UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID

FACULTAD DE BELLAS ARTES



TESIS DOCTORAL

Técnicas digitales 3D aplicadas a la conservación-restauración de colecciones con modelos anatómicos científicos: propuestas metodológicas alternativas y protocolos de mínima intervención

MEMORIA PARA OPTAR AL GRADO DE DOCTOR

PRESENTADA POR

Emanuel Sterp Moga

DIRECTORES

María Alicia Sánchez Ortiz
Óscar Hernández Muñoz

Madrid

© Emanuel Sterp Moga, 2024

UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID

FACULTAD DE BELLAS ARTES



TESIS DOCTORAL

Técnicas digitales 3D aplicadas a la conservación-restauración de colecciones con modelos anatómicos científicos: propuestas metodológicas alternativas y protocolos de mínima intervención

MEMORIA PARA OPTAR AL GRADO DE DOCTOR

PROGRAMA DE DOCTORADO EN BELLAS ARTES - D9AQ

PRESENTADA POR

Emanuel Sterp Moga

DIRECTORES

María Alicia Sánchez Ortiz
Óscar Hernández Muñoz



Tecnologías digitales 3D aplicadas a la conservación-restauración de colecciones con modelos anatómicos científicos:

Propuestas metodológicas alternativas y protocolos de mínima intervención

Memoria para optar al Grado de Doctor presentada por
Emanuel Sterp Moga

Directores:
María Alicia Sánchez Ortiz
Óscar Hernández Muñoz



A mi familia y a María

"Tempora mutantur et nos mutamur in illis".
Lotario I

ÍNDICE

Agradecimientos 12
Producción científica 16
Siglas utilizadas 23
Resumen 26
Abstract 27
1. INTRODUCCIÓN 29
1.1. Justificación 33
1.2. Hipótesis y Objetivos 35
1.2.1. Objetivo Principal 35
1.2.2. Objetivos Secundarios 36
1.3. Metodología general de investigación 37
1.3.1. Fase Teórica 37
1.3.2. Fase Experimental 38
2. ESTADO DE LA CUESTIÓN 42
2.1. Tecnologías 3D aplicadas a la documentación, el análisis y la divulgación del patrimonio cultural 42
2.1.1. Técnicas de escaneado 42
2.1.2. Técnicas de fotogrametría 47
2.1.2.1. Problemáticas, materiales y parámetros de configuración para la correcta documentación fotogramétrica 48
2.1.2.2. Otros sistemas y métodos de captura fotogramétrica 53
2.1.2.3. Gestión de color 56
2.1.3. Combinación del escaneado y la fotogrametría 59
2.1.4. Documentación científica, análisis y estudio de los datos virtuales 61
2.1.5. Restauraciones y reconstrucciones virtuales 67
2.1.5.1. Limpieza y reconstrucción del color virtual 68
2.1.5.2. Anastilosis 69
2.1.5.3. Reconstrucción virtual 69
2.1.6. Divulgación 3D mediante dispositivos de pantalla, RV, RA, RM e impresión 3D .. 72
2.1.6.1. Dispositivos de pantalla 72
2.1.6.2. Realidad Virtual 72
2.1.6.3. Realidad Aumentada 73
2.1.6.4. Realidad Mixta 74
2.1.6.5. Plataformas web 74

2.1.6.6. Impresión 3D 76
2.2. Técnicas digitales 3D aplicadas a los procesos de conservación–restauración 78
2.2.1. Reintegración cromática virtual 78
2.2.2. Análisis y seguimiento del proceso de limpieza 79
2.2.3. Diseño e implantación de prótesis para la adhesión de fragmentos 79
2.2.4. Réplicas obtenidas por medios de impresión 3D para ensayar intervenciones 81
2.2.5. Reintegraciones volumétricas impresas en 3D 81
2.2.6. Análisis de las características y materiales en los procesos de impresión 3D 84
2.3. Técnicas digitales 3D aplicadas a los procesos de conservación-restauración en modelos anatómicos científicos 85
3. MATERIALES Y MÉTODOS 97
3.1. Digitalización 3D mediante escáneres de luz estructurada 97
3.1.1. Características de los escáneres 97
3.1.2. Estrategias y parámetros de registro 99
3.1.3. Procesado de los modelos escaneados 100
3.2. Digitalización 3D mediante fotogrametría 103
3.2.1. Problemática de la fotogrametría aplicada a los modelos anatómicos científicos 103
3.2.2. Materiales y configuración de la captura fotográfica 104
3.2.3. Estrategias de captura 105
3.2.4. Tratamiento de la imagen: gestión del color y revelado digital 106
3.2.5. Procesado de los modelos fotogramétricos 108
3.3. Registro de patologías y procesos de conservación-restauración mediante cartografías digitales 3D 110
3.4. Análisis dimensional de la manufactura y del seguimiento del estado de conservación 112
3.5. Restauración virtual 113
3.5.1. Anastilosis virtual 113
3.5.2. Limpieza virtual 114
3.5.3. Reintegración volumétrica virtual 114
3.5.4. Reintegración cromática virtual 115
3.6. Diseño de moldes y estructuras auxiliares mediante el modelado digital 116
3.6.1. Modelado digital de los moldes 116
3.6.2. Modelado digital de las estructuras auxiliares 116
3.7. Difusión de los modelos anatómicos científicos 117
3.7.1. Fotorrealismo y renderizado 2D 117
3.7.2. Retopología y generación de mapas de textura en los modelos 3D 119

3.8. Caracterización de materiales de impresión 3D para la fabricación de moldes y obtención de positivos 120

3.8.1. Características de las impresoras 3D aditivas y su empleo 120

3.8.1.1. Impresión 3D FDM 120

3.8.1.2. Impresión 3D LFS 122

3.8.2. Características y uso de la máquina sustractiva: Mecanizado CNC 123

3.8.3. Configuración de la impresión 3D aditiva: análisis de los materiales y posiciones de fabricación para la obtención de moldes 124

3.8.3.1. Impresión 3D FDM 124

3.8.3.2. Impresión 3D LFS 126

3.8.4. Configuración de la máquina sustractiva: análisis del material ceroso y de la posición de fabricación 127

3.9. Ensayos mecánicos de tracción y flexión en materiales termoplásticos para la impresión 3D de estructuras auxiliares 130

3.9.1. Plan experimental 130

3.9.1.1. Diseño de probetas en ensayos de tracción 131

3.9.1.2. Diseño de probetas en ensayos de flexión 132

3.9.1.3. Procedimiento: Materiales y configuración de la impresión 3D en las diferentes probetas 132

3.9.1.4. Técnicas de caracterización 134

3.9.1.4.1. Ensayos de tracción 135

3.9.1.4.2. Ensayos de flexión 136

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN 139

4.1. Digitalización 3D mediante escáneres de luz estructurada y procesado de los modelos 139

4.2. Digitalización 3D mediante fotogrametría y procesado de los modelos 151

4.3. Análisis comparativo del modelo escaneado con el fotogramétrico 162

4.4. Registro de patologías y procesos de conservación-restauración mediante cartografías digitales 3D 163

4.5. Análisis dimensional de la manufactura y seguimiento del estado de conservación 169

4.5.1. Análisis dimensional 169

4.5.2. Seguimiento del estado de conservación 173

4.6. Restauración virtual 177

4.6.1. Anastilosis virtual 177

4.6.2. Limpieza virtual 179

4.6.3. Reintegración volumétrica virtual 182

4.6.4. Reintegración cromática virtual 183

4.7. Diseño de moldes y estructuras auxiliares mediante el modelado digital 188
4.7.1. Modelado digital de los moldes..... 188
4.7.2. Modelado digital de las estructuras auxiliares 189
4.8. Difusión de los modelos anatómicos científicos 195
4.8.1. Fotorrealismo y renderizado 2D..... 195
4.8.2. Retopología y generación de mapas de textura para la difusión de los modelos 3D 197
4.9. Caracterización de materiales de impresión 3D para la fabricación de moldes y obtención de positivos 202
4.9.1. Análisis de los materiales y posiciones de fabricación aditiva..... 202
4.9.1.1. Impresión 3D FDM 202
4.9.1.2. Impresión 3D LFS..... 216
4.9.2. Análisis del material ceroso y posiciones de fabricación mediante la máquina sustractiva: Mecanizado CNC..... 221
4.10. Ensayos mecánicos de tracción y flexión en materiales termoplásticos para la impresión 3D de estructuras auxiliares..... 226
4.10.1. Pruebas de tracción..... 226
4.10.1.1. Análisis de la posición y densidad de las probetas..... 226
4.10.1.2. Análisis de los diferentes materiales termoplásticos 230
4.10.2. Pruebas de flexión 236
4.10.2.1. Análisis de la posición y densidad de las probetas..... 236
4.10.2.2. Análisis de los diferentes materiales termoplásticos 238
5. LEGISLACIÓN, NORMATIVAS Y RECOMENDACIONES PARA LA DOCUMENTACIÓN, VIRTUALIZACIÓN E INTERVENCIÓN DEL PATRIMONIO CULTURAL 247
5.1. Criterios generales en procesos de conservación-restauración..... 247
5.2. Criterios específicos en procesos de conservación-restauración de modelos científicos 249
5.3. Criterios y usos de las tecnologías 3D en el patrimonio cultural 252
5.4. Recomendaciones para la gestión de los instrumentos digitales 3D aplicadas a las colecciones anatómicas científicas..... 256
6. CASOS DE ESTUDIO..... 259
6.1. Caso 1: Venus de Medici. Museo de Anatomía "Javier Puerta" (UCM). Documentación técnica, análisis de la manufactura y seguimiento del estado de conservación..... 261
6.1.1. Estado de conservación de la Venus de Medici en cera..... 265
6.1.2. Proceso de análisis de las esculturas 266
6.1.2.1. Digitalización 3D 266

6.1.2.2. Comparación volumétrica entre esculturas 270
6.1.2.3. Análisis del estado de conservación y técnica constructiva 284
6.1.3. Seguimiento de las alteraciones estructurales 289
6.1.4. Resultados y discusión 293
6.2. Caso 2: Versión Interna. Museo de Anatomía "Javier Puerta" (UCM). Creación de facsímil para el ensayo de las adhesiones mediante diversas estructuras auxiliares impresas en 3D 297
6.2.1. Estado de conservación de la Versión interna 299
6.2.2. Creación del facsímil y ensayo de las adhesiones mediante estructuras auxiliares. 301
6.2.2.1. Digitalización 3D 301
6.2.2.2. Anastilosis virtual y estudio de los tratamientos mediante estructuras auxiliares 302
6.2.2.3. Diseño e impresión 3D de los moldes para la creación del facsímil 304
6.2.2.4. Obtención del facsímil 307
6.2.2.5. Impresión 3D de las estructuras auxiliares 311
6.2.2.6. Ensayo de las adhesiones en el facsímil mediante las estructuras auxiliares ... 313
6.2.3. Intervención en la obra real 319
6.2.4. Resultados y discusión 321
6.3. Caso 3: Gestación de yeguas. Museo Veterinario Complutense. Digitalización e impresión 3D para la reconstrucción de elementos estructurales 326
6.3.1. Estado de conservación de las dos gestaciones de yeguas 326
6.3.2. Creación de las membranas amnióticas pérdidas 328
6.3.2.1. Digitalización 3D 328
6.3.2.2. Análisis de la técnica constructiva: comparación de las yeguas 330
6.3.2.3. Análisis de las posiciones de los potros y reintegración virtual de las membranas amnióticas perdidas 332
6.3.2.4. Impresión 3D de los moldes y reproducción de las membranas amnióticas 343
6.3.3. Intervención en la obra real 347
6.3.4. Resultados y discusión 350
6.4. Caso 4: Lengua clástica. Museo de Anatomía "Javier Puerta" (UCM). La restauración virtual como herramienta para analizar los tratamientos de conservación-restauración 353
6.4.1. Estado de conservación de la lengua clásica 354
6.4.2. Aplicación de la restauración virtual para la toma de decisiones 356
6.4.2.1. Digitalización 3D 356
6.4.2.2. Restauración virtual 357
6.4.2.2.1. Limpieza virtual 357
6.4.2.2.2. Reintegración cromática virtual 360

6.4.3. Intervención en la obra real 363
6.4.3.1. Ensayo de limpieza 363
6.4.3.1.1. Resultados y discusiones de los sistemas de limpieza 365
6.4.3.2. Aplicación en la obra real 366
6.4.3.2.1. Limpieza de la suciedad superficial y remoción de las películas filmógenas 366
6.4.3.2.2. Reintegración cromática 367
6.4.4. Resultados y discusión 371
6.5. Caso 5: Divulgación de los modelos anatómicos científicos. Exposiciones virtuales y complementación de las colecciones universitarias 374
6.5.1. Estrategias específicas de digitalización 3D para la correcta representación de la malla y la textura de color 375
6.5.2. Exposiciones virtuales 384
6.5.2.1. Propuesta 1. “La didáctica botánica en los modelos de Dr. Auzoux, É. Deyrolle y R. Brendel” 384
6.5.2.2. Propuesta 2. Complementación de los artefactos expositivos por medio de modelos digitales 3D. La extraordinaria anatomía de Dr. Auzoux 386
6.5.2.3. Propuesta 3. “Tecnologías 3D aplicadas al estudio y análisis de intervenciones sobre el patrimonio científico” 387
6.5.3. Resultados y discusión 388
7. CONCLUSIONES 390
Futuras líneas de investigación en estudios postdoctorales 396
Referencias bibliográficas 397

Agradecimientos

A lo largo de estos años de investigación, fueron numerosos los caminos recorridos llenos de retos. En cada uno de ellos, tuve el privilegio de encontrarme con personas ejemplares que generosamente compartieron sus conocimientos en cada paso que iba dando en esta andadura, personas a las cuales soy consciente de que estas palabras de gratitud no reflejan todo su esfuerzo, interés y dedicación. Sin todos ellos, este trabajo no hubiera sido posible.

De manera muy especial quisiera agradecer a mi mentora y directora de esta tesis doctoral la Prof. Dra. Alicia Sánchez Ortiz del Dpto. Pintura y Conservación-Restauración de la Facultad de Bellas Artes, en la Universidad Complutense de Madrid, por confiar en mí desde el primer momento, por apoyarme en todas mis etapas académicas, por compartir constantemente sus conocimientos conmigo, por animarme y guiarme a encauzar el camino de la investigación sobre las técnicas digitales 3D aplicadas a la conservación y restauración de modelos anatómicos didácticos, línea de trabajo que sin ella no se habría iniciado. Mi gratitud por su tiempo y disponibilidad, por tantas conversaciones y lecciones tan fructíferas, por todas las oportunidades y facilidades de seguir creciendo, por su esfuerzo, honestidad, implicación y consejos a lo largo de estos años. Su complicidad no solo ha enriquecido mi faceta profesional y académica, sino la personal. También quisiera agradecer al Prof. Dr. Óscar Hernández Muñoz de Dpto. Diseño e Imagen de la misma facultad, director de esta tesis doctoral, por su dedicación, tiempo, motivación, orientación, consejos, por estar siempre dispuesto para ofrecer su ayuda, por la confianza depositada en mí, por compartir sus conocimientos y experiencias conmigo acerca del uso de las tecnologías digitales 3D, por todos esos momentos. Os agradezco a ambos enormemente la posibilidad de formar parte del proyecto I+D+i, por facilitarme todos los recursos, por dármelo todo para desarrollar en equipo esta investigación. Mi admiración a ambos por hacerme partícipe en diferentes proyectos, seminarios, congresos y publicaciones y, por orientarme, a estructurar y publicar los resultados de esta investigación, así como por todas las lecturas y revisiones de los textos. Orgulloso y afortunado de haberos encontrado en este camino durante estos años en una etapa tan importante de mi vida. Por toda vuestra sabiduría, implicación, conversaciones y compañerismo, habéis enriquecido enormemente mi formación y me habéis hecho mejor persona. No podría haber tenido una mejor dirección, espero haber estado a la altura.

