

Digitalización e impresión 3D para la reconstrucción de pérdidas volumétricas en un modelo anatómico de cera del siglo XVIII

Óscar Hernández-Muñoz*
Alicia Sánchez-Ortiz 

Universidad Complutense de Madrid, Facultad de Bellas Artes, Calle Pintor El Greco 2, 28040 Madrid, España
*oscarhernandez@art.ucm.es

Resumen

Los modelos tridimensionales de cera pertenecientes al patrimonio científico de la Universidad Complutense de Madrid son un material raro y extraordinario que merece ser preservado por tener una gran relevancia para comprender el modo cómo los cirujanos y anatomistas encontraban fórmulas de construcción visual que les posibilitasen la difusión de su conocimiento sobre el cuerpo humano. En la presente investigación se ha ensayado sobre un modelo anatómico de cera del siglo XVIII, con un notable grado de deterioro y debilidad estructural, una metodología de reconstrucción de pérdidas volumétricas basada en la digitalización de la obra mediante fotogrametría, el modelado 3D de las partes originales dañadas y la impresión 3D de sus moldes, para obtener a partir de ellos las copias definitivas en material céreo. Gracias a esta metodología se ha conseguido reducir la manipulación de la escultura durante el proceso de restauración y se ha minimizado el riesgo de deterioro accidental.

Palabras clave

Fotogrametría
Tecnologías digitales
Conservación-restauración
Ceroplástica
Colecciones científicas

Digitalização e impressão 3D para a reconstrução das perdas volumétricas num modelo anatómico de cera do século XVIII

Resumo

Os modelos tridimensionais de cera pertencentes ao património científico da Universidade Complutense de Madrid são objectos raros e extraordinários que merecem ser preservados porque têm grande relevância para se entender como cirurgiões e anatomistas encontraram fórmulas de construção visual que possibilitaram a difusão do seu conhecimento sobre o corpo humano. Na presente pesquisa, num modelo anatómico de cera do século XVIII, com um notável grau de deterioração e fragilidade estrutural, foi testada uma metodologia de reconstrução volumétrica baseada na digitalização do objecto por fotogrametria, modelagem 3D das peças danificadas e impressão em 3D dos respectivos moldes, para no final se obter cópia em material ceroso. Graças a esta metodologia, foi possível reduzir o manuseamento da escultura durante o processo de restauro e foi minimizado o risco de deterioração accidental.

Palavras-chave

Fotogrametria
Tecnologias digitais
Conservação e restauro
Ceroplástica
Colecções científicas

ISSN 2182-9942



Digitization and 3D printing for the reconstruction of volumetric losses in an anatomical wax model of the 18th century

Abstract

The three-dimensional models of wax belonging to the scientific heritage of the Complutense University of Madrid are a rare and extraordinary material that deserves to be preserved because it has great relevance to understand how surgeons and anatomists found formulas of visual construction that made possible the diffusion of his knowledge about the human body. In the present investigation, an anatomical wax model of the 18th century, with a remarkable degree of structural deterioration and weakness, has been restored, testing a new volumetric loss reconstruction methodology based on photogrammetric digitization of the sculpture, 3D modelling of the lost pieces and 3D printing of their moulds to obtain from them the final copies in waxy material. Due to this methodology, it has been possible to reduce the handling of the figure during the restoration process and the risk of accidental deterioration has been minimized.

Keywords

Photogrammetry
Digital technologies
Conservation-restoration
Ceroplastics
Scientific collections

Introducción

Los modelos tridimensionales han sido herramientas esenciales en la instrucción médica. Fueron óptimos sustitutos del cadáver diseccionado al posibilitar a los cirujanos y anatomistas representar con gran verismo estructuras que eran difícilmente observables por los estudiantes en un único espécimen. Sus materiales, técnicas de fabricación y acabados se fueron adaptando a los avances y requerimientos científicos de cada período histórico para de ese modo contribuir a la construcción y difusión del conocimiento [1]. La cera fue elegida por su maleabilidad, por su extraordinario parecido con la piel humana y, en definitiva, por posibilitar la creación de un simulacro hiperrealista que reemplazaba el cadáver y servía como material didáctico en el que educar la mirada y adiestrar la mano del estudiante.

Estos objetos que en un tiempo pasado llenaban los gabinetes de historia natural y aportaban prestigio a las instituciones y universidades que disponían de ellos en sus colecciones durante los siglos XVIII y XIX, poco a poco fueron dejando paso a otros métodos docentes y finalmente su asociación con el mundo del entretenimiento popular los terminó de equiparar con el resto de artefactos calificados como “cultura popular”. Quizá por ello, los modelos de cera no han ocupado un lugar destacado en las investigaciones de los historiadores de la ciencia y del arte. Sin embargo, recientemente algunos estudiosos [2-4] han señalado la importancia de las colecciones de ceroplástica como parte de la cultura material desarrollada en las prácticas médicas del pasado y se ha despertado el interés en las disciplinas de la medicina, del arte y de la conservación del patrimonio. La *Declaración de Leiden sobre la Anatomía Humana y las Colecciones Anatómicas* [5], documento elaborado a partir de la reunión celebrada en la Universidad de Leiden los días 15-18 de febrero de 2012, recoge la gran preocupación existente sobre las condiciones de conservación en las que este tipo de patrimonio – representativo de la historia de las instituciones que las custodian – se encuentra en

la actualidad, siendo muchas de ellas universidades. Espacios expositivos inadecuados a las características propias de la cera, el mal almacenamiento de las esculturas, la carencia de personal cualificado para el mantenimiento periódico, una financiación limitada y escasa, pero, sobre todo, la falta de sensibilidad, el poco interés y la ausencia de planes estratégicos, han ocasionado importantes daños que, en algunos casos, han llegado a causar la pérdida completa de elementos significativos, afectando a la estabilidad física del objeto y mermando la comprensión de sus valores tanto desde un punto de vista anatómico como estético.

La reconstrucción volumétrica de los modelos artificiales de cera que han perdido alguna de sus partes anatómicas es un proceso delicado al requerir la actuación directa sobre la obra. Los riesgos que implica cualquier manipulación de un objeto de estas características – sumamente frágil y quebradizo –, junto con el uso de productos químicos necesarios en los procesos de obtención de moldes por el método tradicional, pueden poner en peligro la estabilidad del conjunto. Además, este tipo de procesos técnicos en el ámbito de la restauración suelen consumir mucho tiempo y precisar de importantes recursos humanos y materiales. Teniendo en cuenta el enorme número de piezas que componen las colecciones de ceroplástica de los museos universitarios, tanto a nivel nacional como internacional, estos costes resultan en muchos casos inasumibles por las instituciones responsables de su conservación.

Por estos motivos, se ha considerado conveniente buscar alternativas a dichos métodos que reduzcan los citados riesgos, aumenten la efectividad de este tipo de intervenciones y conlleven un menor coste. Con esta finalidad se ha desarrollado un estudio que se centra en el análisis de los posibles beneficios que las tecnologías de digitalización e impresión 3D pueden aportar en la reconstrucción de pérdidas volumétricas en modelos anatómicos de cera.

Se han analizado todos los procesos tradicionales necesarios en estas intervenciones, con el propósito

de determinar cuáles de ellos podían ser mejorados o sustituidos por métodos digitales. La primera de las fases susceptible de modificación es la de copiado o registro tridimensional de la obra original mediante moldes, que puede ser reemplazada por un proceso de digitalización 3D gracias a la precisión y rapidez de ejecución que esta tecnología ha alcanzado en la actualidad [6]. Éste es un paso fundamental porque evita la aplicación de silicona u otros productos similares sobre la obra original para la obtención de moldes y también minimiza el riesgo derivado de su manipulación.

La reproducción de la obra original en otro material a partir de los moldes también puede ser reemplazada por la impresión 3D del modelo tridimensional previamente digitalizado, teniendo en cuenta la precisión y economía de los dispositivos que han sido comercializados recientemente [7]. La réplica así obtenida sirve como base para modelar físicamente sobre ella las partes desaparecidas de la escultura original.

El modelado de las zonas ausentes puede ser también sustituido por un método digital, ya que los programas informáticos de escultura digital permiten acortar sensiblemente los tiempos de creación y edición de figuras tridimensionales e incluso son capaces de registrar detalles más delicados que los métodos tradicionales, tales como el modelado en barro, plastilina o cera [8].

Otro paso que puede ser ejecutado mediante dispositivos digitales – en lugar de medios tradicionales y que resultaría totalmente novedoso en este tipo de intervenciones – es la creación de moldes para la reproducción de la zona reconstruida en cera, toda vez que se pueden crear en programas de modelado 3D haciendo un negativo digital de la figura previamente modelada para después obtener una copia física de dichos moldes mediante impresoras 3D, algo que ya se ha ensayado en otros campos de conocimiento [9-10].

