio [Documento electrónico]. Recuperado 2, mayo 2019, de <https://riunet.upv.es/handle/10251/30147>
- Martínez, T., & Santacana, J. (2013). De lo real a lo digital: La arqueología reconstructiva y la obtención de imágenes virtuales para la investigación en la didáctica del patrimonio. *Her&Mus: heritage & museography*, (13), 16-35. Recuperado de <https://dialnet.unirioja.es/ejemplar/458304>
- Gándara, M. (2015, enero) Valores, significados y usos del patrimonio arqueológico: Una propuesta [Documento electrónico]. Recuperado 2 mayo, 2019, de [https://www.researchgate.net/publication/316553993\\_Valores\\_significados\\_y\\_usos\\_del\\_patrimonio\\_arqueologico\\_una\\_propuesta](https://www.researchgate.net/publication/316553993_Valores_significados_y_usos_del_patrimonio_arqueologico_una_propuesta)
- Gobierno español. Ministerio de educación, cultura y deporte. (2013, 26 junio). La ciencia y el arte VI. Ciencias experimentales y conservación del patrimonio [Documento electrónico]. Recuperado 2 mayo, 2019, de <https://sede.educacion.gob.es/publiventa/la-ciencia-y-el-arte-vi-ciencias-experimentales-y-conservacion-del-patrimonio/conservacion-restauracion-patrimonio-historico-artistico/21242C>

- Gomes, L., Regina Pereira Bellon, O., & Silva, L. (2014). 3D reconstruction methods for digital preservation of cultural heritage: A survey. *Pattern Recognition Letters*, 50, 3–14. <https://doi.org/10.1016/j.patrec.2014.03.023>
- González, A. B. (s.f.) La gestión del patrimonio arqueológico en México [Documento electrónico]. Recuperado 25 noviembre, 2018, de <http://webs.ucm.es/info/arquoweb/pdf/8-2/berenice.pdf>
- GoPrint3D. (2017, 11 diciembre). What is slicing software, and what does it do? Recuperado 16 marzo, 2019, de <https://www.goprint3d.co.uk/blog/what-is-slicing-software-and-what-does-it-do/>
- Llorenç, P. (2000). El concepto de patrimonio cultural. *Cuadernos de antropología social*, (21), 115-136. Recuperado de <http://revistascientificas.filo.uba.ar/index.php/CAS/article/view/4709/4206>
- López, M. F. (2016). La importancia de crear un acervo digital tridimensional del patrimonio cultural de México. Red temática: «Tecnologías Digitales para la Difusión del Patrimonio Cultural», , 156–166. Recuperado de [https://www.researchgate.net/profile/Manuel\\_Gandara2/publication/315775540\\_EL\\_patrimonio\\_cultural\\_y\\_las\\_tecnologias\\_digitales\\_Experiencias\\_recientes\\_desde\\_Mexico/links/58e3d6530f7e9b07513076d0/El-patrimonio-cultural-y-las-tecnologias-digitalesExperiencias-recientes-desde-Mexico.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Manuel_Gandara2/publication/315775540_EL_patrimonio_cultural_y_las_tecnologias_digitales_Experiencias_recientes_desde_Mexico/links/58e3d6530f7e9b07513076d0/El-patrimonio-cultural-y-las-tecnologias-digitalesExperiencias-recientes-desde-Mexico.pdf)
- Marín, B. (s.f.). Impresión 3D: Aplicaciones en el patrimonio. Recuperado de <http://www.upv.es/contenidos/ENCDOC/info/U0750471.pdf>
- Microsoft. (s.f.). Digitalización en 3D con Windows 10. Recuperado 23 marzo, 2019, de <https://developer.microsoft.com/es-es/windows/hardware/3d-print/scanning-with-kinect>
- Pérez, M. (1998). Reseña de El patrimonio cultural de México de Enrique Florescano (comp.). *Alteridades*, 8(16), 183-186.
- Sculpteo. (s.f.-a). 3D Printing Design Guidelines. Recuperado 25 enero, 2019, de <https://info.sculpteo.com/design-guidelines>
- Sculpteo. (s.f.-b). Fix Your Files for 3D Printing. Recuperado 25 enero, 2019, de <https://info.sculpteo.com/ebook/fix-your-files-for-3d-printing>
- Sculpteo. (s.f.-c) Sculpteo. Recuperado 2 mayo, 2019, de <https://www.sculpteo.com/es/>
- Trejo, M. (2018). Generación de modelos tridimensionales de piezas arqueológicas para el museo virtual de arqueología subacuática (MAS). *Tecnología 3D por barrido láser*, (-), 251–275. Recuperado de <https://www.revistas.inah.gob.mx/index.php/digitales/article/view/11990/12758>
- UNESCO. (s.f.). Patrimonio [Documento electrónico]. Recuperado 13 enero, 19, de <https://es.unesco.org/creativity/sites/creativity/files/digital-library/cdis/Patrimonio.pdf>

- UNESCO. (2003, 15 octubre). Carta sobre la preservación del patrimonio digital. Recuperado 26 febrero, 2018 de [http://portal.unesco.org/es/ev.php-URL\\_ID=17721&URL\\_DO=DO\\_TOPIC&URL\\_SECTION=201.html](http://portal.unesco.org/es/ev.php-URL_ID=17721&URL_DO=DO_TOPIC&URL_SECTION=201.html)
- Voutssás, J. (2009) Preservación del patrimonio documental digital en México. México, México: UNAM, Centro Universitario de Investigaciones Bibliotecológicas.
- Zhang, Y., Li, K., Chen, X., Zhang, S., & Geng, G. (2018). A multi feature fusion method for reassembly of 3D cultural heritage artifacts. *Journal of Cultural Heritage*, 33, 191–200. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2018.03.001>