Al Prof. Dr. Javier del Río Esteban, del Dpto. Física de Materiales de la Facultad de Ciencias Físicas, Universidad Complutense de Madrid, por involucrarse en el ámbito de la conservación-restauración, por la enorme paciencia que ha tenido conmigo a causa de mis escasos conocimientos de física y por explicarme, tan bien y con tanta facilidad, todas las cuestiones y dudas. Gracias a su tiempo y conocimiento he descubierto un nuevo ámbito en el que pude profundizar sobre las propiedades físicas de determinados materiales de impresión 3D FDM mediante ensayos de tracción y flexión, así como observar su comportamiento durante el empleo en diversos tratamientos de conservación-restauración. Mi gratitud por apoyarme en una parte tan importante de la tesis; ha sido una experiencia inolvidable. Seguiremos navegando por estos mares. También quisiera agradecer a Carlos Romero Izquierdo, Técnico del Departamento de Física de Materiales de la Facultad de Ciencias Físicas, Universidad Complutense de Madrid, por su colaboración, por enseñarme el funcionamiento del laboratorio y de las máquinas, por todo su tiempo y dedicación.

Al Dr. José María Luzón Nogué, académico de la Real Academia de Bellas Artes de San Fernando de Madrid, por su calidad humana y generosidad a la hora de compartir su experiencia y sus conocimientos, y también por poner a mi disposición todos los medios necesarios para poder digitalizar algunas de las esculturas conservadas en la Academia para su posterior estudio comparativo con los modelos en cera policromada de las colecciones Complutense. Agradecer, sobre todo, su tiempo y sus conocimientos que ha compartido generosamente conmigo acerca de muchos aspectos profesionales, y otros no tanto, por contagiarme de vitalidad y energía para seguir aprendiendo y, por todas las colaboraciones y oportunidades futuras. Mi gratitud por hacerme participe de uno de los cursos de digitalización 3D impartidos en la Academia, ya que fue una grata experiencia tener a unos alumnos tan interesados que me mostraron la parte más bonita de la docencia. Ha sido un privilegio conocerle y aprender a su lado. También a la Prof. Dra. Judit Gasca Miramón, del Dpto. Pintura y Conservación-Restauración de la Facultad de Bellas Artes, en la Universidad Complutense de Madrid, por su apoyo, tiempo e interés prestado sobre estos temas tecnológicos, así como por la colaboración en la Real Academia de Bellas Artes de San Fernando de Madrid para llevar a cabo diversas digitalizaciones 3D.

Al Prof. Dr. Fermín Viejo Tirano, del Dpto. de Anatomía y Embriología Humana, y Director del Museo Anatómico "Javier Puerta" de la Facultad de Medicina, en la Universidad Complutense de Madrid, por su predisposición, dedicación y colaboración constantes en todos los trabajos abordados en los modelos tridimensionales anatómicos que forman parte de sus colecciones.

Al Prof. Dr. Joaquín Sánchez de Lollano Prieto, del Dpto. de Farmacología y Toxicología de la Facultad de Veterinaria, y Director del Museo Veterinario Complutense, por su esfuerzo, conocimientos, tiempo y, sobre todo, por su enorme implicación en la preservación y puesta en valor del conjunto de objetos que componen sus fondos, así como por facilitarme en todo momento el acceso a las piezas para poder llevar a cabo las diversas intervenciones de conservación-restauración en varios modelos anatómicos de cera y de papel maché. También al Prof. Dr. Manuel San Andrés Larrea, del Dpto. Farmacología y Toxicología, en la Universidad Complutense de Madrid, por su amabilidad y colaboración en las tareas de estudio de la colección durante la ausencia del Director.

A la Prof. Dra. Mónica Domínguez Gimbernat, del Dpto. de Medicina y Cirugía Animal, en la Universidad Complutense de Madrid, por las lecciones de anatomía sobre el proceso de los partos de las yeguas, por la colaboración prestada y por el tiempo dedicado a explicarme aspectos esenciales para poder efectuar con rigor algunas actuaciones de conservación.

Al Prof. Dr. Leopoldo García Sancho, del Dpto. de Farmacología, Farmacognosia y Botánica, Director de la Colección de Modelos Clásticos y Láminas Murales para la Enseñanza de la Botánica de la Facultad de Farmacia, Universidad Complutense de Madrid, por su apoyo en las labores de investigación. De manera muy especial, quisiera agradecer a José María Pizarro, conservador del Herbario y de la Colección de Modelos Clásticos y Láminas Murales para la Enseñanza de la Botánica, por su amabilidad al compartir conmigo sus conocimientos sobre la anatomía de las plantas, flores y frutos, por dedicarme su tiempo y, sobre todo, por la amabilidad cada vez que he tenido que acceder a los fondos para avanzar en mi investigación.

Al Prof. Dr. Francisco Javier Frutos Esteban, del Dpto. Sociología y Comunicación de la Facultad de Ciencias Sociales, en la Universidad de Salamanca, por recibirme con los brazos

abiertos y tratarme tan bien durante los meses de la estancia, por todo el intercambio de conocimientos, el tiempo prestado y las oportunidades de trabajar esta línea de investigación en conjunto para abordar futuros trabajos. Fueron unos meses de aire fresco en los cuales disfrute mucho de las colecciones científicas, de la ciudad y, por supuesto, de la compañía de todas las personas involucradas.

Al técnico del laboratorio de creación y fabricación digital de la Universidad de Salamanca (FabLab USAL), Juan Carlos Andaluz, por toda su ayuda, tiempo, predisposición, implicación e interés por los temas de estudio. Sus conocimientos sobre las diversas máquinas de impresión aditivas y sustractivas me han permitido avanzar en este trabajo. Fue un placer compartir todos esos momentos contigo. Asimismo, agradecer a Gustavo Sebastián Lannelongue Prof. del Dpto. Administración y Economía de la Empresa de la Facultad de Economía y Empresas, en la Universidad de Salamanca, Director del FabLab USAL, por todas las facilidades prestadas para avanzar en una parte concreta de la investigación, así como por la oportunidad de compartir diversos conocimientos a través de un curso específico de digitalización en el mencionado FabLab.

A la Prof. Dra. María Belén Peláez Pezzi, del Dpto. Anatomía e Histología Humanas de la Facultad de Medicina, en la Universidad de Salamanca, por su amabilidad e interés en explorar y aplicar nuevas herramientas virtuales para complementar la exposición permanente de ceras que allí se conservan. Mi gratitud por permitirme digitalizar un artefacto anatómico del Dr. Auzoux, que no solo me sorprendió enormemente por su calidad técnico-artística, sino que me ayudó a aprender muchísimo de anatomía humana. Gracias por las lecciones en la sala de disecciones, fue una experiencia inolvidable que me hizo reflexionar sobre bastantes cosas y por todos los conocimientos anatómicos que, sin duda, han enriquecido diferentes partes de este trabajo.

Al Prof. Dr. Luis Delgado Sánchez, del Dpto. Botánica y Fisiología Vegetal de la Facultad de Farmacia, Universidad de Salamanca, responsable de la colección botánica, por el interés mostrado hacia las posibilidades que brindan las nuevas tecnologías digitales 3D aplicadas a los modelos botánicos que allí se conservan, por su predisposición, amabilidad y conocimientos de la botánica. Aprendí y disfruté mucho de cada uno de los artefactos estudiados. Algunos supusieron todo un reto para lograr digitalizarlos fielmente y, por ello, fueron determinantes para avanzar en las estrategias de registro.

A todos los miembros del grupo de investigación *Arte, Tecnología, Imagen y Conservación del Patrimonio Cultural* Ref.: 970923, y especialmente al Prof. Dr. Luis Castelo Sardina, a la Prof. Dra. Toya Legido García y al Prof. Dr. Pablo Álvarez Couso, por el asesoramiento en relación con la fotografía digital y la gestión de color, entre otros aspectos, así como por brindarme la oportunidad de abordar la intervención de conservación-restauración en los modelos botánicos de la Colección de Modelos Clásticos para la Enseñanza de la Botánica, pertenecientes a la Facultad de Farmacia de la Universidad Complutense de Madrid, con motivo del proyecto expositivo *Herbarios Imaginados. Entre el arte y la ciencia*, llevado a cabo en el Centro de Arte Complutense (C-arte-C) del Museo del Traje, en Madrid.

A Javier Pérez Iglesias, Director de la Biblioteca de la Facultad de Bellas Artes, en la Universidad Complutense de Madrid, por resolver constantemente todas mis dudas y por hacerlo todo tan fácil.

A los técnicos de apoyo contratados con cargo al proyecto I+D+i, Alberto Carballo Núñez y Dra. Elena Rodríguez González de Canales, por el poco tiempo compartido pero enriquecedor, por esos momentos y la amistad.

A todo el colectivo de profesores del Máster en Patrimonio Virtual de la Universidad de Alicante, que durante el año 2019 compartieron conmigo sus experiencias y sus conocimientos acerca de las nuevas tecnologías digitales aplicadas al patrimonio. Fue una experiencia maravillosa y un punto clave para determinar las líneas de investigación en mi tesis doctoral.

Por último, y no menos importante quiero mencionar a diversas personas imprescindibles que han estado cerca de mí durante ese camino. Agradecer especialmente a mi pareja María Afuera, mi compañera de vida, que siempre ha tratado de ayudarme en numerosos momentos a lo largo de estos años y, no solo en este proyecto, sino en mi vida personal. Por todos los instantes en los que me ha hecho ver que hay otras cosas valiosas en la vida a las cuales hay que prestar más atención. Su energía positiva, amor, ánimos, generosidad, apoyo y consejos me han convertido en mejor persona. Mi gratitud por todas las cosas que he aprendido de ella y con ella, este camino lo hemos recorrido juntos, sin su aliento y fuerza, yo no estaría aquí. Afortunado de estar a su lado. Uno de sus granitos de arena se refleja en cada una de las portadas que ha diseñado. Agradecer el apoyo y cariño incondicionales por parte de mi familia, especialmente a mis padres Elena y Ioan, y a mi hermana Adela, por inculcarme que el esfuerzo es la clave para superar las dificultades, incluso las inimaginables; gracias por confiar en mí y por trasladarme constantemente fuerzas y ánimos durante estos años para alcanzar mis metas. A mis sobrinos Daniella y Aarón por los pequeños instantes donde sus sonrisas y travesuras me han llenado de felicidad durante estos primeros años de sus vidas. A mi otra familia por parte de mi pareja, a Sofía, Jesús, Merche y Manolo, por estar ahí animándome siempre. No puedo dejar de lado a mis inseparables gatos, Ñoqui y Bico, por elegir su sitio favorito junto a mí teclado y acompañarme durante tantas y tantas horas de trabajo, bueno, y por sus aportaciones puntuales (eiadamlacacttttttttttttttt). Vaya también los agradecimientos a mis amigos Cristi, Claudiu, Alberto, Tiago y Antonio; pese a la distancia, vuestro apoyo ha sido para mí muy importante. Todos habéis sido protagonistas de esta etapa y sé que nunca podré agradeceros estos momentos lo suficiente.

Sois el motor de este trabajo y de lo que soy.

Producción científica

La presente tesis doctoral se ha desarrollado dentro del marco del proyecto I+D+i *Metodologías innovadoras en conservación-restauración de colecciones científicas con modelos didácticos de botánica, anatomía humana y animal basadas en tecnologías 3D* (AMC-3dTech), Ref.: PGC2018-098396-B-100, y de la beca predoctoral FPI Ref.: PRE2019-087870. Los resultados de la investigación han dado lugar a diversas producciones científicas, tales como artículos en revistas indexadas, capítulos de libro en editoriales de reconocido prestigio, ponencias y pósteres en congresos nacionales e internacionales, conferencias en seminarios y cursos, así como a la intervención de conservación-restauración en las colecciones científicas pertenecientes a la Universidad Complutense de Madrid.

Beca predoctoral FPI

Ayudas para Contratos Predoctorales FPI (Ref.: PRE2019-087870), convocatoria 2019 para la formación de doctores contemplada en el Subprograma Estatal de Formación del Programa Estatal de Promoción del Talento y su Empleabilidad en I+D+i, en el marco del Plan Estatal de Investigación Científica y Técnica y de Innovación 2017-2020. Entidad financiadora: Ministerio de Ciencia e Innovación (España), FSE Fondo Social Europeo y la Agencia Estatal de Investigación. Duración: desde el 1 de octubre de 2020 hasta el 30 de septiembre de 2024.

Formación académica acerca de las tecnologías digitales 3D aplicadas al patrimonio

Máster en Patrimonio Virtual, Universidad de Alicante. 2018-2019.

Publicaciones modalidad artículos

- Óscar Hernández-Muñoz, Emanuel Sterp Moga, Alicia Sánchez-Ortiz. (2023). Estrategias innovadoras mediante escáner de luz estructurada para la digitalización en situaciones complejas de modelos anatómicos didácticos. *Ge-Conservación,* **23(1)**, (53-64). https://doi.org/10.37558/gec.v23i1.1110

- Óscar Hernández-Muñoz, Emanuel Sterp Moga, Alicia Sánchez-Ortiz. (2023). Stabilization of an Anatomical Wax Model of the Complutense Veterinary Museum with the Help of 3D Digital Technologies. *International Journal of Conservation Science* **14**(1), 45-56. ISSN: 2067-533X

- Óscar Hernández-Muñoz, Emanuel Sterp Moga, Alicia Sánchez-Ortiz. (2023). Analysing two techniques for the digitisation of historical collections of anatomical models: Photogrammetry from burst photography and videogrammetry. *HUMAN REVIEW. International Humanities Review / Revista Internacional De Humanidades*, **17**(5), 1–10. https://doi.org/10.37467/revhuman.v12.4762

- Alicia Sánchez-Ortiz, Emanuel Sterp Moga, Óscar Hernández-Muñoz. (2022). Natural versus artificial anatomy in science education: Visual supports and technological

innovations. *HUMAN REVIEW. International Humanities Review / Revista Internacional De Humanidades*, **12**(1), 1–17. https://doi.org/10.37467/revhuman.v11.3918

- Óscar Hernández-Muñoz, David Aranda Gabrielli, Amaya Maruri Palacín, Emanuel Sterp Moga, Alicia Sánchez-Ortiz. (2022). Virtualización de una muestra de modelos dermatológicos de cera del museo Olavide. *Anuario Electrónico de Estudios en Comunicación Social "Disertaciones"*, **16**(1), 1-20. https://doi.org/10.12804/revistas.urosario.edu.co/disertaciones/a.11714

- Emanuel Sterp Moga, Alicia Sánchez-Ortiz, Óscar Hernández-Muñoz. (2022). 3D printing of molds for the creation of facsimiles and volumetric reintegrations in wax anatomical sculptures. *Herit Sci* **10**, 199 (2022). https://doi.org/10.1186/s40494-022-00838-8

- Emanuel Sterp Moga, Óscar Hernández-Muñoz, Javier del Río Esteban, Alicia Sánchez-Ortiz. (2022). 3D digital technologies applied to the design and printing of auxiliary structures for fragment adhesion strategies on wax artifacts. *Herit Sci* **10**, 103. https://doi.org/10.1186/s40494-022-00737-y

- Emanuel Sterp Moga, Óscar Hernández-Muñoz, Alicia Sánchez-Ortiz. (2022). 3D scanning for comparative analysis of manufacture and deterioration tracking: a case study of the 18th century wax Venus de' Medici. *SCIRES-IT - SCIentific RESearch and Information Technology* **12**(1), 1-18. http://dx.doi.org/10.2423/i22394303v12n1p1

- Óscar Hernández-Muñoz, David Aranda Gabrielli, Amaya Maruri Palacín, Emanuel Sterp Moga, Alicia Sánchez-Ortiz. (2022). 3D Digital Technologies for the Elaboration of a Replica of a Dermatological Didactic Model Belonging to the Olavide Museum from the Original Mould. *Heritage*, **5**(2):702-715. https://doi.org/10.3390/heritage5020039

- Alicia Sánchez Ortiz, Óscar Hernández Muñoz, Emanuel Sterp Moga. (2021). Flora Artefacta. Historia, Tecnología y Conservación de la Colección de Modelos Botánicos Brendel en la Universidad Complutense de Madrid, en *Anales de Historia del Arte* **31,** 103-125. https://doi.org/10.5209/anha.78052

- Emanuel Sterp Moga, Óscar Hernández Muñoz, Alicia Sánchez Ortiz. (2020). Aplicación de fuentes de iluminación en modelos fotogramétricos para la diagnosis y restauración virtual de objetos en cera policromados. *Conservar Patrimonio* **38**, 10-21. https://doi.org/10.14568/cp2020021

Publicaciones modalidad capítulos de libro

- Emanuel Sterp Moga, Óscar Hernández Muñoz, Alicia Sánchez Ortiz. (2020). Protocolos innovadores mediante tecnologías 3D para la creación de un modelo de toma de decisiones en intervenciones de conservación sobre artefactos de cera. En D. Salvador Vives López (Dir o Ed.). *Investigando sobre tendencias en análisis de contenidos de vanguardia.* (429-440). Capítulo de libro. Editorial Tirant lo Blanch. ISBN: 978-84-18534-68-3

- Óscar Hernández Muñoz, Alicia Sánchez Ortiz, Emanuel Sterp. (2020). Posibles aplicaciones de la digitalización 3D en la conservación y restauración de colecciones

científicas: modelos anatómicos de cera. En Rafael Cabrera Collazo. (Ed.), *Rumbos atrevidos, pero necesarios: conversaciones entre innovación, arte y creatividad* (pp.129-139). Madrid, España: GKA Ediciones. ISBN: 978-84-15665-56-4

Participación en congresos nacionales e internacionales

- **Autor:** Emanuel Sterp Moga. **Título:** Técnicas digitales 3D aplicadas a los procesos de conservación-restauración en colecciones científicas. **Tipo de participación:** Oral. **Nombre del congreso:** *I Congreso Internacional Multidisciplinar de Estudiantes de Doctorado (CIMED)*. **Entidad organizadora:** Universidad de La Laguna. **Lugar:** Aula Magna de la Facultad de Ciencias, Sección de Física y Matemáticas de la Universidad de La Laguna (ULL). **Fecha:** del 22 al 24 de marzo de 2023.