Pese a que alguno de los procesos digitales mencionados se han empleado de manera parcial en algunos trabajos de restauración escultórica [11], no se ha encontrado ningún estudio de restauración de modelos anatómicos de cera donde el flujo de trabajo esté basado prácticamente en su totalidad en tecnologías digitales, como el que se plantea en esta investigación. Por tanto, el objetivo de este estudio es analizar la utilidad de las tecnologías de digitalización e impresión 3D en el proceso de restauración de modelos anatómicos de cera que han sufrido la pérdida de algún elemento formal, probando diferentes métodos de abordaje para establecer cuál es el que se muestra más efectivo y seguro.

Un archivo visual del cuerpo humano: colecciones de ceroplástica anatómica

En plena época de la Ilustración, la evolución en la investigación anatómica influyó en los medios didácticos. Para suplir la carencia de cadáveres y avanzar en un conocimiento más profundo de la disciplina,

se comenzaron a utilizar diferentes materiales que posibilitasen su plasmación de manera plástica en soportes menos perecederos que la carne [12]. Dibujos y grabados ilustraban los principales atlas de anatomía de reconocidos cirujanos, pero a los ojos de los anatomistas del siglo XVIII, aquellas imágenes plásticas tenían limitaciones ligadas a su carácter bidimensional. La búsqueda de otros recursos visuales llevó al uso de la cera, que posibilitó la creación de simulacros del cuerpo dotados de volumen, en los que anatomistas y escultores aunaron sus saberes en una extraordinaria simbiosis entre la ciencia y el arte. La cera fue elegida por su maleabilidad, ductilidad y organicidad, propiedades que la convertían en una sustancia capaz de reproducir con un altísimo grado de verosimilitud la cualidad táctil del espécimen anatómico, con una expresión de verdad que se potenciaba al añadir pelo y pestañas.

Los museos de historia de la medicina albergan colecciones de piezas anatómicas y patológicas que en origen tuvieron como finalidad contribuir a la formación de los estudiantes en las principales universidades de Europa. Las primeras de ellas que incorporaron en sus cátedras estos nuevos instrumentos de enseñanza fueron las italianas de Bolonia y Florencia. El Museo de La Specola – en origen Real Gabinetto di Fisica e di Storia Naturale – alcanzó un enorme prestigio; inaugurado, en 1775, bajo la dirección de Felice Fontana, su colección de ceras anatómicas atrajo a ilustres visitantes y provocó una gran demanda de copias [13]. En Viena, el Josephinum Museum alberga la mayor colección de modelos obstétricos de cera, realizados en el taller florentino, entre 1784 y 1788 [14-15].

En el caso concreto de España, los modelos anatómicos en cera no se introdujeron en la enseñanza médica hasta finales del siglo XVIII. El interés por mejorar la formación de los futuros cirujanos llevó a Carlos III a ordenar, en 1787, la creación de un Real Colegio de Cirugía, en Madrid, dotado de un gabinete anatómico donde elaborar piezas en cera que reflejasen los progresos científicos del momento [16-18]. En los legajos conservados en el Archivo General de la Universidad Complutense consta como, en 1787, el propio monarca solicitó un informe sobre los progresos que se hubiesen hecho en el citado gabinete y en él se hace mención especial a los modelos obstétricos [19]. Esta magnífica colección fue creada en un período de tiempo que se sitúa entre los años 1788 y 1797. Consta de dos secciones, una dedicada a la anatomía del útero grávido, que se concluyó en 1792, y otra dedicada a los partos distócicos, finalizada en 1797. El conjunto de las esculturas fue realizado por Juan Chaéz y Luigi Franceschi bajo la dirección del disector del Real Colegio, Ignacio Lacaba, empleándose no sólo partes naturales disecadas, sino también las excelentes láminas de los atlas de anatomía de los reconocidos obstetras de la época William Smellie y William Hunter, probablemente por la imposibilidad de encontrar cadáveres que mostrasen las diferentes situaciones del

feto en los distintos estados del embarazo. Los nuevos conocimientos descubiertos sobre la gestación y el parto, tanto normales como problemáticos, y también los relacionados con la morfología gestacional, solían ir acompañados de imágenes dibujadas por los mejores grabadores y muy probablemente su iconografía influyó en la creación de los modelos tridimensionales de cera que componen la colección madrileña objeto de estudio [18, 20]. En concreto, el tratado de Smellie, *A Sett of Anatomical Tables, with Explanations and an Abridgement of the Practice of Midwifery: With a View to Illustrate a Treatise on That Subject, and Collection of Cases*, publicado por primera vez en Londres, en 1754, contiene láminas grabadas por el inglés Charles Grignion que fueron realizadas a partir de los dibujos hechos por Jan van Riemsdyck, tomados directamente de los cadáveres de mujeres embarazadas que el obstetra diseccionaba [21].

Selección del modelo anatómico

En primer lugar, se procedió a seleccionar un modelo anatómico con el fin de estudiar sobre él los métodos de intervención basados en tecnologías digitales que se pretendían evaluar. Para ello, se examinaron los modelos de cera que componen la colección del Museo de Anatomía “Javier Puerta” de la Universidad Complutense de Madrid. De entre todos los ellos, se seleccionaron inicialmente aquéllos que habían perdido algún elemento significativo. Finalmente, se escogió para el estudio la figura denominada *Parto de Frente* (n.º ref. MAJP000145). Esta obra se eligió debido a los importantes daños de carácter estructural y estéticos que presentaba: con pérdida del ante-pie derecho y del miembro superior izquierdo, debido probablemente al uso derivado de la función original que desempeñaba el modelo, a una manipulación inadecuada o a una caída

o golpe durante traslados de la colección en diferentes momentos históricos (Figura 1).

Materiales y técnica de manufactura

Se trata de una figura de bulto redondo, hueca, con unas dimensiones de 39,5 × 28,3 × 28,4 cm. Desde el punto de vista anatómico, representa un feto dentro del útero materno durante el periodo de alumbramiento, con una presentación poco habitual en la que el cuello está hiper-extendido, siendo la frente, la zona más adelantada en el canal del parto.

En cuanto a la técnica de ejecución seguida por los escultores, es posible recrear el método de trabajo en el gabinete anatómico a partir de la descripción detallada del funcionamiento del mismo recogida en el libro de Bonells y Lacaba, publicado en 1800: en la sección última del libro V, dedicada al arte de trabajar piezas de cera, se cita el uso de diversos materiales, como la cera de abejas, tanto virgen como blanqueada, a la que se adicionaban trementina de Venecia y manteca de cerdo, en diferentes proporciones, para elaborar las distintas pastas con las que modelaban las esculturas [18, 22]. Los artífices del modelo anatómico, Cháez y Franceschi, emplearon cera roja de desecho, por su elevada proporción de resina, para aquellas partes de la obra que debían soportar el peso del conjunto y aumentaron la cantidad de grasa animal con la finalidad de imitar la transparencia de la placenta. La coloración de cada parte anatómica fue lograda por medio de la adición a la masa de pigmentos previamente molidos y aglutinados con aceite, y en algunas zonas aplicaron veladuras locales directamente sobre la superficie cérica para matizar el tono y recrear detalles. Para la elaboración de la figura del feto es muy probable que Cháez modelase un boceto en barro o en cera roja y, sobre este primer modelo escultórico, hiciese junto con el modelador italiano Franceschi, los moldes de yeso siguiendo la



Figura 1. Juan Cháez y Luigi Franceschi, *Parto de Frente*, siglo XVIII. Fotografías: Toya Legido.

tradición de taller para verter en su interior las pastas previamente preparadas y obtener el positivo final [23]. Extraída la figura de cera y eliminadas las posibles imperfecciones propias del proceso técnico, así como las rebabas de las juntas, con ayuda de un pincel blando impregnado en esencia de trementina, añadieron algunos detalles anatómicos modelando directamente la cera e incorporaron pelo humano en la cabeza, para conseguir un efecto más realista en el acabado del modelo.

Búsqueda de fuentes documentales

Una vez seleccionado el modelo anatómico para el estudio, se trataron de localizar en el museo los fragmentos de las partes deterioradas de la escultura que hubieran podido quedar de ellas, así como los moldes que los artífices que trabajaron en el gabinete anatómico utilizaron para su elaboración. Dado que no fue posible hallar ninguno de éstos, se buscaron entonces imágenes fotográficas de archivo en las que apareciese la obra en su estado original, con el fin de tener alguna referencia para la reconstrucción, pero tampoco se pudo encontrar ninguna. Finalmente, se optó por investigar si existía en su defecto alguna lámina anatómica en la que se pudieran haber basado los autores, ya que éste era un proceder habitual en el arte de la ceroplástica. De este modo, pudo localizarse la ilustración que probablemente fue utilizada como referencia, denominada “Plate XXV”, incluida en el atlas anatómico de Smellie (Figura 2) [21].