- **Autores:** Emanuel Sterp Moga, Óscar Hernández Muñoz, Alicia Sánchez Ortiz. **Título:** Digitalización e impresión 3D para la reconstrucción de elementos estructurales. Recuperación de la funcionalidad en modelos anatómicos veterinarios del siglo XIX. **Tipo de participación:** Oral. **Nombre del congreso:** *IV Congresso Ibero-Americano Investigações em Conservação do Património (ICP)***. Entidad organizadora:** Universidad de Lisboa. **Lugar:** online. **Fecha:** del 12 al 18 de octubre de 2022.

- **Autores:** Alicia Sánchez Ortiz, Emanuel Sterp Moga, Joaquín Sánchez de Lollano, Óscar Hernández Muñoz; **Título:** Guía orientativa para la manipulación de modelos anatómicos clásticos: aplicación de tecnologías 3D en la preservación de colecciones científicas. **Tipo de participación:** Oral. **Nombre del congreso:** *IV Congresso Ibero-Americano Investigações em Conservação do Património (ICP)*. **Entidad organizadora:** Universidad de Lisboa. **Lugar:** online. **Fecha:** del 12 al 18 de octubre de 2022.

- **Autores:** Óscar Hernández Muñoz, Emanuel Sterp Moga, Alicia Sánchez Ortiz. **Título:** Fotogrametría a partir de ráfagas de imágenes para la digitalización de modelos anatómicos didácticos pertenecientes a colecciones históricas. **Tipo de participación:** Oral. **Nombre del congreso:** *Congreso Universitario Internacional sobre Contenidos, Investigación, Innovación y Docencia CUICIID.* **Lugar:** online. **Fecha:** 5, 6 y 7 de octubre de 2022.

- **Autores:** Alicia Sánchez Ortiz, Emanuel Sterp Moga, Óscar Hernández Muñoz. **Título:** La creación de modelos anatómicos didácticos: materialidad física del pensamiento científico. **Tipo de participación:** Oral. **Nombre del congreso:** *Congreso Universitario Internacional sobre Contenidos, Investigación, Innovación y Docencia CUICIID*. **Lugar:** online. **Fecha:** 5, 6 y 7 de octubre de 2022.

- **Autores:** Emanuel Sterp Moga, Óscar Hernández Muñoz, Alicia Sánchez Ortiz. **Título:** Protocolos innovadores mediante tecnologías 3D para la creación de un modelo de toma de decisiones en intervenciones de conservación sobre artefactos de cera. **Tipo de participación:** Oral. **Nombre del congreso:** *Congreso Universitario Internacional sobre Contenidos, Investigación, Innovación y Docencia CUICIID.* **Lugar:** online. **Fecha:** 7 y 8 de octubre de 2020.

- **Autores:** Emanuel Sterp Moga, Óscar Hernández Muñoz, Alicia Sánchez Ortiz. **Título:** Técnicas 3D combinadas en el diseño de embalajes para el transporte y almacenaje de colecciones con modelos de anatomía humana, animal y botánica. **Tipo de participación:** Oral. **Nombre del congreso:** *III Congresso Ibero-Americano Investigações em Conservação do Património (ICP)*. **Entidad organizadora:** Universidad de Lisboa y el Grupo Español GE-IIC. **Lugar:** online. **Fecha:** 24, 25 y 26 de septiembre de 2020.

- **Autores:** Emanuel Sterp Moga, Óscar Hernández Muñoz, Alicia Sánchez Ortiz. **Título:** Restauração virtual de um modelo de cera anatômica a partir da combinação de fontes de luz e gerenciamento de cores em modelos digitais 3D para registrar o estado de conservação e tomada de decisão. **Tipo de participación:** Comunicación oral. **Nombre del congreso:** *V Encontro Luso-Brasileiro de Conservação e Restauro.* **Entidad organizadora:** Universidad Catolica de Oporto. **Lugar:** Oporto. **País:** Portugal. **Fecha:** 9 y 10 de diciembre del 2019.

- **Autores:** Emanuel Sterp Moga, Óscar Hernández Muñoz, Alicia Sánchez Ortiz. **Título:** Protocolo para la conservación de objetos en cera: aplicación de tecnologías 3D en un modelo anatómico del siglo XVIII. **Tipo de participación:** Comunicación oral. **Nombre del congreso:** *Congreso Internacional de Ciencias Humanas.* **Entidad organizadora:** Global Knowledge Academics. **Lugar:** Madrid. **País:** España. **Fecha:** 2 y 3 de diciembre del 2019.

- **Autores:** Emanuel Sterp Moga. **Título:** Aplicación de técnicas digitales 3D: Protocolo de conservación y restauración de un modelo anatómico en cera del siglo XVIII. **Tipo de participación:** Comunicación oral. **Nombre del congreso:** *IV Congreso Final de Máster en Patrimonio Virtual.* **Entidad organizadora:** Universidad de Alicante. **Lugar:** Facultad de Filosofía y Letras, Alicante. **País:** España. **Fecha:** 19-07-2019.

Participación en ponencias/seminarios

- **Autores:** Emanuel Sterp Moga, Luis Delgado Sánchez, María Belén Peláez Pezzi. **Título del seminario:** IV Jornada de Patrimonio Científico. **Título ponencia:** Tecnologías digitales 3D aplicadas a las colecciones de modelos naturales de Botánica y Medicina de la Universidad de Salamanca. **Tipo de participación:** Oral. **Lugar:** Salamanca, España. **Entidad organizadora:** CaUSAL (Cultura académica, patrimonio y memoria social) y Red de Colecciones Científicas de la Universidad de Salamanca (RC2_USAL). **Fecha:** 25 de mayo de 2023.

- **Autor:** Emanuel Sterp Moga. **Título:** Técnicas digitales 3D aplicadas a la conservación-restauración de colecciones con modelos anatómicos científicos: Propuestas metodológicas alternativas y protocolos de mínima intervención. **Tipo de participación:** Comunicación oral. **Nombre de la jornada:** PhDay Complutense. **Lugar:** Facultad de Bellas Artes, Madrid. **País:** España. **Fecha:** 13-10-2022.

- **Autores:** Alicia Sánchez Ortiz, Emanuel Sterp Moga. **Título del seminario:** III Jornada de Patrimonio Científico: Colecciones universitarias y estrategias digitales. **Título ponencia:** Aplicación de tecnologías digitales 3D en la documentación y conservación de colecciones científicas didácticas. **Tipo de participación:** Oral. **Lugar:** Salamanca, España. **Entidad organizadora:** CaUSAL (Cultura académica, patrimonio y memoria social) y Red de

Colecciones Científicas de la Universidad de Salamanca (RC2_USAL). **Fecha:** 4 de mayo de 2022.

- **Autores:** Emanuel Sterp Moga. **Título del seminario:** 4TH Regional Conference APOYOnline. **Título:** Técnicas digitales 3D aplicadas a los procesos de conservación-restauración de modelos científicos. **Tipo de participación:** Oral-online. **Lugar:** Santo domingo, Dominican Republic. **Entidad organizadora:** APOYOnlin. **Fecha:** 15 de noviembre de 2021.

- **Autores:** Alicia Sánchez Ortiz, Emanuel Sterp Moga. **Título del seminario:** Claves para la Documentación, Conservación y Restauración del Patrimonio: Digitalización y Nuevas Tecnologías. **Título ponencia:** *Estrategias de digitalización y restauración virtual para la conservación de colecciones científicas didácticas.* **Tipo de participación:** Oral-online. **Entidad organizadora:** Universidad Nacional de Educación a Distancia UNED. **Fecha:** 11 de mayo de 2021.

- **Autores:** Alicia Sánchez, Luis Castelo, Óscar Hernández, Emanuel Sterp Moga. **Título del seminario:** jornada I+D PYC-R Conecta con las investigaciones del departamento de Pintura y conservación-restauración. **Título ponencia:** Metodologías innovadoras en conservación de colecciones científicas con modelos didácticos de botánica, anatomía humana y animal basadas en tecnología 3D. **Tipo de participación:** Oral-online. **Entidad organizadora:** Departamento de Pintura y conservación-restauración, Facultad de Bellas Artes, Universidad Complutense de Madrid. **Fecha:** 10 de marzo de 2021.

- **Autor:** Emanuel Sterp Moga. **Título:** Técnicas digitales 3D aplicadas a la conservaciónrestauración de colecciones con modelos anatómicos científicos: Propuestas metodológicas alternativas y protocolos de mínima intervención. **Tipo de participación:** Comunicación oral. **Nombre de la jornada:** Concurso Tesis en 3 minutos. **Lugar:** Facultad de Ciencias de la Información, Madrid. **País:** España. **Fecha:** 4-11-2021.

- **Autor:** Emanuel Sterp Moga. **Título:** Técnicas digitales 3D aplicadas a la conservación-restauración de colecciones con modelos anatómicos científicos: Propuestas metodológicas alternativas y protocolos de mínima intervención. **Tipo de participación:** Comunicación oral. **Nombre de la jornada:** PhDay Complutense. **Lugar:** Facultad de Bellas Artes, Madrid. **País:** España. **Fecha:** 14-10-2021.

- **Autor:** Emanuel Sterp Moga. **Título:** Técnicas digitales 3D aplicadas a la conservación-restauración de colecciones con modelos anatómicos científicos: Propuestas metodológicas alternativas y protocolos de mínima intervención. **Tipo de participación:** Comunicación oral. **Nombre de la jornada:** PhDay Complutense. **Lugar:** Facultad de Bellas Artes, Madrid. **País:** España. **Fecha:** 8-10-2020.

- **Autor:** Emanuel Sterp Moga. **Título:** Técnicas digitales 3D aplicadas a la conservación de colecciones científicas. Restauración virtual y Protocolos de conservación restauración en un modelo anatómico de cera. **Tipo de participación:** Comunicación oral. **Nombre de la jornada:** PhDay Complutense. **Lugar:** Facultad de Bellas Artes, Madrid. **País:** España. **Fecha:** 6-11-2019.

Premios otorgados

- 1er Premio, PhDay, Facultad de Bellas Artes, Universidad Complutense de Madrid. **Título:** Técnicas digitales 3D aplicadas a la conservación-restauración de colecciones con modelos anatómicos científicos: Propuestas metodológicas alternativas y protocolos de mínima intervención. **Tipo de participación:** Comunicación oral. **Fecha:** 13-10-2022.

- Accésit, PhDay, Facultad de Bellas Artes, Universidad Complutense de Madrid. **Título:** Técnicas digitales 3D aplicadas a la conservación-restauración de colecciones con modelos anatómicos científicos: Propuestas metodológicas alternativas y protocolos de mínima intervención. **Tipo de participación:** Comunicación oral. **Fecha:** 14-10-2021.

Cursos impartidos

- **Título del curso:** Introducción a la fotogrametría digital para la documentación 3D. **Lugar:** Edificio Peñuelas de San Blas, Universidad de Salamanca. **Entidad organizadora:** FabLab USAL. **Fecha:** 14-11-2021. **Horas impartidas:** 4.

- **Título del curso:** Fotogrametría Digital para Museos. **Lugar:** Sala Guitarte Virtual, Real Academia de Bellas Artes de San Fernando. **Duración:** del 20 al 30 de julio de 2021. **Horas impartidas:** 10.

Estancia breve en otros centros de investigación I+D españoles

- **Referencia ayuda FPI convocatoria 2019:** PRE2019-087870. **Organismo de I+D Emisor:** Universidad Complutense de Madrid. **Organismo de I+D Receptor:** Universidad de Salamanca. **Centro:** Instituto de Ciencias de la Educación. **Grupo de investigación receptor:** Cultura Académica, Patrimonio y Memoria Social" (CaUSAL). **Fechas:** del 19 de septiembre de 2022 al 19 de diciembre de 2022.

Conservación y Restauración de Colecciones Anatómicas Científicas

- Intervención de Conservación-Restauración en 17 modelos tridimensionales de la Colección de Modelos Clásticos para la Enseñanza de la Botánica, pertenecientes a la Facultad de Farmacia, Universidad Complutense de Madrid**.** Dicha actividad se desarrolló con el motivo del proyecto expositivo *Herbarios Imaginados. Entre el arte y la ciencia*, comisariada por Toya Legido y Luis Castelo. **Entidad organizadora y financiera:** Vicerrectorado de Extensión Universitaria, Cultura y Deporte. Universidad Complutense de Madrid **Duración:** 01-10-2019 al 20-12-2019.

  Relación de obras restauradas: *Schyzomicetes, Coccus.* Brendel Nº 10a, 1-5: MAF-BRENDEL nº 10a: 1-5/ UCM 4012655; *Claviceps purpurea* Tul. Brendel Nº 10g.4: MAF-BRENDEL nº 10g.4-OSTERLOH nº 44/ UCM 4012655; *Tilletia caries* Tul. Brendel Nº 10i: MAF-BRENDEL nº 10i-OSTERLOH/ UCM 4012655; *Populus nigra* L. Brendel Nº 51: MAF-BRENDEL nº 51/ UCM 4012655; *Hyoscyamus niger* L. Brendel Nº 65: MAF-BRENDEL nº 65/ UCM 4012655; *Parnassia palustris* L. Brendel Nº 98: MAF-BRENDEL nº

98/ UCM 4012655; *Drosera rotundifolia* L. Brendel Nº 130: MAF-BRENDEL nº 130/ UCM 4012655; *Marchantia polymorpha* L. Brendel Nº 138: MAF-BRENDEL nº 138/ UCM 4012655; *Marchantia polymorpha* L. Brendel Nº 139: MAF-BRENDEL nº 139/ UCM 4012655; *Marchantia polymorpha* L. Brendel Nº 143: MAF-BRENDEL nº 143/ UCM 4012655; *Scilla bifolia* L. Brendel Nº 147: MAF-BRENDEL nº 147/UCM 4012655; *Linum usitatissimum* L. Brendel Nº149 [illeg.]: MAF-BRENDEL nº 149/ UCM 4012655; *Foeniculum capillaceum Gilib.* Brendel *Nº 151 [illeg.]:* MAF-BRENDEL nº 151/ UCM 4012655; *Delphinium consolida* L. Brendel Nº 159: MAF-BRENDEL nº 159/ UCM 4012655; *Reseda odorata* L. Brendel Nº 162: MAF-BRENDEL nº 162/ UCM 4012655; *Theobroma cacao* L. Brendel Nº 197: MAF-BRENDEL nº 197/ UCM 4012655; *Arum maculatum* L. Brendel Nº 202: MAF-BRENDEL nº 202/ UCM 4012655.

- Intervención de Conservación-Restauración en 5 modelos tridimensionales pertenecientes al Museo de Anatomía "Javier puerta" y el Museo Veterinario Complutense., dentro del poryecto I+D+i *Metodologías innovadoras en conservación-restauración de colecciones científicas con modelos didácticos de botánica, anatomía humana y animal basadas en tecnologías 3D* (AMC-3dTech), Ref.: PGC2018-098396-B-100. **Duración:** 1-09-2020 al 30-07-2022.

Relación de obras restauradas: *Versión interna*. Real Colegio de Cirugía de San Carlos, Nº MAJP000328; *Gestación de yeguas*. Real Colegio Veterinario de Madrid, Nº MV-681 y MV-683; *Ligamento nucal*. Real Colegio Veterinario de Madrid, Nº MV-670; *Lengua clástica*. Dr. Auzoux, Nº MAJP 000081; *Pata de caballo*. Dr. Auzoux, Nº MV-836/1-9.

Siglas utilizadas

FDM (*Fused Deposition Modeling*, Modelado por Deposición Fundida)

LFS (*Low Force Stereolithography*, Estereolitografía de Baja Fuerza)

CNC (*Computerized Numerical Control*, Control Numérico Computarizado)

AATA (*Abstracts of International Conservation Literature*, Resúmenes de la Bibliografía Internacional sobre Conservación)

BCIN (*Bibliographic Database of the Conservation Information Network*, Base de Datos Bibliográfica de la Red de Información sobre la Conservación)

RV (Realidad Virtual)

RA (Realidad Aumentada)

RM (Realidad Mixta)

TLS (*Terrestrial Laser Scanning*, Escáneres Láser Terrestres)

CRLS (*Close-range Laser Scanning*, Escáner Láser de Objeto Cercano)

SLS (*Structured-light Scanning*, Escáneres de Luz Estructurada)

FMCW (*Continuous Wave Frequency Modulation*, Onda Continua de Frecuencia Modulada)

AHP (*Analytic Hierarchy Process*, Proceso de Jerarquía Analítica)

ICC (*International Color Consortium*, Consorcio Internacional del Color)

PDC (Profundidad de Campo)

PS (*Photometric Stereo*, Fotogrametría Estéreo)

GPS (*Global Positioning System*, Sistema de Posicionamiento Global)

CIE (*Commission internationale de l'éclairage*, Comisión Internacional de la Iluminación)

CRI (C*olor Rendering Index*, Índice de Reproducción Cromática)

FADGI (*Federal Agencies Digitization Initiative*, Iniciativa de Digitalización de las Agencias Federales)

DCP (*Digital Cinema Package*, Paquete de Cine Digital)

RGB (*Red, Green, Blue* - Rojo, Verde, Azul)

GIS (*Geographic Information System*, Sistema de Información Geográfica)

BIM (*Building Information Modeling*, Modelado de Información para la Construcción)

IS (*Information Systems*, Sistemas de Información)

UNESCO (*United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization*; Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura)

ICOMOS (*International Council on Monuments and Sites*, Consejo Internacional de Monumentos y Sitios)

GAN (*General Adaptive Neighborhood*, Entorno General Adaptativo)

OLAP (*Oriented Local Alphabetic Pattern*, Patrón Alfabético con Orientación Local)

MSCT (*Multislice Computed Tomography*, Tomografía Computarizada Multicorte)

WebGL (*Web Graphics Library*, Biblioteca de Gráficos Web)

HDR (*High Dynamic Range*, Alto Rango Dinámico)

PBR (*Physically Based Rendering*, Renderizado Basado en la Física)

SLA (*Stereo Litography Apparatus*, Aparato de Litografía Estereoscópic)

µSLA (Microstereolitografía)

SLS (*Selective Laser Sintering*, Sinterizado Selectivo por Láser)

MJ (*Material Injection*, Inyección de Material)

DED (*Directed Energy Deposition*, Deposición de Energía Directa)

LOM (*Laminated Object Manufacturing*, Fabricación Laminada)

ABS (*Acrylonitrile Butadiene Styrene*, Acrilonitrilo Butadieno Estireno)

PLA (*Polylactic Acid*, Ácido Poliláctico)

IPCE (Instituto del Patrimonio Cultural de España)

fps (*frames per second* - fotogramas por segundo)

LED (*Light Emitting Diode*, Diodo Emisor de Luz)

EV (*Exposure Value*, Valor de Exposición)

CHI (*Cultural Heritage Imaging*)

CCT (*Correlated Color Temperature*, Temperatura de Color Correlacionada)

SfM (*Structure from Motion*, Estructura a Partir del Movimiento)

IBM (*Image Based Modeling*, Modelado Basado en Imágenes)

RMS (*Root Mean Square*, Media Cuadrática)

HSV (*Hue, Saturation, Value*; Tono, Saturación, Valor)

CMYK (*Cyan, Magenta, Yellow y Black*, Cian, Magenta, Amarillo y Negro)

IOR (*Index of Refraction*, Índice de Refracción)

PVA (*Polyvinyl Alcohol*, Alcohol de Polivinilo)

FFF (*Fused Filament Fabrication*, Fabricación de Filamento Fundido)

STL (*Standard Triangle Language*, Lenguaje Triangular Estándar)

PETG (*Polyethylene Terephthalate*, Tereftalato de Polietileno)

ASA (*Acrylonitrile Styrene Acrylate*, Acrilonitrilo Acrilato de Estireno)

NYLSTRONG (*Polyamide with Fiber Glass*, Poliamida con Fibra de Vidrio)

HIPS (*Polystyrene and Polybutadiene Rubber*, Poliestireno y Caucho de Polibutadieno)

INNOVATEFIL POLYCARBONATE (*Polycarbonate*, Policarbonato)

PP (*Polypropylene*, Polipropileno)

INNOVATEFIL PA HT (*Polyamide*, Poliamida)

TPU (*Thermoplastic Polyurethane*, Poliuretano Termoplástico)

FLEX (*Polyurethane*, Poliuretano)

ISO (*International Organization for Standardization*, Organización Internacional de Normalización)

UNE (Una Norma Española)

INNOVATEFIL CO-POLYESTER (*Polycarbonate*, Policarbonato)

PA CF (*Polyamide with Carbon Fiber*, Poliamida con Fibra de Carbono)

MO (Microscopía Óptica)

SEM-EDX (*Scanning Electron Microscopy - Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy* / Microscopía Electrónica de Barrido - Espectroscopía de Rayos X de Energía Dispersiva)

FTIR (*Fourier Transform Infrared Spectroscopy* - Espectroscopía de Infrarrojos por Transformada de Fourier)

GC-MS (*Gas Chromatography - Mass Spectrometry* / Cromatografía de Gases - Espectrometría de Masas)

DOI (*Digital Object Identifier* / Identificador de Objeto Digital)

Resumen

Los avances científicos y tecnológicos que tuvieron lugar a finales del siglo XVIII y principios del XIX, favorecieron la colaboración estrecha entre campos de saber diversos. El enfoque inicial de la pedagogía científica implicaba la utilización de especímenes naturales. Estos iban acompañados de otros apoyos visuales como los grabados y las láminas anatómicas, de modo que los estudiantes pudieran comprender mejor las explicaciones durante las lecciones magistrales. Sin embargo, los especímenes naturales solían descomponerse rápidamente, lo que impedía, muchas veces, observar las estructuras anatómicas correctamente. En consecuencia, la búsqueda de sustitutos de las preparaciones propició la simbiosis de la ciencia y del arte con la creación de los modelos anatómicos artificiales tridimensionales. Dichos artefactos demostraron ser unas herramientas de gran utilidad, aunque, la evolución de los sistemas de enseñanza, con el paso del tiempo provocó su obsolescencia y consecuente abandono. El desgaste material como resultado de su funcionalidad original, junto con los inadecuados espacios de almacenamiento, han potenciado su crítico estado de conservación, suponiendo un gran reto para los conservadores y restauradores.

Por otra parte, los métodos tradicionales de estudio e intervención en obras de carácter escultórico resultan en ocasiones poco adecuadas por no adaptarse a las características singulares que tienen este tipo de objetos tan particulares. Partiendo de este contexto, la tesis doctoral plantea un exhaustivo análisis acerca del potencial de las tecnologías 3D basadas en la digitalización, la restauración virtual, el modelado virtual y la impresión 3D, con el fin de profundizar en las metodologías y criterios de aplicación, así como idear alternativas de tratamientos de conservación-restauración de diversa complejidad respetuosos con el criterio de la "mínima intervención".

El resultado de esta investigación comprende una fase experimental de ensayos con diversos materiales y métodos para abordar correctamente la documentación mediante la fotogrametría y el escaneado, la creación de cartografías 3D, los procesos de restauración virtual, el diseño y modelado de estructuras auxiliares y moldes, la caracterización de materiales termoplásticos para la impresión 3D de moldes y estructuras auxiliares, así como la difusión de algunos resultados mediante infografías 2D fotorrealistas y modelos 3D por medio de una plataforma web específica. Los ensayos empíricos han facilitado el desarrollo de diferentes protocolos con el fin de complementar el modelo de toma de decisiones y seleccionar los sistemas más seguros y adecuados en función de los requisitos específicos de la aplicación.

Las conclusiones alcanzadas corroboran la hipótesis inicial en cuanto a la viabilidad de utilizar las técnicas digitales 3D examinadas, ya que han permitido adquirir una formación previa especializada, así como una comprensión en profundidad del comportamiento de los materiales y tratamientos. En consecuencia, este conocimiento ha resultado decisivo para perfeccionar las estrategias metodológicas empleadas en las prácticas reales de conservación-restauración, puesto que garantizan una gran precisión, seguridad y rigor en la toma de decisiones.

Abstract

The scientific and technological advances that took place at the end of the 18th and the beginning of the 19th century favored close collaboration between different fields of knowledge. The initial approach to scientific pedagogy involved the use of natural specimens. These media were accompanied by other visual materials such as engravings and anatomical plates so that students could better understand the explanations during lectures. However, natural specimens tended to decompose quickly, which often prevented the observation of anatomical structures correctly. Consequently, the search for substitutes for the preparations led to the symbiosis of science and art with the creation of three-dimensional artificial anatomical models. These artifacts proved to be very useful tools, although the evolution of teaching systems, over time, caused their obsolescence and consequent abandonment. Material wear as a result of their original functionality, together with inadequate storage spaces, has exacerbated their critical state of conservation, posing a great challenge for conservators and restorers.

On the other hand, the traditional methods of study and intervention in works of sculptural are sometimes inadequate because they are not adapted to the unique characteristics of such specific objects. In this context, the doctoral thesis proposes an exhaustive analysis of the potential of 3D technologies based on digitization, virtual restoration, virtual modeling, and 3D printing to deepen the methodologies and criteria of application. It also aims to devise alternatives for conservation-restoration treatments of varying complexity that are respectful of the criterion of "minimum intervention".

The result of this research includes an experimental phase of tests with various materials and methods to correctly approach the documentation through photogrammetry and scanning, the creation of 3D cartographies, virtual restoration processes, the design and modeling of auxiliary structures and molds, the characterization of thermoplastic materials for 3D printing of molds and auxiliary structures, as well as the dissemination of some results through photorealistic 2D infographics and 3D models published on a specific web platform. Empirical tests have facilitated the development of different protocols to complement the decision-making model and to select the safest and most suitable systems according to the specific requirements of the application.

The conclusions research corroborates the initial hypothesis regarding the feasibility of using the 3D digital techniques examined, as they have allowed the acquisition of specialized prior training as well as an in-depth understanding of the behavior of materials and treatments. Consequently, this knowledge has proved decisive in perfecting the methodological strategies employed in actual conservation-restoration practices, as they guarantee great precision, security, and rigor in decision-making.

1.

INTRODUCCIÓN



1. INTRODUCCIÓN

Los modelos didácticos siempre han estado presentes en la práctica científica como apoyo dentro de una gran variedad de disciplinas. La búsqueda constante para enriquecer los conocimientos a lo largo de sucesivas épocas refleja nuestra curiosidad y capacidad de utilizar métodos innovadores dentro de las limitaciones materiales y tecnológicas de cada periodo histórico. Cuando se persiguió comprender y descubrir los misterios que esconde el cuerpo humano, las prácticas de disección de cadáveres supusieron un importante avance en la ciencia y la educación. Sin embargo, la escasez y la poca durabilidad de los mismos, unido a las limitaciones que marcaba la bidimensionalidad de las láminas murales y de los grabados contenidos en los tratados anatómicos, llevó a buscar nuevas formas de representación tridimensional que cubrieran la demanda de las instituciones científicas donde se enseñaban la anatomía, surgiendo así los modelos artificiales de anatomía humana, animal y vegetal. En la actualidad, estos artefactos tienen un gran valor material, cultural y científico, lo que los convierte en objetos patrimoniales cuya conservación debe ser prioritaria. Como consecuencia de esta necesidad, los recientes avances tecnológicos han proporcionado herramientas y estrategias que pueden ser fundamentales en el campo de la conservación y restauración del patrimonio cultural. En particular, las tecnologías digitales 3D son herramientas con un enorme potencial por las posibilidades que brinda al profesional en los procesos de documentación, diagnosis, intervención y difusión de las colecciones.

La aparición de la ciencia anatómica moderna comenzó con la disección, un método de enseñanza eficaz. Sin embargo, diversos inconvenientes creados por convicciones religiosas y por tabús sociales paralizaron dichas técnicas desde el siglo III a. C. hasta el final de la Edad Media. A partir del siglo XV, este tipo de praxis fue habitual como método de enseñanza de las ciencias debido al auge que supuso el mundo académico universitario (Mandressi, 2012, p. 23). La instrucción de los cirujanos se basaba en el desarrollo de las facultades sensoriales que requerían de la exploración táctil de los diferentes tejidos, de la identificación mediante la observación directa de las formas y de los colores de cada órgano, así como de la familiarización por el contacto con las sustancias y los olores derivados de los cadáveres.

Los descubrimientos sobre la estructura y el funcionamiento del cuerpo humano quedaron recogidos en numerosos tratados de anatomía. Estos tomos eruditos, junto a las prácticas de las disecciones, no solo facilitaron la formación de los cirujanos, enriqueciendo así su visión y destreza técnica, sino que también fueron un excelente recurso para aquellos artistas que buscaban un mayor conocimiento anatómico a la hora de realizar sus composiciones. De este modo, el arte recurrió a la anatomía incorporando diferentes tipos iconográficos e integrando la formación en las Academias donde se preparaban los artistas.