Por otra parte, debido a que la figura seleccionada pertenece a una serie de modelos anatómicos obstétricos que representan diferentes posiciones fetales durante el parto, se estudió cómo habían sido representadas las extremidades superiores e inferiores en el resto de las esculturas que conforman la colección del museo, y también sus posiciones, para tratar de deducir el aspecto que debían tener las partes ausentes y su disposición.

Digitalización del modelo original de cera *Parto de Frente*

Como paso previo a la reconstrucción virtual del modelo, se consideró la necesidad de digitalizar la obra original para poder añadir sobre ésta las partes ausentes mediante un programa de modelado 3D. Con este objetivo, se recurrió a la técnica de la fotogrametría, realizándose 260 fotografías del modelo, todas ellas desde diferentes puntos de vista; se empleó una mesa giratoria sobre la cual se ubicó el modelo de cera y se instaló un fondo blanco en la escena. Las imágenes fotográficas se registraron con una cámara digital réflex Canon, EOS 5D Mark II, de 21 megapíxeles. Todas ellas se capturaron en formato RAW. Con el fin de evitar sombras indeseadas se iluminó la escena con luz difusa mediante varios flashes de pantalla y para reducir los brillos sobre el modelo se utilizó un filtro polarizador.

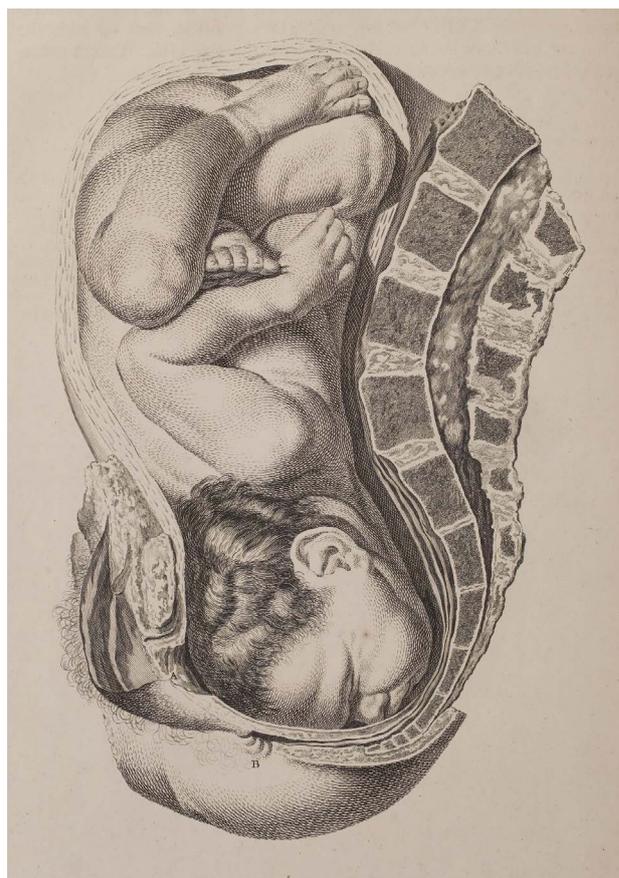


Figura 2. “Plate XXV”, William Smellie, 1754 [21].

Las imágenes se revelaron en Adobe Camera RAW, reduciendo en lo posible las sombras y los brillos sobre el modelo. Para ello, se utilizó un ordenador de tipo PC, con procesador Intel Core i7-6800k de 3,4 GHz y 64 GB de RAM, que incorporaba una tarjeta gráfica con 8 GB de memoria dedicada.

Los archivos se guardaron en formato JPG para su posterior procesamiento en *Agisoft Photoscan*, de modo que se pudiera obtener el modelo 3D y la correspondiente textura. Una vez importados los archivos en dicho programa, se procedió en primer lugar a su alineamiento, para lo cual se utilizó el ajuste de máxima precisión (Figura 3). A continuación, se calculó la “nube de puntos densa”, que contiene todos los puntos que van a ser considerados para la generación de la malla tridimensional. Para esta fase se seleccionó la opción de procesamiento en calidad “Extra alta”.

Tras la obtención de la nube densa, se realizó una limpieza exhaustiva de ésta para eliminar todos aquellos puntos que no pertenecían al modelo original y posteriormente se creó, a partir de ella, la malla 3D, seleccionando para ello la opción de máxima calidad (Figura 4). Se exportó este modelo al programa de modelado orgánico *Pixologic ZBrush* para reparar algunos errores de la malla debidos fundamentalmente a la existencia de huecos profundos y estructuras extremadamente finas en el modelo original (Figura 5). Para conseguir que el modelo digital

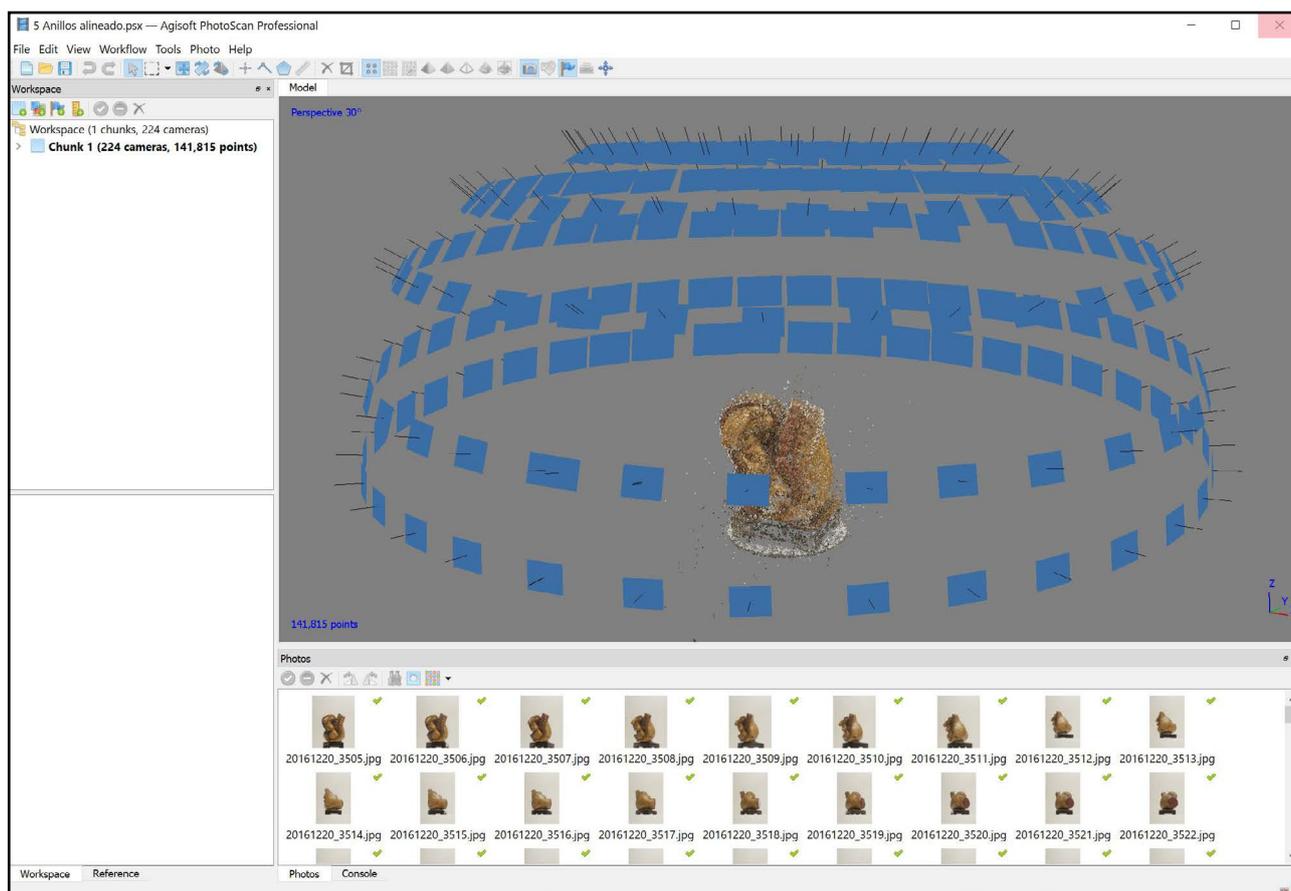


Figura 3. Alineamiento de imágenes y creación de nube de puntos dispersa en *Agisoft Photoscan*.

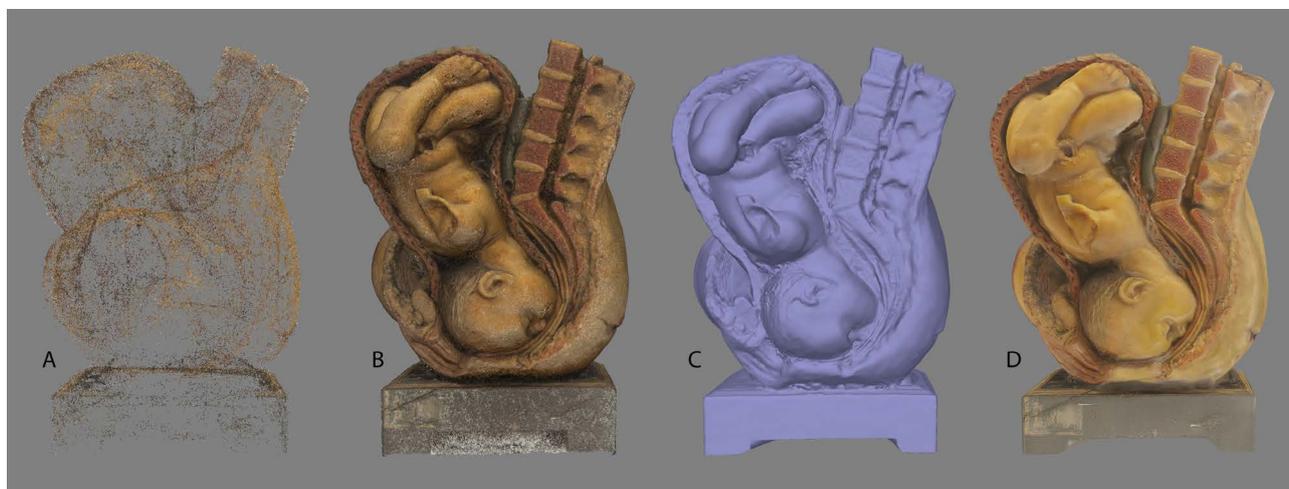


Figura 4. Fases del levantamiento fotogramétrico en *Agisoft Photoscan*: a) nube de puntos dispersa; b) nube de puntos densa; c) malla 3D; d) Malla 3D con textura fotográfica aplicada.

tuviera exactamente las mismas dimensiones que la figura de cera original, se procedió a modificar su escala en *ZBrush*, creando en este programa diferentes segmentos con las medidas previamente tomadas entre distintos pares de puntos del modelo de cera (Figura 6). Con la intención de obtener un mejor ajuste de la textura fotográfica en el modelo 3D y facilitar su edición, se realizó una copia del mismo en *ZBrush*, que se sometió a continuación un

proceso de retopología en este programa, reduciéndose asimismo el número de polígonos de la malla (Figura 7). Se procedió al mapeado UV de la figura, proceso mediante el cual se establece una correspondencia entre los polígonos de la malla y la textura fotográfica que le otorga su aspecto material. Este proceso es esencial para que la imagen se proyecte adecuadamente sobre la superficie y no se produzcan estiramientos o compresiones de ésta. La copia

se subdividió entonces para proyectar sobre ella todos los detalles del modelo obtenido por fotogrametría (Figura 8). El nuevo modelo 3D obtenido se exportó nuevamente a *Agisoft Photoscan* para proyectar sobre él la textura creada a partir de las 260 tomas fotográficas.

Reconstrucción virtual

Para modelar las partes ausentes del modelo, se volvió a llevar la malla 3D a *ZBrush*, donde se crearon virtualmente el pie derecho y el miembro superior izquierdo. En el caso

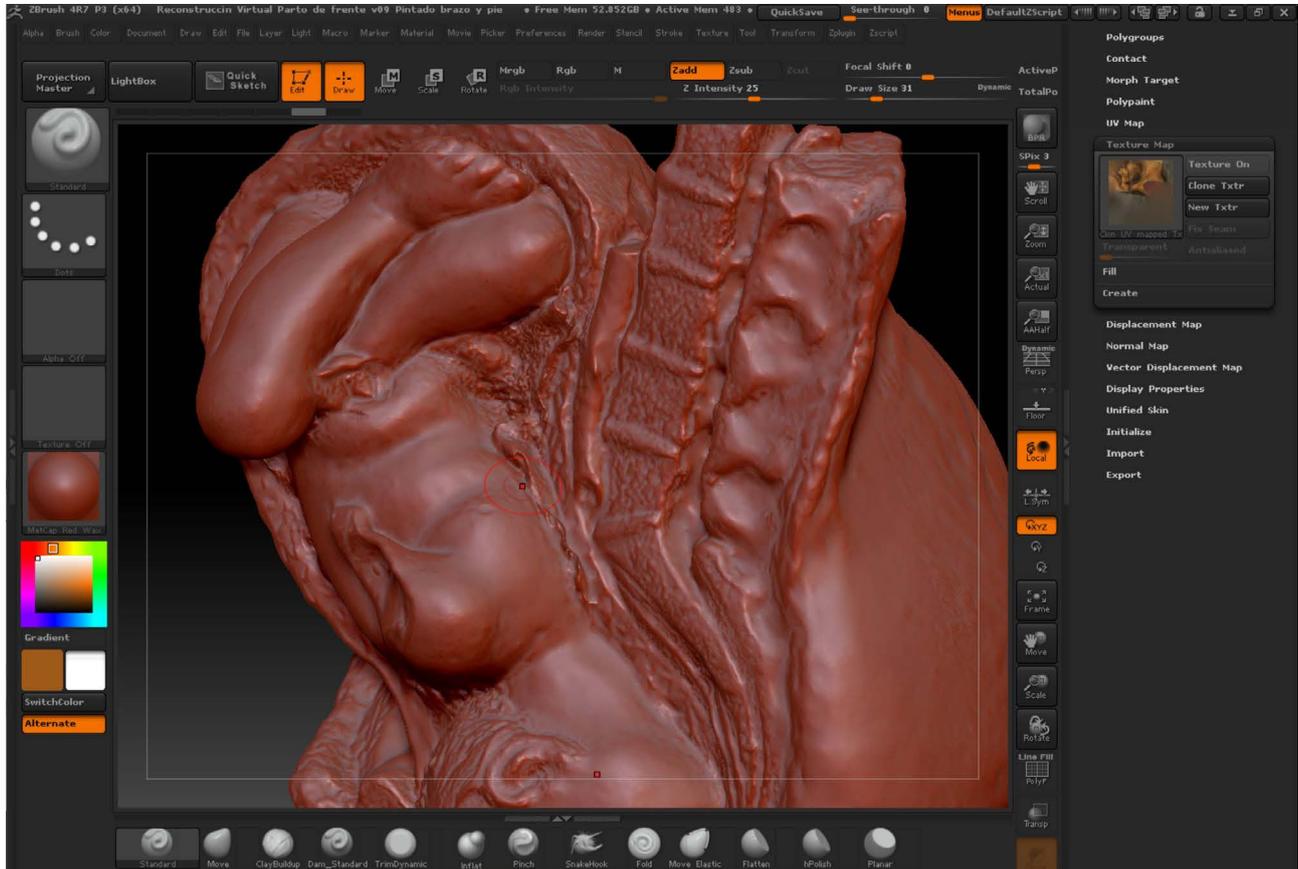


Figura 5. Reparación de errores de malla en *Pixologic ZBrush*.



Figura 6. a) Toma de medidas del modelo original. b) Establecimiento de la escala correcta en *Pixologic ZBrush*.