Las disecciones fueron un medio perfecto para transmitir los conocimientos necesarios de manera rigurosa y fiel ante un auditorio de estudiantes. Sin embargo, dada la escasez de cadáveres y la rápida descomposición de estos, con las consiguientes alteraciones de sus estructuras y órganos anatómicos, fue preciso recurrir a nuevas técnicas que ayudasen a preservar su integridad durante un periodo más prolongado. Se efectuaron, con este fin, varios experimentos mediante la inyección de cera que posibilitaran una mayor durabilidad de los cuerpos, si bien no se consiguió unos resultados óptimos en cuanto a la conservación de los mismos. Por esta razón, se buscaron

nuevas alternativas en el campo artístico, donde existía una larga tradición en el uso de modelos tridimensionales con fines formativos. Un arte híbrido entre las disecciones y la escultura implicó a cirujanos, científicos, artistas, artesanos y fabricantes para dar origen a unos primeros simulacros tridimensionales en cera policromada dotándolos de una apariencia inquietante, caracterizada por una sensibilidad estética inimitable. Las propiedades únicas de este material, en cuanto a su plasticidad, ductilidad y maleabilidad, captaron el interés de los anatomistas al ver en ella un enorme potencial para plasmar con gran realismo las calidades de la piel, la carne y las diversas estructuras internas del cuerpo. Las figuras de cera resultantes de la estrecha colaboración entre anatomistas y ceroescultores alcanzaron un elevado grado de verosimilitud gracias a la adición de cabello natural, huesos, dientes, etc., que las alejaba de la sensación de estar ante un cadáver y las aproximaba a la vida (Sánchez et al. 2014). Además, este recurso escultórico posibilitó la representación de anatomías complejas que eran difíciles de observar en los especímenes diseccionados o a través solo de las láminas y grabados contenidos en los tratados de la época. Aspectos como la escala, las formas volumétricas, el color y la textura desempeñaron un papel fundamental en la transferencia de conocimientos por medio de estos simulacros.

A partir del siglo XVIII, se asentaron las bases conceptuales para la utilización de modelos científicos y técnicos como herramientas educativas. La labor de una ética científica se consideraba fundamental para el progreso de la sociedad y para la realización de los ideales contemporáneos de desarrollo social. Durante esta época, se reavivó el interés por la disección, que adquirió en la enseñanza médica una importancia considerable. La disciplina de la cirugía tomó un gran impulso gracias a la creación de los Reales Colegios de Cirugía, los cuales contribuyeron de modo activo a la difusión del saber teórico-práctico. Estas instituciones contaban con gabinetes anatómicos propios donde se elaboraban los modelos artificiales requeridos por los profesores para la enseñanza en las aulas siguiendo las técnicas de la ceroplástica tradicional italiana que en aquel periodo alcanzaron un gran renombre tanto dentro como fuera de Italia. El prestigio de estos modelos sirvió de fuente de inspiración para la creación de modelos artificiales en numerosos gabinetes anatómicos de diferentes países. En España, el más importante de ellos fue el Real Colegio de Cirugía de San Carlos de Madrid, que, por mandato explícito del rey Carlos III (1716-1788), se encargó de reunir y crear un compendio de modelos anatómicos elaborados en cera y otros materiales, destinados a servir de ayuda didáctica para la formación de los futuros cirujanos. Este enfoque pedagógico, que hacía hincapié en la instrucción visual, se incorporó en los diversos planes de estudios y resultó ser un gran apoyo en la adquisición de los conocimientos anatómicos al permitir a los estudiantes contar con dispositivos tridimensionales que podían observar desde cualquier puesto de la clase mientras seguían las explicaciones del profesor.

Por otro lado, es importante subrayar que el propósito de estos artefactos iba más allá de proporcionar un acercamiento práctico a los aspirantes a cirujanos, también pretendían ilustrar a un público entusiasta con el fin de comprender el funcionamiento de los especímenes en la embriología humana, la zoología y la botánica. Para ello, se organizaron exposiciones en diferentes salones aristocráticos y gabinetes anatómicos. De este modo, el modelo anatómico artificial trascendió el ámbito de la esfera académica para llegar a otras audiencias y servir de entretenimiento al gran público.

La cera se convirtió en el material idóneo para la representación de la anatomía humana, animal y vegetal por sus excelentes cualidades plásticas dada su organicidad, ductibilidad y

maleabilidad. La creación de una anatomía artificial en cera era el resultado de un trabajo artesanal, lento y costoso. Además, estos artefactos tenían una función didáctica que les hacía ser susceptibles de sufrir diferentes tipos de daños como resultado de la manipulación constante por parte de los estudiantes en el aula. Ante estas dificultades, la mirada y el ingenio se volvieron hacia la experimentación con otros materiales capaces de responder a los requerimientos de los anatomistas y a la creciente demanda de este tipo de herramientas educativas.

El período histórico comprendido entre finales del siglo XIX y las primeras décadas del XX fue una época en la que la ciencia, la tecnología y la cultura se desarrollaron con rapidez, provocando importantes avances sociales. Además, los cambios promovidos por las reformas educativas potenciaron el uso de herramientas de apoyo docente. Todo ello atrajo la atención de los fabricantes y artesanos de diversas casas comerciales, principalmente francesas y alemanas, que se dedicaban a la comercialización de este tipo de objetos científicos, y que comenzaron a diseñar y fabricar en serie modelos artificiales con papel maché o cartón piedra policromados. Una de las principales ventajas de la nueva elección fue que este material permitió la elaboración de modelos clásticos compuestos por partes desmontables que se podían extraer siguiendo un determinado orden como si se tratara de una disección auténtica, lo que facilitaba en gran medida una mejor comprensión sobre la función y la interacción de cada músculo, vena, arteria u órgano. Estos ingeniosos artefactos tridimensionales fueron el resultado de la unión entre la ciencia y el arte. Los modelos debían reflejar precisión y calidad científica, pero, además, tenían que cumplir con otras necesidades como una mayor resistencia y durabilidad en las prácticas docentes. Dichos materiales reunían estos requisitos, aunque las calidades de las representaciones en algunos casos no llegaron al nivel artístico y de realismo alcanzados en el arte de la ceroplástica del pasado (Sánchez et al. 2022).

Junto con el papel maché también se emplearon otros materiales alternativos como la gelatina, el vidrio o la escayola policromada, entre otros. La gelatina resultó ser muy frágil y ante cualquier mínima manipulación del objeto, este sufría daños que se veían incrementados por su alta sensibilidad ante la acción de la humedad y temperatura. El vidrio, con el que se obtuvieron modelos de unos acabados sorprendentes en la representación de especímenes botánicos y zoológicos, también mostró una escasa resistencia mecánica con tendencia a fracturarse con facilidad. En cuanto a la escayola policromada resultó ser un material duradero y asequible, con una menor tendencia a sufrir alteraciones. Su rápido proceso de fabricación tuvo una gran demanda, sin embargo, la calidad de las representaciones anatómicas se alejaba de los logrados en el papel maché y, por supuesto, de la cera.

Las colecciones anatómicas científicas reflejaron los métodos educativos y de enseñanza utilizados hasta principios del siglo XX en las principales universidades del mundo. Estas construcciones artificiales, que se caracterizaban por su naturaleza visual y tangible, han aprovechado los avances tecnológicos de la época para dar origen a una gran variedad de tamaños, calidades y precios con el fin de atender la demanda de cualquier institución educativa. Con ello, pretendían responder a una diversa petición originada por las universidades, con un mayor rigor en las representaciones de las estructuras anatómicas y cuidado en los acabados, o por los institutos de enseñanza superior, con series más sencillas y económicas. Los modelos artificiales se vendían a través de catálogos ilustrados que ofrecían los fabricantes, en los que se señalaban las características de los mismos, su escala, si eran o no clásticos, y su coste, que iba ligado a la

calidad estética de cada uno de ellos. Durante el siglo XIX, la masiva producción de estos artefactos en papel maché y escayola policromada, facilitada por una combinación de técnicas industriales y artesanales, no solo proporcionó a los docentes un medio físico para transmitir los conocimientos anatómicos de manera más instructiva y fácil, sino que también contribuyeron a lograr establecer una educación estandarizada (Sánchez et al. 2022).

El papel que desempeñaron facilitó, sin duda, la estimulación de las prácticas experimentales y despertó la motivación y el interés de los estudiantes. Sin embargo, los avances en la industria y los cambios pedagógicos en las metodologías de enseñanzas acaecidas en el siglo XX, promovieron la sustitución de este tipo de herramientas por otras más actualizadas como la fotografía, los retroproyectores, los proyectores de diapositivas y los modelos tridimensionales de plástico, lo que provocó que quedarán relegadas a un segundo plano.

En la actualidad, estos artefactos se encuentran principalmente en los entornos universitarios, así como en otros centros de enseñanza superior, museos, entidades privadas y anticuarios de todo el mundo. Con el paso del tiempo estos modelos han visto relegada su función pedagógica convirtiéndose en objetos patrimoniales. Representan un patrimonio científico ligado a diferentes movimientos culturales, intelectuales y, por supuesto, sociales, lo que conlleva que sean fuentes primarias de enorme valor para comprender los cambios en los métodos de enseñanza, en los avances científicos logrados en cada época y en la capacidad creativa de aquellos que pusieron su arte al servicio de la medicina, la veterinaria y la botánica.

Las excepcionales calidades científicas, técnicas y artísticas, han suscitado que, en los últimos años, haya surgido un notable interés hacia este tipo de patrimonio. La considerable riqueza material y el rigor anatómico demostrado en la construcción de cada uno de ellos los convierten en modelos únicos. Esta nueva conciencia ha generado una gran oportunidad para profundizar en las características inherentes de los materiales, en las técnicas de manufactura empleadas durante su fabricación y en las metodologías estratégicas utilizadas para su difusión.

Desde el momento de su creación, la preservación de estos artefactos ha planteado un desafío constante debido a la compleja composición técnica, a la propia funcionalidad didáctica y a su exposición en entornos poco recomendados para su conservación. Por desgracia, muchas de estas colecciones han sido infravaloradas, y por ello, surge una necesidad urgente de establecer planes de conservación que contribuyan a su salvaguarda como testimonios de la cultura material científica. Todo ello supone un gran reto para los profesionales del sector de la conservación y restauración del patrimonio cultural, que deben formular metodologías específicas de intervención adaptadas a las peculiaridades materiales y a los diversos estados de conservación.

Debido a las características de los artefactos y singularidades propias ya mencionados, se plantean estudios y tratamientos alternativos bajo el criterio de “mínima intervención” complementados por tecnologías digitales 3D. Por ello, y en respuesta a la constante búsqueda hacia la mejora y la innovación metodológica, las tecnologías 3D han aparecido como herramientas esenciales para analizar y diagnosticar los bienes culturales. La rápida evolución de estos nuevos medios también ha provocado una continua transformación en las metodologías de trabajo que el conservador-restaurador ha de adaptar.

La presente tesis doctoral recoge múltiples aspectos a la hora de estudiar las intervenciones de conservación-restauración por medio de las tecnologías 3D basadas en la digitalización, la

restauración virtual, el modelado virtual y la impresión 3D. Se presentan como herramientas de solución alternativa para complementar la toma de decisiones de cara a diversos estudios y análisis de posibles tratamientos. Los modelos científicos didácticos seleccionados para realizar esta investigación forman parte de las colecciones conservadas en los museos universitarios de la Universidad Complutense de Madrid, en concreto, se localizan en el Museo de Anatomía "Javier Puerta" de la Facultad de Medicina, en el Museo Veterinario Complutense de la Facultad de Veterinaria y en la colección de especímenes botánicos del Departamento de Biología Vegetal II, de la Facultad de Farmacia. También se ha tenido la oportunidad de acceder a las colecciones pertenecientes a la Universidad de Salamanca, tanto a los modelos botánicos vinculados al Departamento de Botánica y Fisiología Vegetal de la Facultad de Farmacia, como a la colección de modelos anatómicos de la Facultad de Medicina.

1.1. Justificación

La elección de la investigación está motivada por la necesidad de abordar los retos que plantean las problemáticas de conservación presentes en los modelos artificiales didácticos preservados en los entornos universitarios. La especificidad de cada uno de ellos, en cuanto a la tecnología de fabricación y a los procesos de degradación de los materiales constitutivos, requerirá de diversas tomas de decisiones y de la adaptación de estrategias metodológicas específicas a cada caso de estudio, que siempre deberán estar bien definidas y científicamente justificadas. Este enfoque es esencial para mitigar los riesgos y reducir posibles deterioros durante la manipulación de los objetos, con el fin de llevar a cabo las complejas tareas de análisis y tratamientos.

Los métodos tradicionales de estudio e intervención en el ámbito escultórico no parecen ser los más idóneos para este tipo de colecciones tan vulnerables. Por lo tanto, resulta evidente la necesidad de implementar nuevas metodologías y herramientas que ofrezcan al profesional del sector de la conservación y restauración del patrimonio cultural una mayor aplicabilidad en el diagnóstico de las obras y análisis de intervenciones. Estos nuevos enfoques deben tratar de encontrar soluciones más eficaces, seguras y menos invasivas durante los diversos tratamientos en este tipo de colecciones. En este sentido, las tecnologías 3D han supuesto un impacto considerable en el campo de la conservación y restauración del patrimonio cultural, y han puesto al alcance de los profesionales unas herramientas exploratorias de enorme potencial para comprender, interpretar, preservar y difundir los objetos y las obras de arte que constituyen nuestro legado patrimonial.

La presente investigación plantea poner en valor, promover y demostrar la importancia y necesidad de la aplicación de las técnicas digitales 3D en diferentes procesos de estudio e intervención en las colecciones con modelos anatómicos didácticos. Hasta el momento, la mayor aplicación de las tecnologías 3D dentro del campo del patrimonio cultural y, en concreto, en el de la conservación-restauración se ha centrado en la digitalización con fines de documentación, diagnóstico y difusión. Se considera que existe una gran carencia acerca de estudios enfocados específicamente a los tratamientos de conservación-restauración que supongan problemas de diversa complejidad técnica.

Con el propósito de complementar y mejorar los procesos de intervención en las colecciones mencionadas, se propone un método bajo el principio de la "mínima intervención". Dicho procedimiento se basa en la relación de las normativas y recomendaciones acerca del uso de los sistemas digitales 3D aplicados al patrimonio con los criterios de intervención generales en el mencionado ámbito, extrapolable al campo escultórico y, estos a su vez, con los criterios específicos de tratamientos en este tipo de artefactos. Todo ello, con el fin de poder crear nuevas recomendaciones y protocolos que proporcionen pautas guiadas acerca de diversos estudios virtuales, así como su aplicabilidad en tratamientos concretos de conservación-restauración. A la vez, se pretende que el método desarrollado pueda servir a modo de referencia para analizar y generar nuevos protocolos de estudio e intervención en casos similares y, por supuesto, en otra tipología de bienes.

Esta investigación surgió a raíz del Trabajo Fin de Grado *Aplicación de técnicas digitales 3D en una propuesta de conservación-restauración para un modelo anatómico en cera del siglo XVIII, Venus de Medici*[1] y, posteriormente, del Trabajo Fin de Máster *Aplicación de técnicas digitales 3D: protocolo de conservación y restauración de un modelo anatómico en cera del siglo XVIII*[2].

Durante el Trabajo Fin de Grado tuve la oportunidad de entrar en contacto con las colecciones científicas Complutense, lo que me permitió comprender el incalculable valor de este legado patrimonial. Por otro lado, fue fundamental la colaboración con diferentes restauradores, conservadores, artistas digitales y especialistas en logística de arte, lo que enriqueció enormemente mi formación. El desarrollo de la investigación sobre la figura de cera seleccionada supuso la posibilidad de comprender la complejidad técnica de este tipo de artefactos y la necesidad de poner a punto metodologías innovadoras que puedan dar respuesta a las problemáticas de deterioro que han sufrido durante el paso del tiempo.

A raíz de este, se despertó en mí un mayor interés e inquietud hacia este tipo de artefactos didácticos, cuanto más indagaba, mayor resultaba ser la fascinación y admiración, por su funcionalidad, por su carácter histórico-artístico, por los materiales constitutivos, así como por las complejas técnicas constructivas. Detrás de cada modelo hay una enorme labor científica y artística desarrollada para avanzar en los conocimientos anatómicos del cuerpo humano, animal y botánico. Los retos que supone abarcar y profundizar en los procesos de conservación-restauración de estas delicadas y singulares colecciones, han supuesto una motivación, durante estos años, para seguir indagando en este ámbito.