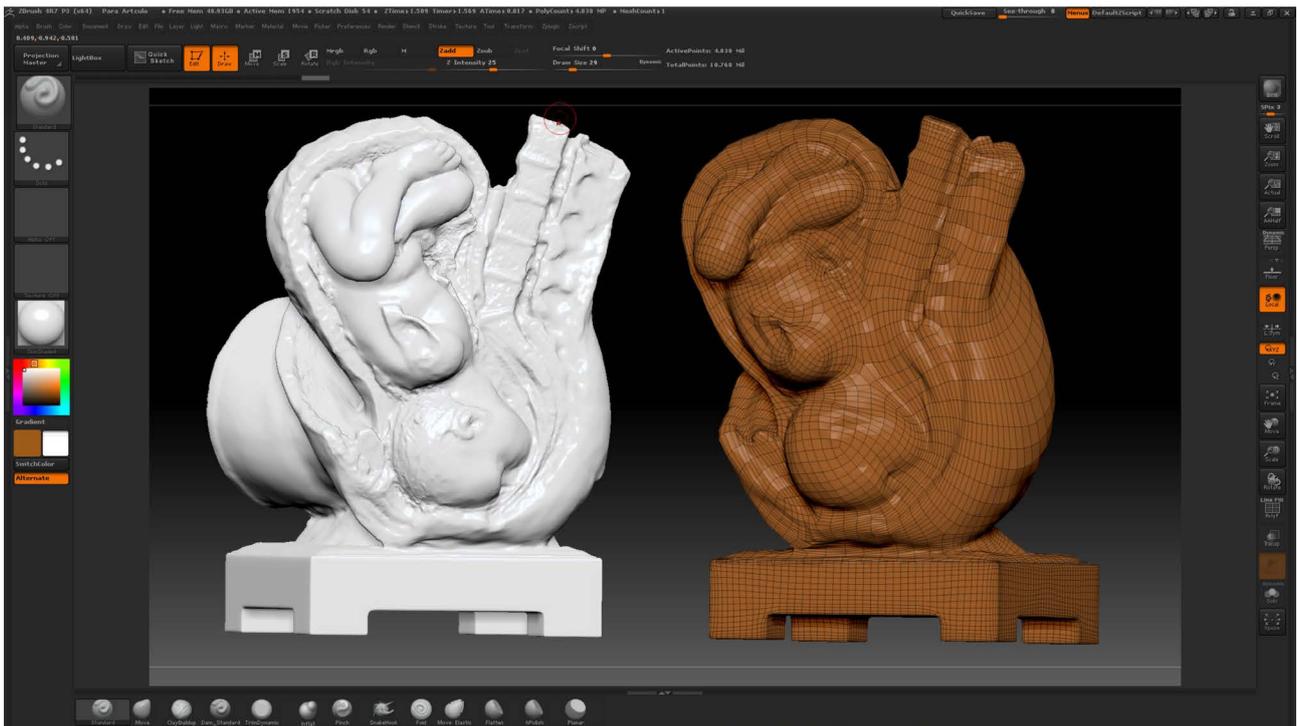


Figura 7. Proceso de retopología en Pixologic ZBrush.

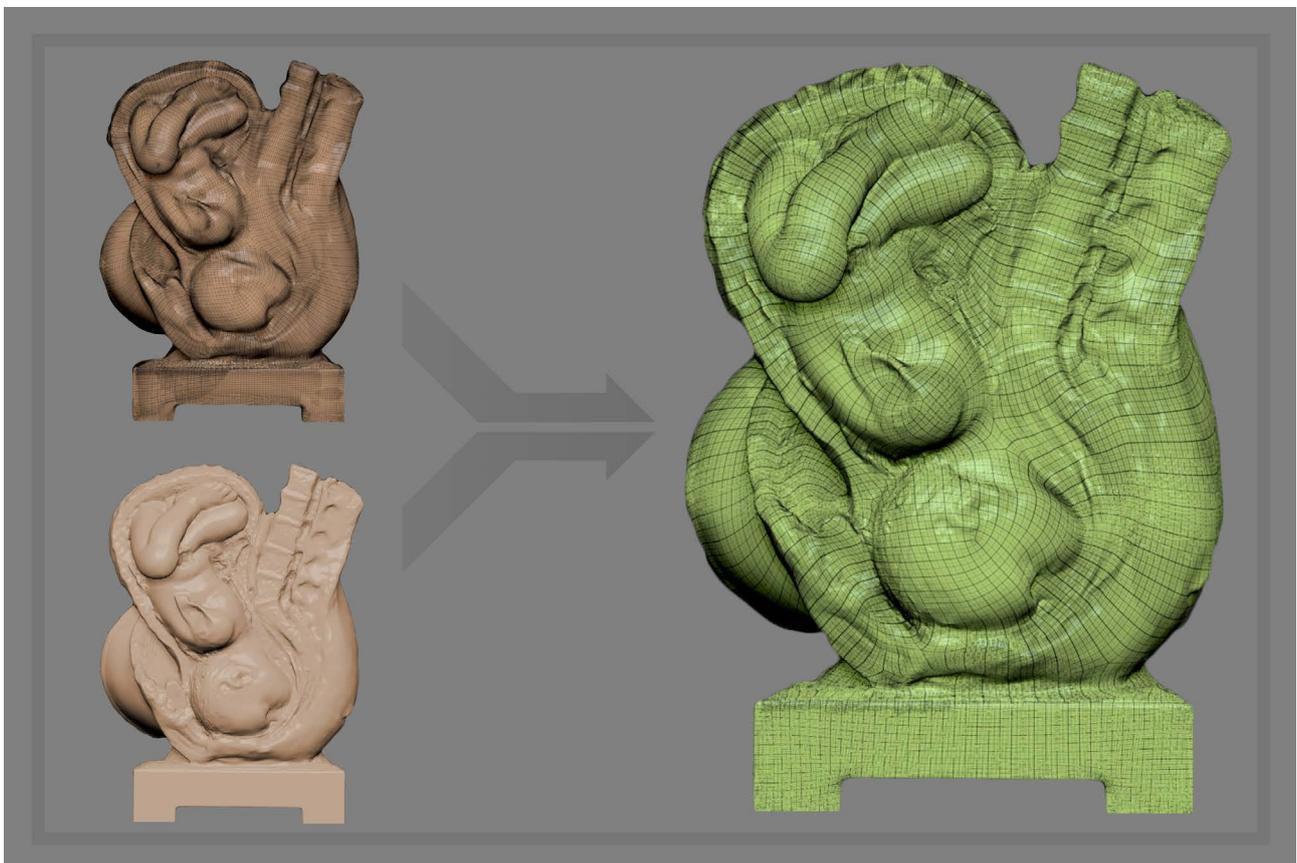


Figura 8. Proyección del detalle desde el modelo digitalizado en Photoscan sobre la copia que se trató en Pixologic ZBrush.

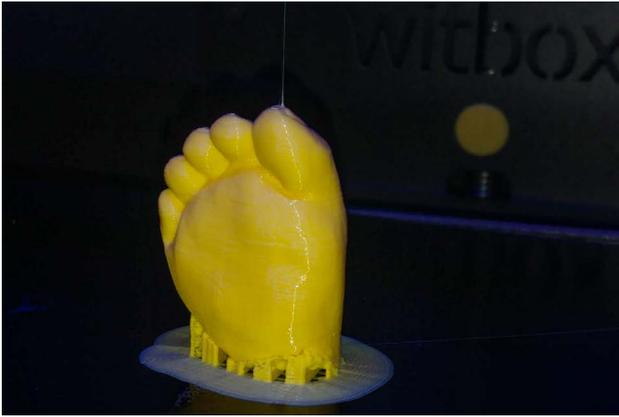


Figura 9. Obtención de una copia del pie derecho del modelo mediante impresión 3D.

del pie, éste se clonó directamente a partir del derecho, que se había conservado, y a continuación se invirtió de forma simétrica, ajustando luego su forma a la del área de fractura. El brazo, antebrazo y mano izquierdos fueron modelados desde cero con las herramientas de escultura digital que posee el programa.

La base de madera sobre la que reposa la figura del feto tuvo que ser modelada nuevamente en *ZBrush* debido a que las zonas inferiores no quedaron bien registradas durante el proceso de fotogrametría, al no haberse podido tumbar o invertir la obra para fotografiarlas correctamente a causa de la extrema fragilidad que presentaba el material céreo.

Impresión 3D

A partir de la reconstrucción virtual del modelo, se realizaron copias físicas de los elementos ausentes me-

dante impresión 3D, con el fin de comprobar que se ajustaban de manera adecuada a la figura de cera. Para su impresión 3D, el modelo se exportó en formato STL y se editó en el programa de laminado *Ultimaker Cura*, donde se especificaron los parámetros necesarios para una correcta reproducción: filamento de ácido poliláctico (PLA) de 1,75 mm, altura de capa de 0,2 mm, temperatura de fusión de 205 °C y velocidad de impresión de 50 mm/s. Con la configuración descrita, se generó un archivo de tipo GCode, que contiene las órdenes que la impresora debe interpretar para realizar la reproducción. Este fichero se grabó en una tarjeta de memoria SD que se insertó en la impresora 3D, una máquina modelo Witbox, de la empresa BQ. Una vez reproducida la pieza (Figura 9), se repasó para eliminar los soportes y rebabas derivados del proceso de impresión.

Concluida la reproducción de todas las partes ausentes de la obra original, se comprobó el ajuste perfecto de estas piezas en el modelo de cera y se crearon los moldes necesarios para su reproducción final con una nueva pasta de cera

Obtención de los moldes por impresión 3D

Para obtener las reproducciones definitivas a partir de las piezas reconstruidas virtualmente mediante modelado 3D en *ZBrush*, es necesario crear moldes para verter en su interior la cera líquida en sucesivas capas, según el método escultórico tradicional. En este estudio, hemos ensayado dos métodos de moldeado alternativos a los moldes de silicona tradicionales, que posteriormente hemos comparado con el fin de analizar su rapidez, exactitud y coste económico.

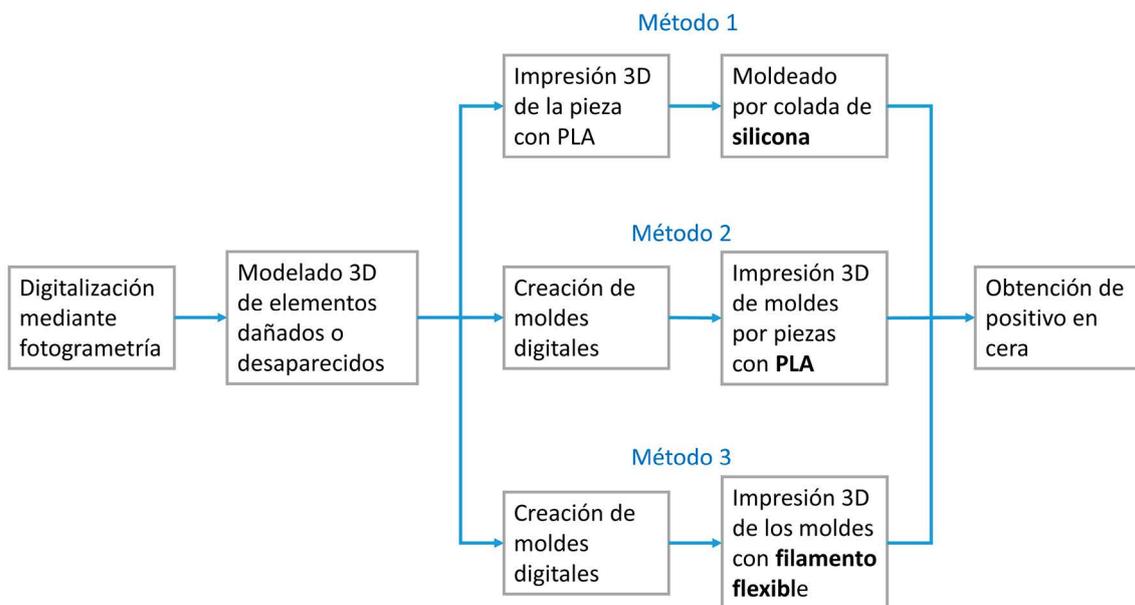


Figura 10. Esquema del proceso de reconstrucción del pie.

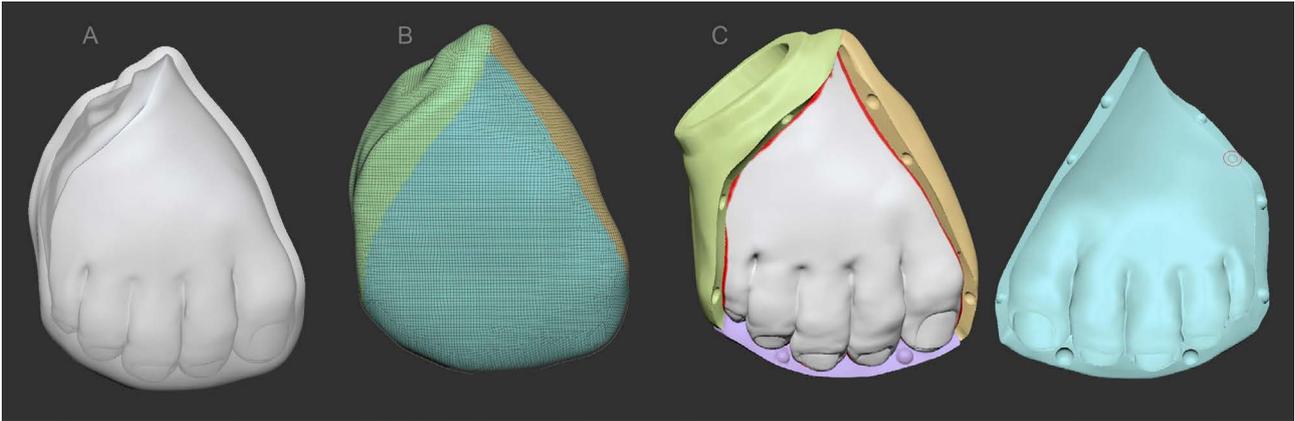


Figura 11. Elaboración en *ZBrush* de moldes por piezas para impresión con filamento de PLA: a) copia del pie aumentada un 10 % y suavizada para dejar una superficie externa lisa (compárese con la silueta del pie vista por transparencia); b) división del molde en piezas utilizando la función *Group from Polypaint*; c) molde por piezas una vez sustraído de cada una el volumen correspondiente al pie y añadidos los tetones para asegurar el correcto encaje de las mismas.

Método 1 – Moldes rígidos por piezas

El primer método de moldeado que se probó para el pie es totalmente novedoso en este tipo de intervenciones y se basó en la creación de moldes rígidos por piezas mediante un proceso puramente digital (Figura 10). Para ello se crearon moldes digitales de la pieza en *ZBrush* similares a los tradicionales de escayola. Con dicho fin, se realizó en *ZBrush* una copia de la malla 3D del pie, que más tarde se escaló un 10 % para hacerla ligeramente más grande y se dividió en varias secciones, de modo que todas tuvieran salida en la fase de desmoldeo. A todas ellas se les restó el volumen del pie para obtener su negativo digital (Figura 11). Adicionalmente, se realizó otra copia del pie, esta vez incrementada en un 30 %, a fin de generar los contramoldes. Para lograr la forma negativa interior de los éstos, se sustrajo a los mismos una copia de los moldes previamente creados, que se escaló un 2 % adicional para tener en cuenta un pequeño margen de ajuste entre los moldes y la madre o contramolde. Una vez obtenidos los moldes y contramoldes, éstos fueron reproducidos físicamente utilizando una impresora 3D con filamento de PLA de forma semejante a la descrita en el método anterior (Figura 12).



Figura 12. Moldes rígidos por piezas impresos en PLA.

Método 2 – Moldes flexibles

El segundo método ensayado para la creación de moldes del pie fue también digital y tampoco se han encontrado estudios de reconstrucción en los que se haya empleado. Consistió en la creación de moldes flexibles mediante impresión 3D. En este caso, se realizaron en *ZBrush* dos matrices digitales siguiendo una línea de división parecida a la utilizada en los moldes de silicona tradicionales. En primer lugar, se creó un prisma de base rectangular con un tamaño ligeramente mayor que el pie, en el que se realizaron algunos cortes para ajustar su forma a la de éste y dividiéndolo en dos partes, superior e inferior. Más tarde, se restó el volumen del pie a cada una de esas dos mitades para crear sendos negativos del empeine y la planta (Figura 13). Asimismo, se restó una pieza cónica creada a modo de embudo para facilitar la introducción de la cera durante la reproducción. Para finalizar, se crearon tetones en los bordes de los moldes digitales que favoreciesen el anclaje entre las diferentes piezas.

Se exportó el modelo a un formato STL, con el que se generó el correspondiente archivo GCode en *Ultimaker Cura* con una configuración adecuada para su reproducción con Filaflex, material flexible compatible con la impresora 3D Witbox. (Figura 14).

Método 3 – Moldes por colada de silicona

El último método experimentado para la creación de moldes del pie se basó en el proceso tradicional de molde por colada de silicona (Figura 15). Para ello, se construyó inicialmente una cama de plastilina que ocultaba aproximadamente la mitad de la pieza. Sobre ella se cavaron numerosos tetones en los bordes para asegurar que ambas mitades del molde ajustasen en la posición correcta durante el proceso de positivado. Asimismo, se colocaron tabiques de contención de plástico en los laterales y fondos, que fueron sellados con plastilina para evitar fugas del material. Una vez preparada la pieza, se vertió sobre ella