Del conocimiento adquirido en el inicio de esta línea de investigación gracias a la profesora Alicia Sánchez Ortiz, así como en trabajos posteriores en colaboración con el profesor Óscar Hernández Muñoz, quedó patente la necesidad de profundizar y explorar los límites de las técnicas digitales 3D aplicadas al estudio de procesos de intervención en las colecciones anatómicas científicas. Ambos me animaron a emprender este camino para la orientación de mi tesis doctoral. Ello me motivó a cursar estudios específicos acerca de las nuevas tecnologías digitales aplicadas al patrimonio cultural, durante el primer año de doctorado en 2018, como el máster de patrimonio

[1] Defendido el 13 de junio de 2017, en la Universidad Complutense de Madrid, Facultad de Bellas Artes. Calificación 9,9 Matrícula de Honor. Mención: Premio Cátedra Extraordinaria Autric Tamayo.
[2] Defendido el 19 de julio de 2019, en la Universidad de Alicante, Facultad de Filosofía y Letras. Calificación 10 Matrícula de Honor.

virtual de la Universidad de Alicante. Los conocimientos adquiridos gracias a los diferentes docentes que han compartido conmigo sus conocimientos y experiencias, me han ayudado a comprender y experimentar el potencial de diversas herramientas 3D, las cuales han resultado determinantes para establecer futuras líneas de investigación.

Desde el año 2017 me he unido a esta línea de investigación, dentro del Grupo de Investigación UCM, Ref.: 970923: *Arte, Tecnología, Imagen y Conservación del Patrimonio Cultural*, donde los resultados alcanzados se han compartido a través de diferentes publicaciones científicas, congresos nacionales e internacionales y seminarios.

Respecto a la viabilidad de la investigación, se han podido poner en práctica algunos procesos gracias a la oportunidad que me han otorgado los directores de la tesis doctoral y del proyecto I+D+i Ref.: PGC2018-098396-B-100[3] Alicia Sánchez Ortiz IP1 y Óscar Hernández Muñoz IP2, por permitirme formar parte como miembro del equipo y también, gracias a la ayuda predoctoral FPI Ref.: PRE2019-087870[4]. La experiencia previa de ambos acerca de la aplicación sobre las técnicas digitales 3D enfocadas a resolver diversos tratamientos de conservación-restauración en las colecciones con modelos anatómicos científicos, así como la colaboración prestada por el equipo interdisciplinar del mencionado proyecto I+D+i y del grupo de investigación, junto con los medios materiales, infraestructuras y equipamientos de las Facultades de Bellas Artes, Ciencias Físicas, Farmacia, Medicina y Veterinaria, de la Universidad Complutense de Madrid, así como la Facultad de Medicina, Farmacia y Ciencias Sociales de la Universidad de Salamanca y el Laboratorio de Creación y Fabricación Digital (FabLab) de la misma universidad, han facilitado enormemente el desarrollo de esta tesis doctoral.

1.2. Hipótesis y Objetivos

La hipótesis de partida de esta investigación se centra en el supuesto de que la utilización de técnicas digitales 3D pueden ofrecer a los profesionales del sector de la conservación y restauración del patrimonio cultural la posibilidad de encontrar soluciones alternativas de "mínima intervención" a problemáticas de análisis y tratamientos de gran complejidad técnica en los artefactos artificiales de anatomía humana, animal y vegetal. Para verificar dicha hipótesis se han desarrollado una serie de objetivos.

1.2.1. Objetivo Principal

Para verificar las hipótesis de partida, el principal objetivo de la tesis doctoral se ha centrado en analizar las diferentes aplicaciones y ventajas que ofrecen las tecnologías 3D basadas en la digitalización por medio del escaneado y de la fotogrametría, la restauración virtual, el modelado virtual, así como la impresión 3D a través de técnicas como FDM (*Fused Deposition Modeling*,

[3] Proyecto I+D+i *Metodologías innovadoras en conservación de colecciones científicas con modelos didácticos para la enseñanza de Botánica, Anatomía humana y animal basadas en las nuevas tecnologías 3D* (AMC-3dTech), Ref.: PGC2018-098396-B-100. Entidad financiadora: Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades dentro del Programa Estatal de Generación del Conocimiento y Fortalecimiento Científico y Tecnológico del Sistema de I+D+i. Año de la convocatoria: 2018.

[4] Ayuda de Contratos Predoctorales FPI para la formación de doctores contemplada en el Subprograma Estatal de Formación del Programa Estatal de Promoción del Talento y su Empleabilidad en I+D+i, en el marco del Plan Estatal de Investigación Científica y Técnica y de Innovación 2017-2020. Ref.: PRE2019-087870. Entidad financiadora: Ministerio de Ciencia e Innovación (España), FSE Fondo Social Europeo y la Agencia Estatal de Investigación. Año de la convocatoria: 2019.

Modelado por Deposición Fundida), LFS (*Low Force Stereolithography*, Estereolitografía de Baja Fuerza), y CNC (*Computerized Numerical Control*, Control Numérico Computarizado). Dichas herramientas se han aplicado al análisis y el estudio de diversos tratamientos de conservación-restauración planteando nuevas metodologías con la finalidad de encontrar soluciones a problemáticas concretas, así como a contribuir a una mejora en la toma de decisiones, que agilice y garantice con la mayor calidad, estabilidad y seguridad los tratamientos y, reduzca en la medida de lo posible, la actuación directa sobre el objeto real.

1.2.2. Objetivos Secundarios

Para lograr el objetivo principal, se han establecido una serie de objetivos concretos que se agrupan en los siguientes puntos:

1. Revisar las investigaciones previas sobre la utilización de las tecnologías 3D aplicadas al patrimonio cultural y, en concreto, las relativas a las colecciones científicas con modelos artificiales didácticos, a fin de contextualizar las prácticas y necesidades para afrontar ciertos tratamientos de conservación-restauración.
2. Examinar el proceso de registro y el potencial de los escáneres de luz estructurada.
3. Desarrollar estrategias específicas de registro y procesado de los datos en la técnica fotogramétrica, empleando diferentes fuentes de iluminación (luz visible y fluorescencia visible inducida por radiación UV), y otros materiales con la finalidad de reducir los brillos en superficie, así como procesos de gestión del color para garantizar la máxima calidad y fidelidad en el modelo 3D.
4. Comparar los resultados obtenidos entre el escaneado y la fotogrametría para hallar las ventajas y determinar las posibles limitaciones de cada técnica.
5. Crear cartografías digitales 3D que registren de forma precisa y rigurosa cada una de las patologías, con la finalidad de realizar un diagnóstico del estado de conservación, así como la planificación de los procesos de conservación-restauración necesarios.
6. Determinar el potencial de las herramientas digitales 3D en estudios sobre la manufactura del objeto y el seguimiento de su estado de conservación.
7. Restaurar virtualmente los modelos anatómicos científicos con la finalidad de analizar, valorar y planificar diferentes tratamientos de conservación-restauración (anastilosis, reintegración volumétrica, limpieza y reintegración cromática).
8. Diseñar, mediante el modelado digital 3D, diferentes moldes con el objetivo de obtener positivos en cera, así como estructuras auxiliares precisas para la estabilización temporal durante el proceso de adhesión de fragmentos.
9. Difundir los resultados virtuales a través de infografías 2D fotorrealistas, modelos 3D y exposiciones virtuales por medio de cualquier dispositivo con pantalla para contribuir a preservar y poner en valor los modelos anatómicos científicos.
10. Examinar diferentes materiales termoplásticos, así como su posición y ángulos durante la fabricación 3D FDM y LFS de moldes, con el fin de obtener la mejor precisión y calidad en los positivos de cera para las reintegraciones volumétricas o para la creación de facsímiles enfocados a ensayar y buscar soluciones a diferentes problemáticas de tratamientos antes de acometer la intervención real.

11. Comparar la eficacia de los fragmentos en cera mediante CNC enfocados a la reintegración volumétrica con los resultados obtenidos de los moldes FDM y LFS.
12. Caracterizar las propiedades físicas de diferentes materiales termoplásticos de impresión 3D FDM mediante ensayos de tracción y flexión con el propósito de determinar sus comportamientos mecánicos y dotar de la mejor resistencia y seguridad las diversas estructuras auxiliares necesarias para la estabilización temporal de los fragmentos durante el proceso de adhesión.
13. Relacionar los criterios de intervención en procesos de conservación-restauración en obras de carácter general, extrapolable al ámbito escultórico y, en concreto, en los modelos anatómicos didácticos, y estos a su vez con los criterios y usos de las técnicas digitales 3D aplicadas al patrimonio cultural, a fin de establecer recomendaciones acerca de la gestión de las herramientas 3D utilizadas sobre estas colecciones.
14. Crear diferentes protocolos que puedan servir de guía orientativa a la hora de efectuar estudios de diagnóstico y tratamientos de conservación-restauración sobre la obra real.

1.3. Metodología general de investigación

A continuación, se describe la metodología general empleada para el desarrollo de la tesis doctoral con el objetivo de comprender mejor cada una de las fases abordadas. Se ha agrupado en dos grandes grupos, uno para abordar la parte teórica y otro para el desarrollo de la parte experimental.

1.3.1. Fase Teórica

En primer lugar, se realizó una amplia y sistemática búsqueda de información sobre las nuevas tecnologías 3D utilizadas en el patrimonio cultural, para conocer las herramientas, las aplicaciones y los casos más relevantes que habían sido objeto de estudio por otros investigadores. Asimismo, se efectuó una revisión acerca de la legislación, las normativas, las recomendaciones y los criterios de intervención con carácter general en el patrimonio cultural, extrapolable al ámbito escultórico, así como en las colecciones con modelos anatómicos científicos. Se analizaron todos estos aspectos con la finalidad de poder relacionarlos con las recomendaciones actuales acerca de las aplicaciones de las tecnologías 3D en el patrimonio científico durante las diversas prácticas seleccionadas.

Se efectuaron dos tipos de búsqueda: una heurística, centrada en la localización y recopilación de información mediante la consulta de diversas bases de datos y fuentes, y otra hermenéutica, en la que se llevó a cabo el análisis, la interpretación y la clasificación de la información obtenida para sistematizar las referencias bibliográficas. La bibliografía se consultó, en libros y revistas especializadas, páginas web de instituciones museísticas, galerías, anticuarios y universidades con patrimonio científico de las características descritas en esta propuesta. Para la ampliación de las fuentes, se utilizó principalmente la Web of Science, Scopus, AATA (*Abstracts of International Conservation Literature*, Resúmenes de la Bibliografía Internacional sobre Conservación), y BCIN (*Bibliographic Database of the Conservation Information Network*, Base de Datos Bibliográfica de la Red de Información sobre la Conservación), entre otras.

1.3.2. Fase Experimental

Para su desarrollo, se recurrió a una metodología empírica cuantitativa y cualitativa enfocada a la obtención de información a través de la observación de cada uno de los artefactos seleccionados, tanto de manera física como virtual.

Con el fin de estudiar minuciosamente los modelos anatómicos científicos y poder así profundizar en el diagnóstico del estado de conservación y buscar diferentes estrategias específicas de intervención en cada ejemplo seleccionado, según las necesidades requeridas, se recurrió a la digitalización mediante escáneres de luz estructurada y a la fotogrametría. Para el registro del escaneado, se desarrollaron diferentes estrategias y configuraciones específicas de parámetros según las características volumétricas y materiales de cada obra de modo que se asegurara una correcta digitalización. Para el proceso fotogramétrico se optó por diferentes estrategias de captura, control lumínico y de brillos, así como la documentación con otras fuentes de iluminación mediante la fluorescencia visible inducida por radiación UV. Se analizaron las ventajas y desventajas de las dos técnicas, ya que de ello dependerá la utilización de uno u otro método, o su combinación según las aplicaciones necesarias.

A través de diversos análisis exhaustivos por medio de los modelos escaneados, se analizó y examinó el seguimiento del estado de conservación, así como el análisis dimensional de la manufactura, y se compararon varios modelos similares entre sí; también se llevaron a cabo otros procesos relativos a la anastilosis, las reintegraciones volumétricas de lagunas y la creación de facsímiles mediante herramientas de modelado virtual.

Por otro lado, los modelos fotogramétricos posibilitaron el diseño de cartografías digitales 3D para el registro de patologías, de alta precisión, en las que se muestran de modo riguroso y detallado cada una de las alteraciones existentes, así como los procesos de conservación-restauración necesarios. Sobre estos modelos virtuales, se probaron diversas metodologías y tratamientos de limpieza para el aligeramiento o la remoción de particulado atmosférico, películas filmógenas oxidadas y/o repintes. Asimismo, se analizaron diferentes técnicas de reintegración cromática para el tratamiento de lagunas.

Los resultados obtenidos tras llevar a cabo la digitalización y la restauración virtual han servido para proponer una divulgación didáctica de algunos de los modelos virtuales a través del uso de infografías 2D fotorrealistas y mediante la visualización en pantalla de los modelos 3D, RV (Realidad Virtual) o RA (Realidad Aumentada).

Tras concluir los estudios virtuales, algunos de los tratamientos correspondientes a la anastilosis, la adhesión estructural y las reintegraciones volumétricas, se ensayaron de manera física por medio de facsímiles creados a partir de moldes impresos en 3D. Para lograr una gran precisión en los positivos de cera a obtener mediante los modelos, se efectuó la caracterización de diferentes materiales termoplásticos, así como de diversas posiciones que adquieren los moldes durante la impresión para hallar la orientación y el material más apropiado. Dichas características resultan determinantes cuando se pretende lograr el mayor detalle y rigor en los acabados superficiales de los positivos en cera.

Concluidos los fragmentos volumétricos a adherir o reintegrar, así como los facsímiles, estos se sometieron a procesos de envejecimiento artificial. Las intervenciones se realizaron con ayuda

de estructuras de soporte auxiliar impresas en 3D, las cuales requirieron de estudios previos sobre el comportamiento mecánico que experimentan los materiales termoplásticos bajo diferentes fuerzas a través de ensayos de tracción y flexión. Tras concluir las pruebas de los tratamientos en los facsímiles, se evaluaron los procedimientos, las características y los materiales empleados para determinar su adecuación en aplicaciones sobre obra real. Todas las metodologías específicas, los materiales y las herramientas de cada una de las aplicaciones desarrolladas se recogen detalladamente en el apartado de Materiales y Métodos.

A partir de los resultados obtenidos se establecieron nuevas recomendaciones, especialmente orientadas a la conservación-restauración de modelos anatómicos didácticos. Estas pautas tenían como finalidad ayudar a determinar cuáles eran los instrumentos digitales 3D más apropiados para cada uno de los diferentes procesos de análisis y tratamiento de conservación–restauración que se iban a utilizar en los casos de estudio seleccionados.

A continuación, en la figura 1 se recoge el modelo esquemático de todo el desarrollo metodológico.

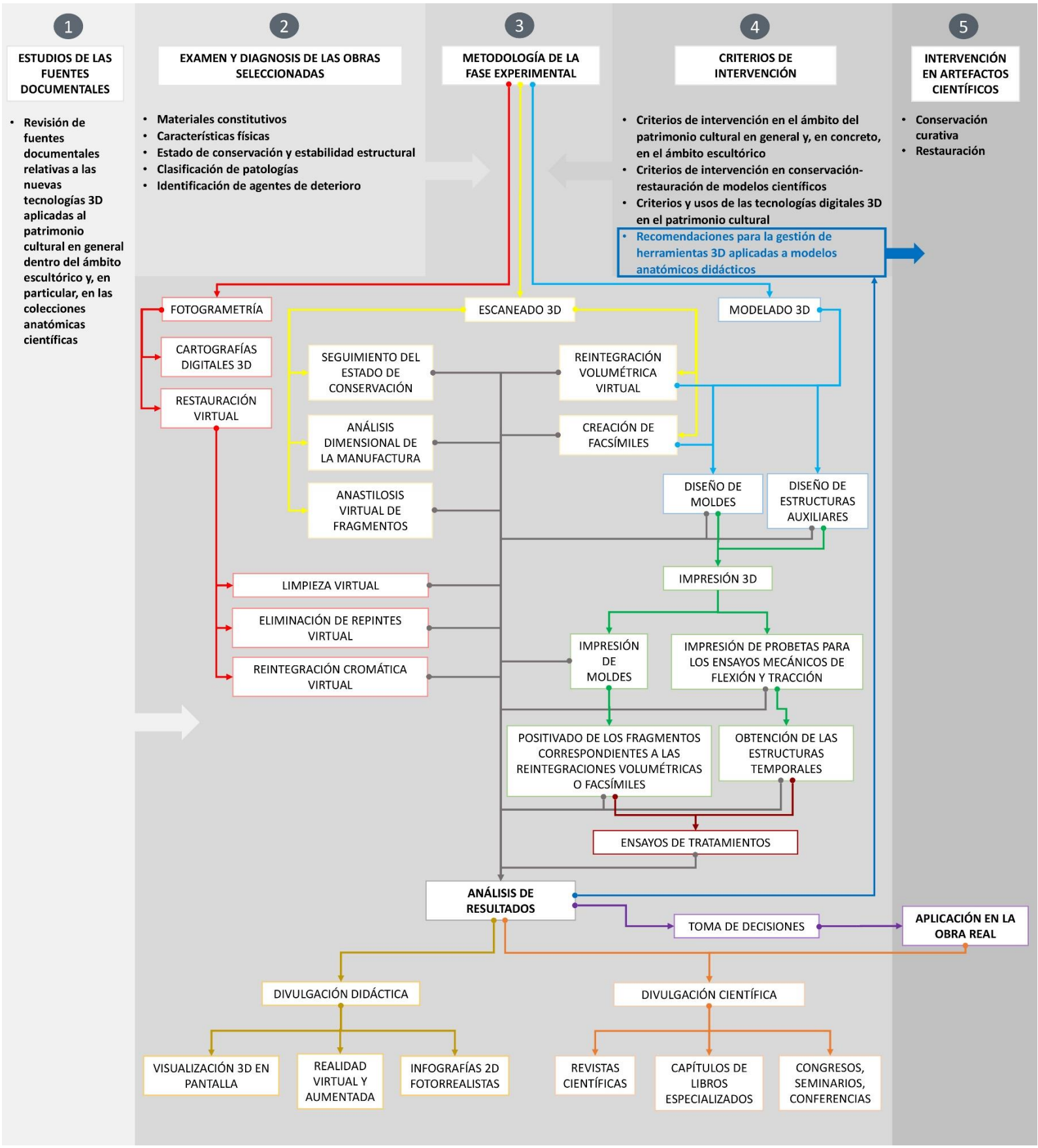
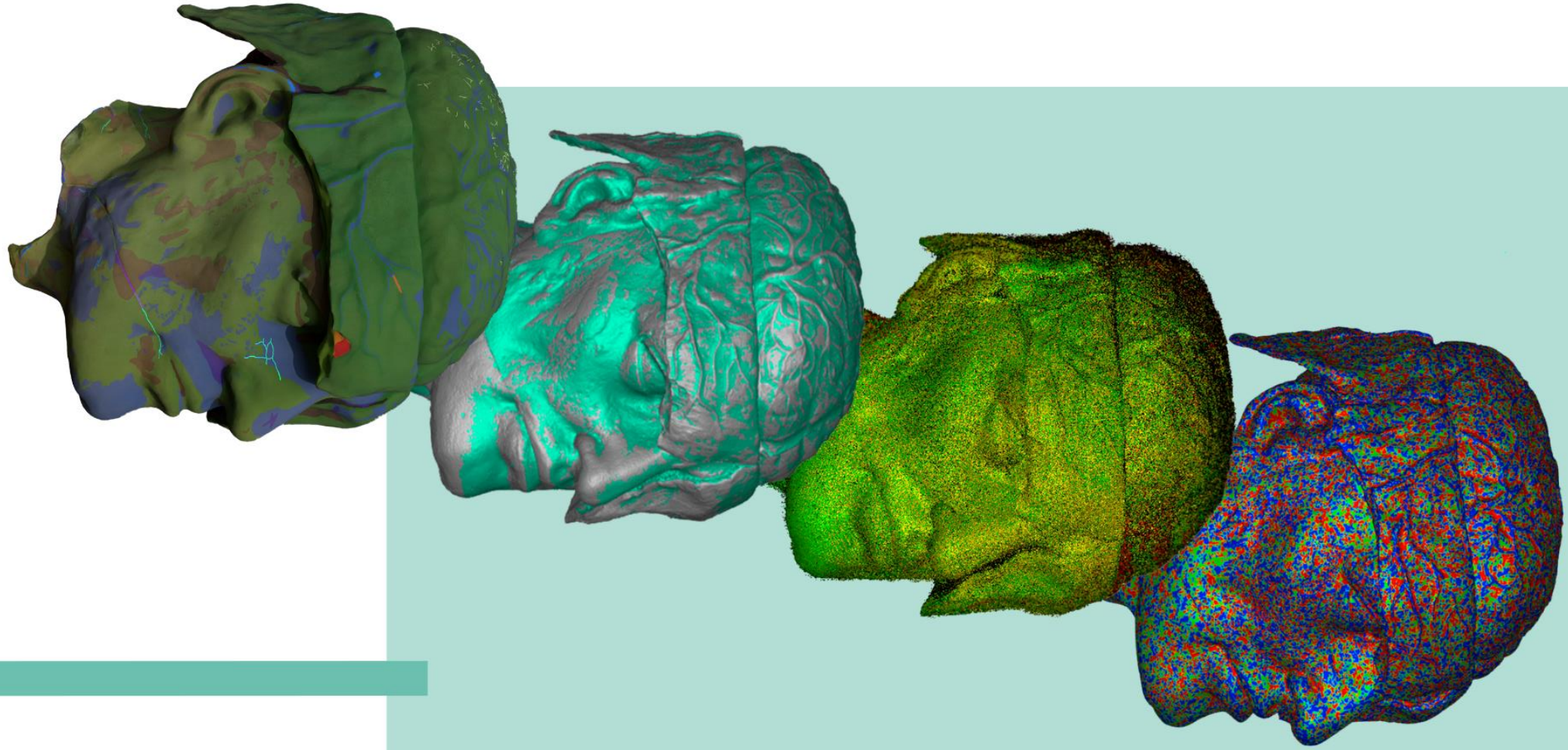


Figura 1. Esquema del método científico desarrollando para la diagnosis y análisis de intervenciones en colecciones anatómicas científicas mediante tecnologías 3D. © Emanuel Sterp Moga.

ESTADO DE LA CUESTIÓN

2



2. ESTADO DE LA CUESTIÓN

La evolución de la historia siempre ha estado marcada por unos determinados avances y actualmente nos encontramos en plena vorágine de la Era Digital. Hoy en día la proliferación de las tecnologías y, en particular, del 3D, es constante y se ha expandido en todos los ámbitos cotidianos. En el campo del patrimonio cultural, estas herramientas han encontrado numerosas aplicaciones. Diversas instituciones, museos y galerías han recurrido a ellas como medio para explorar estrategias de conservación y difusión de sus colecciones, debido a su amplia y precisa información gráfica que ofrecen.

El enorme ecosistema digital creado hasta el momento abarca diversas metodologías de trabajo y estudios, así como técnicas de gestión de datos e interpretación de resultados. Dada la gran cantidad de información disponible, este capítulo está enfocado a ofrecer una visión general de las aplicaciones potenciales y más destacadas de las tecnologías 3D en el patrimonio. Está centrado principalmente en los estudios realizados en la última década, ya que su rápida evolución ha dejado obsoletos varios procesos. Pese a que son numerosas las tecnologías disponibles para la digitalización y el análisis del entorno patrimonial (Guidi & Frischer, 2020, pp.631-697; Kelley & Wood, 2018), en este apartado se ha hecho referencia a las tecnologías seleccionadas para abordar esta investigación, con un especial interés hacia los bienes de carácter mueble. Ello se debe a la necesidad de extrapolar las metodologías de trabajo y adaptarlas a los requerimientos de los artefactos científicos. El estudio se centra principalmente en los procesos de digitalización que utilizan sistemas convencionales de fotogrametría y escaneado para obras de pequeño y mediano formato, cuyas características dimensionales y físicas se asemejan a las de los artefactos científicos seleccionados.

Por otro lado, también se profundiza en el potencial que poseen estos modelos 3D en diversos procesos de difusión, análisis y diagnóstico, así como en la impresión 3D, con el fin de obtener ejemplares físicos que complementen determinados tratamientos. Todo ello, con el objetivo de profundizar en cada una de las técnicas y materiales, hallar su potencial y solventar las diversas problemáticas que causan los artefactos anatómicos didácticos durante el registro, ya que de la calidad del modelo 3D dependen los futuros estudios de diagnóstico e intervención.

2.1. Tecnologías 3D aplicadas a la documentación, el análisis y la divulgación del patrimonio cultural

2.1.1. Técnicas de escaneado

La digitalización en 3D es en la actualidad una práctica frecuente dentro del campo del patrimonio cultural. En ella se utilizan diferentes técnicas y dispositivos, entre los que cabe destacar diversos tipos de escáneres 3D. Algunos de ellos están basados en el empleo de sensores activos, es decir, en la emisión de una señal para registrar la documentación. Independientemente de la energía electromagnética utilizada, ya sea radar, láser o luz, transmiten diferentes ondas, las cuales van a ofrecer distintas resoluciones y distancias de registro.

Entre los diversos tipos de escáneres destacan los TLS (*Terrestrial Laser Scanning*, Escáneres Láser Terrestres), CRLS (*Close-range Laser Scanning*, Escáner Láser de Objeto Cercano) y SLS (*Structured-light Scanning*, Escáneres de Luz Estructurada) de corto alcance, entre otros. Los TLS

y CRLS usan diferentes clases de láseres para medir la distancia comprendida desde el aparato hasta el objeto, mientras que los SLS están basados en un patrón de luz que incide sobre el modelo. Por lo general, las tecnologías TLS se aplican en todo tipo de bienes inmuebles y los CRLS en bienes muebles de mediano y pequeño tamaño. Sin embargo, hoy en día, los CRLS se emplean cada vez menos y es más frecuente recurrir a los escáneres de luz estructurada SLS para la digitalización de bienes muebles de mediano y pequeño formato.

Son numerosas las investigaciones y estudios llevados a cabo sobre el patrimonio inmueble por medio de escáneres láser tipo TLS (Historic England, 2018). No obstante, debido a las características específicas de los artefactos científicos seleccionados para esta tesis doctoral, se ha hecho referencia, sobre todo, a los trabajos llevados a cabo en los bienes muebles con escáneres, ya sean láser CRLS o de luz estructurada SLS.

Por otro lado, la fotogrametría es una de las tecnologías más explotadas para la documentación del patrimonio cultural en la última década. A pesar de ello, los escáneres siguen destacando en esta tarea por diversas razones. Algunas de las ventajas frente a la fotogrametría por la cual diferentes investigadores han recurrido a ese tipo de herramientas, se basa en la altísima precisión volumétrica (I. Marić et al., 2020), mayor resolución en piezas pequeñas y de mediano formato (Graciano et al., 2017), así como una menor infraestructura necesaria para la digitalización, ya que son equipos más ligeros y portátiles (Adams et al., 2015).

Uno de los primeros ejemplos pioneros de digitalización de diversos objetos patrimoniales se llevó a cabo por el Instituto de Tecnología de la Información del Consejo Nacional de Investigación de Canadá, durante el año 2003 (Taylor et al., 2003). Aunque sus estudios y aplicaciones comenzaron en 1994, cuando lanzaron uno de los primeros prototipos patentados de escáneres láser de triangulación (Rioux, 1994). Durante estos primitivos contactos se pudo analizar el potencial y limitaciones para documentar el patrimonio cultural. Los primeros pasos despertaron un enorme interés y, desde entonces, esta tecnología no ha parado de ser analizada y utilizada en la documentación y estudio de intervenciones del patrimonio cultural. Quizás el uso de dichos escáneres láser cobró mayor importancia con el proyecto pionero *The Digital Michelangelo de Stanford* (Levoy et al., 2000), que demostró el enorme potencial de las imágenes 3D, con una resolución de 1 mm para documentar los bienes culturales (figura 2). Este proyecto supuso un punto de inflexión, ya que demostró que las imágenes 3D podían proporcionar más información que la documentación fotográfica tradicional, incluso para que el público en general interactuara con ellas.

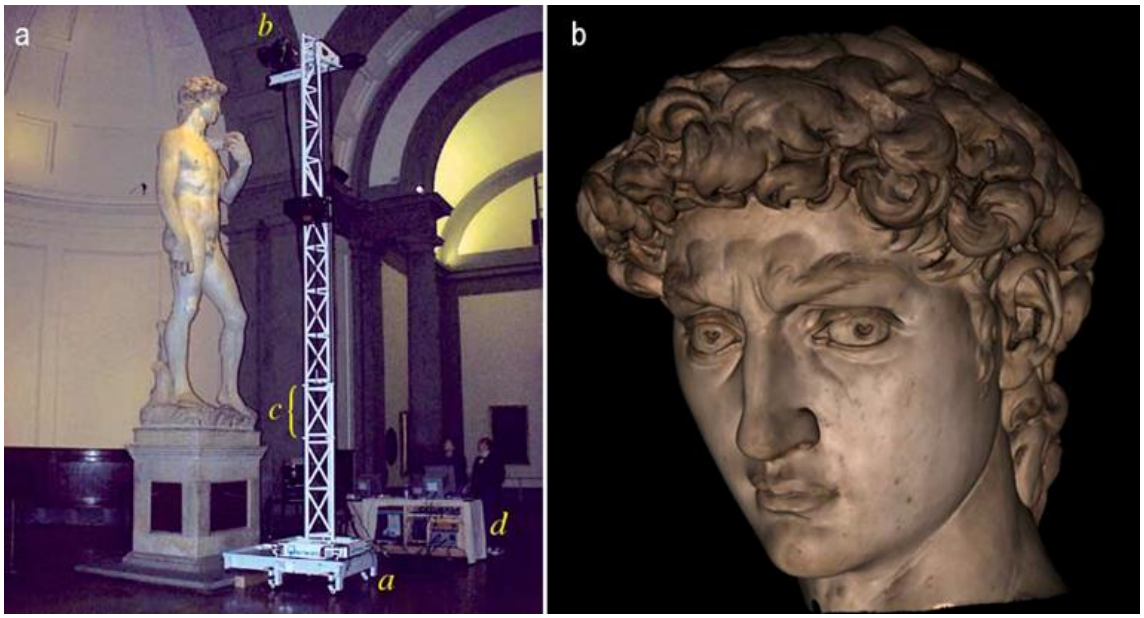


Figura 2. a) Sistema de digitalización de la escultura de David. b) Detalle del modelo escaneado y la textura de color. © Marc Levoy, Kari Pulli, Brian Curless, Szymon Rusinkiewicz, David Koller, Lucas Pereira, Matt Ginzton, Sean Anderson, James Davis, Jeremy Ginsberg, Jonathan Shade y Duane Fulk.

Las diversas tecnologías empleadas para crear estos escáneres dieron pie rápidamente a diferentes estudios comparativos. Un año más tarde de la digitalización de las 10 esculturas de Miguel Ángel (1475-1564), el *Proyecto Minerva* abordó el análisis de semejanza entre los escáneres CRLS y SLS, y puso de manifiesto la complejidad y el largo tiempo que conlleva la obtención de un modelo 3D, así como las diferencias entre ambas herramientas (Rocchini et al., 2001; Fontana et al., 2002).

Poco a poco, se ha dado mayor utilidad a estos modelos 3D y así lo demuestran diversas investigaciones centradas en el estudio comparativo 3D de un caballo de bronce, perteneciente al Museo Arqueológico de Florencia (Italia), con un dibujo de Leonardo da Vinci (1452-1519). El modelo digital obtenido por escáner láser CRLS ofreció la posibilidad de analizar la hipótesis de partida consistente en que el artista pudo esbozar el caballo mirando directamente dicho modelo (Dellepiane et al., 2007).