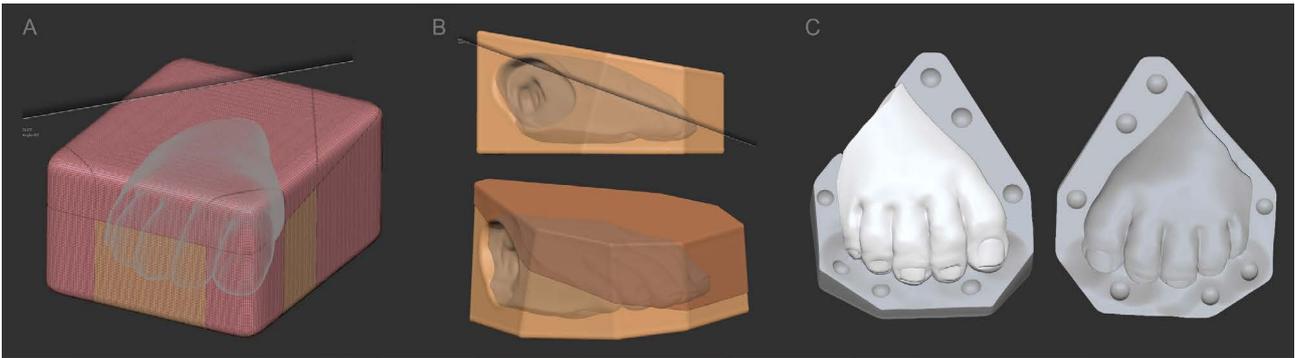


Figura 13. Elaboración en ZBrush de moldes para impresión con filamento flexible: a) realización de cortes para ajustar molde a la forma del pie; b) sección del molde para obtener pieza superior e inferior (también se ha perforado un orificio cónico para el vertido de la cera); c) piezas del molde una vez sustraído el volumen correspondiente al pie y creados los tetones para un adecuado ajuste entre ellas.

silicona específica para colada y se dejó curar durante 24 horas, tras lo cual se desmoldó. Tras eliminar algunas rebabas, se aplicó vaselina industrial sobre la mitad inferior del molde recién obtenida y se colocaron nuevamente los tabiques, vertiendo otra vez silicona suficiente para crear la mitad superior del molde siguiendo los mismos pasos.

Para la creación de los moldes de la extremidad superior izquierda se utilizó también un sistema de molde por colada de silicona (Figura 16).

Obtención de positivos en cera

Para la creación de la reproducción definitiva en cera, se utilizó el mismo método para los tres tipos de moldes, con algunas diferencias según el caso. En primer lugar, se aplicó vaselina industrial como agente desmoldante a todos los moldes. A continuación, se acoplaron unos con otros y se fijaron en la posición correcta mediante bandas elásticas y placas de madera en el caso de los moldes elásticos de silicona y Filaflex, y únicamente mediante bandas elásticas en el caso de los moldes rígidos por piezas.

Se creó una mezcla de cera de abeja blanqueada y sin blanquear en una proporción de 7:1 y se añadieron pigmentos para teñir la cera con un color similar al del modelo original. Previamente se hizo una serie de pruebas hasta hallar la mezcla adecuada. La mezcla de cera se calentó hasta una temperatura de 75 °C y se vertió en el interior de los moldes a través del orificio destinado para este fin, volteando continuamente el conjunto para distribuirla de forma homogénea. Trascurrido unos segundos, se vació el molde y se procedió a repetir la operación de llenado para crear varias capas con la cera fundida a temperaturas cada vez más bajas hasta llegar a la temperatura de fusión (65 °C). Por último, se dejó enfriar la cera durante 12 h y se abrieron los diferentes moldes para extraer las reproducciones. Estas copias fueron tratadas con el utillaje preciso para eliminar cualquier huella en su superficie derivada del proceso de impresión, así como las rebabas debidas a las uniones de los moldes.

Obtenidas las correspondientes reproducciones por cada uno de los tres métodos de moldeo anteriormente descritos, éstas se compararon entre sí analizando su calidad y la exactitud de la copia en relación con el modelo 3D de la zona reconstruida virtualmente, así como el tiempo y el coste de ejecución.

Resultados y conclusión

A partir del modelo anatómico de cera digitalizado mediante la técnica de fotogrametría, se creó un modelo



Figura 14. Molde del pie impreso en filamento flexible.



Figura 15. Moldes de silicona del pie.



Figura 16. Obtención del molde de silicona a partir de las piezas impresas.

virtual en tres dimensiones. La mayor parte de los detalles de su superficie quedaron registrados volumétricamente. Solo hubo fallos en la interpretación de los volúmenes de aquellas partes que eran extremadamente delgadas, como la membrana amniótica, de un espesor inferior a 1 mm, o en huecos muy profundos y angostos, donde no penetra la luz adecuadamente. También se apreció una ligera rugosidad generalizada en la superficie del modelo 3D, que fue interpretada como un ruido derivado de los brillos imposible de ser totalmente controlados durante la toma fotográfica.

La imagen de textura obtenida en *Photoscan* a partir de las imágenes fotográficas capturadas desde múltiples ángulos reflejaba adecuadamente los detalles cromáticos

de la figura de cera. Únicamente requirió ajustes manuales en una pequeña área del modelo debido a la sobreexposición que presentaba como consecuencia de algunos reflejos de luz que no pudieron anularse por completo al tomar las fotografías.

Las partes ausentes reconstruidas mediante modelado en *ZBrush* recogieron los principales detalles anatómicos y permitieron reproducir una textura superficial y un aspecto formal similar a los de los miembros que se han conservado en la escultura original (Figura 17).

La reproducción en PLA obtenida mediante impresión 3D registró correctamente toda la volumetría de la reconstrucción virtual de los miembros que habían sufrido daños. En su superficie se pudo apreciar una ligera trama lineal que se correspondía con la orientación de las capas durante su impresión. No se observaron irregularidades de la superficie debidas al descuelgue del material ni tampoco en las zonas de unión de los soportes con el modelo reproducido. La zona de junta de unas piezas con otras era relativamente poco evidente y muy estable. Ésta se pudo disimular con plastilina antes de la creación de los moldes.

Los extremos de las copias impresas de las extremidades reconstruidas encajaron de forma bastante fiel con los extremos proximales de éstas en la obra original, y no se apreció ninguna discrepancia entre las escalas de unas y de otras.

En cuanto a los moldes, los realizados en silicona a partir de la copia impresa de las áreas reconstruidas, se



Figura 17. Detalle de partes reconstruidas virtualmente (miembro superior izquierdo y pie derecho). El resultado muestra un acabado similar al del modelo original.

Tabla 1

Comparativa de los métodos de moldeo empleados

Sistema empleado	Tiempo de elaboración	Tiempo de impresión	Tiempo curado	Calidad registro	Facilidad desmoldeo	Coste de materiales*
Silicona	129 min	–	48 h	Alta	Alta	Medio
PLA por piezas	200 min	11 h 22 min	–	Alta	Alta	Bajo
Filaflex	35 min	6 h 23 min	–	Alta	Alta	Bajo

* Sin tener en cuenta los equipos informáticos necesarios.

desmoldaron con facilidad y no han presentado ningún tipo de artefacto en su superficie, recogiendo todos los detalles de la misma, incluida la fina trama lineal debida a la orientación de las capas durante la impresión (Tabla 1).

El molde rígido por piezas creado en *ZBrush* y reproducido mediante impresora 3D registró todos los detalles de los elementos reconstruidos, siendo también visible en su superficie la trama lineal antes mencionada. Las diferentes piezas de cada molde encajaron correctamente unas con otras.

Por último, los moldes elásticos creados mediante impresión con Filaflex capturaron bien la volumetría, aunque con una fidelidad al modelo reconstruido algo menor debido a que era más evidente la trama lineal que se generó por superposición de capas y también por la dificultad de eliminar los hilos que quedaron colgando entre algunas áreas durante el proceso de impresión con este material.

El desmoldeo fue sencillo en los tres casos, aunque requirió un mayor cuidado en el molde por piezas que en los realizados en materiales flexibles.

En relación al tiempo requerido para su elaboración, el proceso de creación de moldes rígidos por piezas digitales fue el más laborioso (3 h 20 min) debido al alto número de partes que lo componen y a una más compleja planificación de las divisiones a realizar (Tabla 1). A éste hay que sumarle también el tiempo de impresión de las piezas (11 h 22 min). Este procedimiento requirió, además, de un mayor tiempo de repaso de juntas de unión en la reproducción en cera. El tiempo de trabajo empleado para crear los moldes de filamento flexible fue el más bajo (35 min), sin contar el tiempo de impresión del molde (6 h 23 min), seguido del moldeo con silicona (1 h 55 min), aunque a este último hay que añadirle el tiempo necesario para imprimir una copia en PLA del modelo (2 h 9 min) y el tiempo de curado de la silicona, que fue de 24 h para cada pieza.

En cuanto al coste económico, siempre que se cuente con una impresora 3D, el gasto resulta algo menor en los dos métodos de moldeo digital que en el tradicional debido a que el precio de la silicona es más elevado que el del PLA y el filamento flexible (Tabla 1).

Respecto a la reproducción en cera a partir de los moldes elaborados mediante los métodos que se acaban de comentar, en los tres casos se crearon con éxito las copias, siendo de una calidad similar en todos ellos, aunque en la obtenida a partir del molde realizado con Filaflex, de nuevo resultaron ligeramente más evidentes las líneas debidas a la orientación de las capas. No obstante, una vez suavizadas las copias, la calidad de todas ellas fue muy similar y la trama lineal desapareció por completo en todos los supuestos estudiados (Figura 18).

El uso de nuevas tecnologías de digitalización, modelado en impresión 3D ha permitido la reconstrucción de las áreas dañadas del modelo reduciendo al mínimo su manipulación y evitando por completo la aplicación de agentes químicos sobre su superficie para la creación de moldes. Se han conseguido acortar los tiempos de ejecución correspondientes a las distintas fases de la intervención, especialmente cuando se utilizan moldes de filamento flexible. También ha sido menor en ambos casos el coste económico del proceso. Por todo ello, se considera que la metodología aplicada en este trabajo puede ser una alternativa interesante para la realización de este tipo de tratamientos en colecciones ceroplásticas.

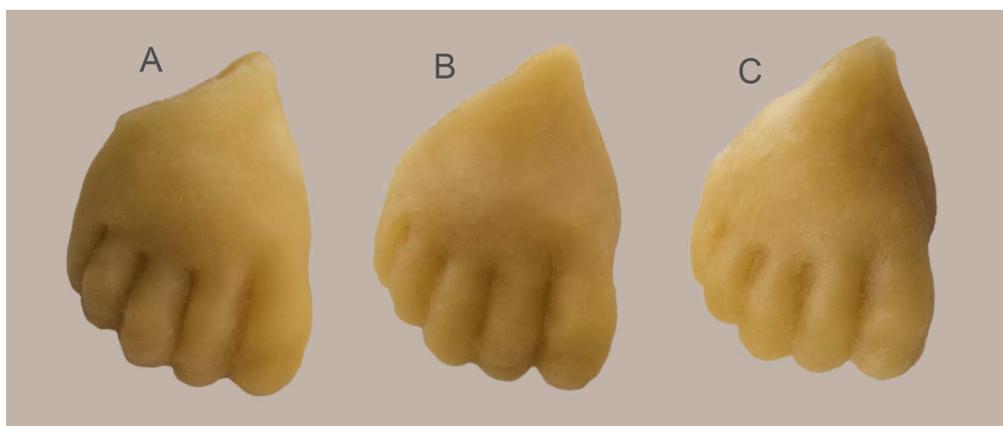


Figura 18. Comparación de las reproducciones del pie obtenidas por los 3 diferentes métodos de moldeo utilizados.

Agradecimientos

Investigación financiada dentro del Proyecto Santander-UCM Ref.: PR26/16-20322. Los autores quieren expresar su agradecimiento al profesor Fermín Viejo Tirado, Director del Museo de Anatomía “Javier Puerta” de la Facultad de Medicina, así como al Vicerrectorado de Extensión Universitaria, Cultura y Deporte de la Universidad Complutense de Madrid, por la colaboración prestada durante la realización de esta investigación.

ORCID

Alicia Sánchez-Ortiz

 <https://orcid.org/0000-0002-3358-1943>

Referencias

- De Chandarevian, S.; Hopwood, N. (eds.), *Models: The Third Dimension of Science*, Stanford University Press, Stanford (2004).
- Maerker, A., ‘Anatomizing the trade: designing and marketing anatomical models as medical technologies, ca. 1700-1900’, *Technology and Culture* **54**(3) (2013) 531-562, <https://doi.org/10.1353/tech.2013.0108>.
- Haviland, T. N.; Parish, L. C., ‘A brief account of the use of wax models in the study of Medicine’, *Journal of the History of Medicine and Allied Sciences* **25**(1) (1970) 52-75, <https://dx.doi.org/10.1093/jhmas/XXV.1.52>.
- Talairach-Vielmas, L., ‘Anatomical models: a history of disappearance?’, *Histoire, Médecine et Santé* **5** (2014) 9-20.
- ‘The Leiden declaration on human anatomy/anatomical collections’ (2012), International Conference on ‘Cultures of Anatomical Collections’, held at Leiden University, Leiden University, <http://media.leidenuniv.nl/legacy/leiden-declaration.pdf> (acceso en 2018-6-10).
- Pierdicca, R.; Frontoni, E.; Malinverni, E. S.; Colosi, F.; Orazi, R., ‘Virtual reconstruction of archaeological heritage using a combination of photogrammetric techniques: Huaca Arco Iris, Chan Chan, Peru’, *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage* **3**(3) (2016) 80-90, <https://doi.org/10.1016/j.daach.2016.06.002>.
- Scopigno, R.; Cignoni, P.; Pietroni, N.; Callieri, M.; Dellepiane, M., ‘Digital fabrication techniques for cultural heritage: a survey’, *Computer Graphics Forum* **36**(1) (2017) 6-21, <https://doi.org/10.1111/cgf.12781>.
- Di Paola F., ‘Digital technologies for virtual recomposition: the case study of Serpotta stuccoes’, *Journal of the Malta Chamber of Scientists* **3**(1) (2015) 63-68, <https://doi.org/10.7423/XJENZA.2015.1.09>.
- Charbonnier, B.; Laurent, C.; Blanc, G.; Valfort, O.; Marchat, D., ‘Porous bioceramics produced by impregnation of 3d-printed wax mold: ceramic architectural control and process limitations’, *Advanced Engineering Materials* **18**(10) 1728-1737, <https://doi.org/10.1002/adem.201600308>.
- Rodriguez, R. U.; Kemper, N.; Breathwaite, E.; Dutta, S. M.; Hsu, E. L.; Hsu, W. K.; Francis, M. P., ‘Deminerized bone matrix fibers formable as general and custom 3D printed mold-based implants for promoting bone regeneration’, *Biofabrication* **8**(3) (2016) 035007, <https://doi.org/10.1088/1758-5090/8/3/035007>.
- Arbace, L.; Sonnino, E.; Callieri, M.; Dellepiane, M.; Fabbri, M.; Iaccarino Idelson, A.; Scopigno, R., ‘Innovative uses of 3D digital technologies to assist the restoration of a fragmented terracotta statue’, *Journal of Cultural Heritage* **14**(4) (2013) 332-345, <https://doi.org/10.1016/j.culher.2012.06.008>.
- Dacome, L., *Malleable Anatomies. Models, Makers, and Material Culture in Eighteenth-Century Italy*, Oxford University Press, Oxford (2017).
- Azzaroli Puccetti, M. L., ‘Human anatomy in wax during the Florentine Enlightenment’, *Italian Journal of Anatomy and Embriology* **102**(2) (1997) 77-89.
- Maerker, A., *Models Experts: Wax Anatomies and Enlightenment in Florence and Vienna, 1775-1815*, Manchester University Press, Manchester (2011).
- Maerker, A., ‘Florentine anatomical models and the challenge of medical authority in late-eighteenth-century Vienna’, *Studies in History and Philosophy of Science* **43**(3) (2012) 730-40, <https://doi.org/10.1016/j.shpsc.2012.02.005>.
- Usandizaga, M., *Historia del Real Colegio de Cirugía de San Carlos de Madrid (1787-1828)*, Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Madrid (1948).
- Burke, M. E., *The Royal College of San Carlos. Surgery and Spanish Medical Reform in the Late Eighteenth Century*, Duke University Press, Durham (1977).
- Sánchez, A.; Del Moral, N.; Micó, S., ‘Entre la Ciencia y el Arte. Ceroplástica anatómica para el Real Colegio de Cirugía de San Carlos (1786-1805)’, *Archivo Español de Arte* **85**(340) (2012) 329-349, <https://doi.org/10.3989/aearte.2012.v85.i340.518>.
- ‘Libro de representaciones, respuestas y ordenanzas, y Reales Ordenes con arreglo a la ordenanza de cirugía. Madrid, 1787-1815’, manuscrito, Archivo General de la Universidad Complutense, Madrid, BH UCM, Mss 927.
- Massey, L., ‘Pregnancy and pathology: picturing childbirth in eighteenth-century obstetric atlases’, *The Art Bulletin* **87**(1) (2005) 73-91, <https://doi.org/10.1080/00043079.2005.10786229>.
- Smellie, W., *A Sett of Anatomical Tables, With Explanations and an Abridgement of the Practice of Midwifery: With a View to Illustrate a Treatise on That Subject, and Collection of Cases*, London (1754).
- Bonells, J.; Lacaba, I., *Curso Completo de Anatomía del Cuerpo Humano*, vol. 5, Imprenta de Sancha, Madrid (1800).
- Sánchez, A.; Matia, P., ‘Modelos plásticos o simulacros de carne. Procedimientos tecnológicos en la creación de esculturas en cera’, *De Arte* **15** (2016) 310-326, <https://doi.org/10.18002/da.v0i15>.

Recibido: 2018-1-29

Revisto: 2018-4-17

Aceptado: 2018-6-2

Online: 2018-6-11



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivar 4.0 Internacional.

Para ver una copia de esta licencia, visite

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.es>