La amplia investigación y el desarrollo de estas herramientas han planteado nuevas estrategias de digitalización. Algunas de ellas están basadas en la utilización de un proyector ortográfico de luz estructurada y de diversos espejos para la adquisición rápida de objetos (Lanman et al., 2009). Otros escáneres 3D están basados en la técnica del radar láser FMCW (*Continuous Wave Frequency Modulation*, Onda Continua de Frecuencia Modulada) para lograr imágenes de esculturas cuyos materiales son realmente difíciles de registrar como el bronce (Guidi et al., 2009). También existen algunos escáneres 3D topométricos de alta definición con sensores tipo TOP-HE, que cuentan con un sistema de luz estructurada de corto alcance (Akca, 2012). Por último, algunos sistemas de digitalización consisten en la combinación de escáneres 3D de luz estructurada y un sensor fotogramétrico estéreo para lograr la máxima fiabilidad tanto en la resolución como en las mediciones espaciales del modelo (figura 3) (Barone et al., 2012).

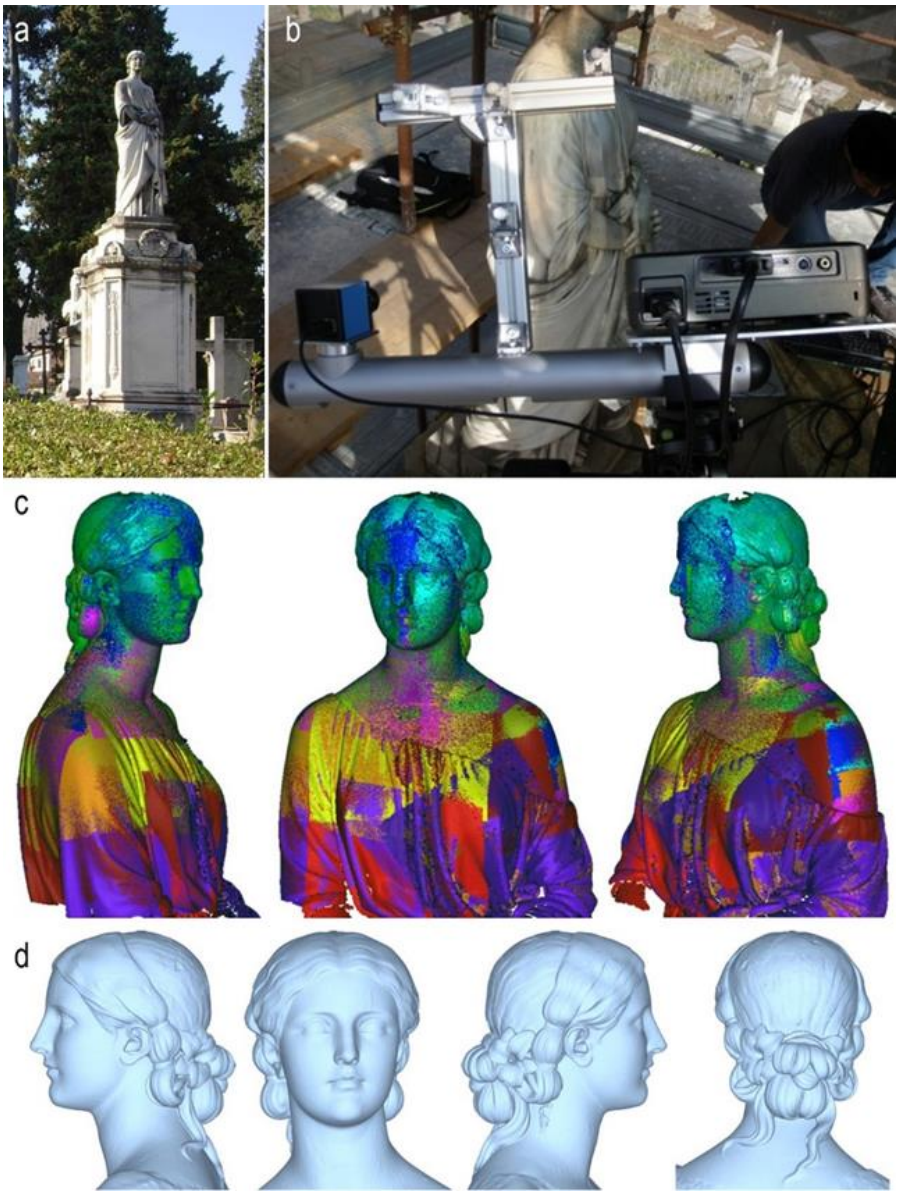


Figura 3. a) Escultura de la Esperanza del Cementerio Inglés de Florencia. b) Proceso de adquisición de datos. c) Mapas de los diferentes escaneados. d) Resolución final de la malla. © Sandro Barone, Alessandro Paoli y Armando Viviano Razionale.

En los últimos años, las referencias sobre este tema han aumentado de modo considerable debido a la necesidad de mejorar la calidad de los datos, así como de afrontar las diferentes problemáticas de registro y características tanto de la obra como de los entornos (Gomes et al., 2014). Algunos trabajos emplean el método AHP (*Analytic Hierarchy Process*, Proceso de Jerarquía Analítica), basado en la selección de determinados equipos y herramientas según las características volumétricas y tipología de obra, costes, tiempos y necesidades en cuanto a las calidades requeridas para una determinada aplicación (Di Angelo et al., 2018). Son estrategias realmente útiles cuando se precisa abarcar proyectos con determinadas obras, pues estos análisis previos son imprescindibles y útiles para seleccionar las herramientas más adecuadas.

El continuo desarrollo y la mejora de los equipos de digitalización 3D han permitido a los profesionales superar las limitaciones y diseñar nuevas estrategias para el correcto registro de diferentes obras que presentan problemáticas realmente difíciles durante la captura de datos. Así

lo demostraron Di Paola e Inzerillo (2018) en su metodología de trabajo para registrar, con altísima calidad por medio de un escáner de luz estructurada tipo Artec Spider la piedra negra de Palermo, un importante fragmento de inscripción jeroglífica. El principal problema era la superficie negra de la piedra, ya que los escáneres presentan dificultades para registrar este tipo de características superficiales y los detalles intrincados tan finos de la tabla. Para solventar esta dificultad, recurrieron a diversos sistemas de marcadores externos que les permitieran reconocer puntos homogéneos en determinadas zonas y así evitar que los escaneados no se perdieran durante el barrido o la alienación final (figura 4).

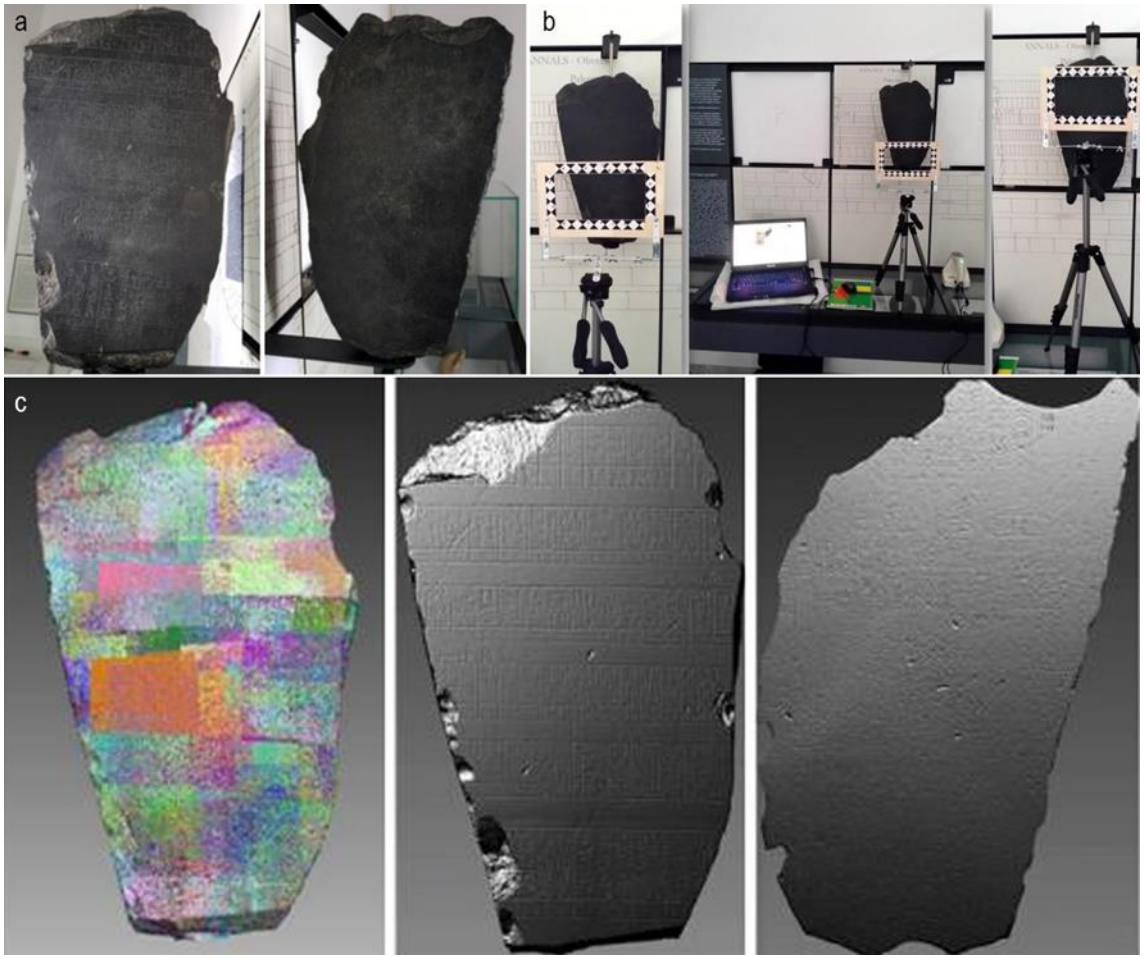


Figura 4. a) Piedra de Palermo. b) Proceso de escaneado por medio de marcadores. c) Alineación de los escaneados y resultado final de la malla. © Francesco Di Paola y Laura Inzerillo.

En un interesante estudio realizado sobre las Grutas de Longmen, los investigadores emplearon técnicas de escaneado terrestre TLS y escáneres de luz estructurada SLS para captar el estado crítico de conservación debido a la erosión sufrida por la piedra. Sin embargo, dadas las dimensiones de las esculturas, las resoluciones TLS eran insuficientes, lo que llevó a complementar la información con escáneres SLS. Teniendo en cuenta el reducido campo de registro de los escáneres SLS en comparación con los TLS, con la combinación de estos dos tipos de dispositivos, pudieron capturar el más mínimo detalle de cada una de las esculturas (Shao et al., 2019). Esto pone de manifiesto la eficacia de combinar distintas técnicas de escaneado para lograr los resultados deseados.

Algunos expertos han analizado carencias en ciertos aspectos poco investigados y disponibles en los escáneres de luz estructurada como la gestión del color. Si bien una de las grandes ventajas que presenta la fotogrametría es poder realizar este proceso con las imágenes fotográficas, un estudio reciente abarca dicho tema con el objetivo de mejorar la calidad de la textura de color. Para ello, digitalizaron con diversos escáneres de luz estructurada la tarjeta de calibración de color en el entorno donde se iban a digitalizar los artefactos. Posteriormente, se utilizó la textura obtenida del modelo para generar los perfiles de color ICC (*International Color Consortium*, Consorcio Internacional del Color) y corregir, con ellos, el color de los modelos 3D a partir de los artefactos digitalizados con esos escáneres. Los resultados han corroborado la reducción de error del color mediante este sistema (Felicísimo & Polo, 2022).

Con el paso de los años, han sido numerosos los inventos y patentes en este tipo de aparatos, con sistemas más o menos complejos o portables, hasta llegar a los escáneres de última generación más utilizados hoy en día, basados en la luz estructurada de mano (Hollinger et al., 2013; Van Damme et al., 2020; de Lázaro et al., 2021; Montusiewicz et al., 2021). No obstante, como se ha podido apreciar en esta breve revisión bibliográfica, la aplicación más común de estos equipos sobre el patrimonio cultural ha consistido en la documentación del objeto y obra de arte, y en la difusión de estos para su puesta en valor.

2.1.2. Técnicas de fotogrametría

La fotogrametría se ha convertido en una de las técnicas más extendidas para digitalizar el patrimonio cultural debido a su alta eficacia, calidad, fidelidad y bajo coste. Permite reconstruir la posición, orientación, forma y tamaño, así como obtener características métricas y geométricas de los objetos o escenas a partir de múltiples imágenes tomadas desde distintos ángulos y posiciones (Kraus, 2007). En comparación con los escáneres de luz estructurada, la fotogrametría presenta diversas ventajas. Entre las más destacadas, se encuentra la posibilidad de gestionar el color de cada fotografía para lograr una alta precisión (Apollonio et al., 2017), capturar el objeto con diferentes fuentes de iluminación (visible, fluorescencia visible inducida por radiación UV o reflectografía infrarroja) en entornos lumínicos controlados (Grifoni et al., 2018; Lanteri et al., 2019), así como lograr modelos por medio de imágenes espectrales (Webb et al., 2018; Adamopoulos et al., 2020). Además, la textura de color también ofrece mayor calidad respecto a los escáneres. Ante estas ventajas, la fotogrametría se presenta como una herramienta de solución innovadora basada en diversos sensores pasivos, que permite adquirir información tridimensional de objetos sin necesidad de equipos especializados. Su uso se ha extendido enormemente tanto al patrimonio tangible como intangible (Guidi & Frischer, 2020, pp.631-697). Se ha convertido en una herramienta de bajo coste (Kirchhöfer et al., 2011; McCarthy, 2014) imprescindible para documentar nuestro legado patrimonial, así como los procesos de intervención que se realicen.

El proceso fotogramétrico exige una planificación y organización rigurosas en relación con las estrategias de captura, los materiales, las cámaras, los objetivos, la configuración de los parámetros de la cámara y la iluminación, entre otras cuestiones. Estos aspectos han de ser estudiados individualmente según las características de cada caso de estudio y el entorno en el que se encuentre el bien, ya que pueden influir significativamente en los resultados de la digitalización.

Son numerosas las prácticas de digitalización experimentadas y analizadas en determinadas condiciones espaciales y lumínicas de una gran variedad de bienes muebles e inmuebles. Los resultados de estos experimentos se han recogido en manuales de fotogrametría (Historic England, 2017a; Angheluta, 2019; Stylianidis, 2020) y artículos experimentales (Shafqat Malik & Guidi, 2018). Es importante destacar que, si bien una parte de la comunidad investigadora puede sugerir ciertas características con pequeñas variaciones a la hora de digitalizar un modelo concreto, así como diversos métodos durante el procesamiento digital, estas bases están sujetas a continuas modificaciones impulsadas principalmente por el progreso y la mejora de los programas informáticos y las cámaras. Gran parte del potencial de la fotogrametría está basado en la programación informática y, otra parte, en la cámara fotográfica. Ambos están en continua evolución y mejora, lo que permite lograr modelos de mayor calidad de manera más rápida. Así pues, existe una necesidad constante de actualizar y comparar las estrategias de captura, los parámetros y los equipos.

El proceso de digitalización del patrimonio cultural exige un compromiso y un tiempo considerables. Cuando se plantean proyectos de digitalización a gran escala, el proceso implica varias etapas, que van desde la captura de imágenes en condiciones de iluminación diferentes hasta el acceso a lugares complejos. A esto le sigue el procesamiento y post-procesamiento de los datos, que puede resultar muy laborioso (Dall'Asta et al., 2016). Por ello, diversos expertos han evaluado la calidad de los modelos bajo diferentes parámetros y procesos de obtención para garantizar unos resultados óptimos. Si bien son muchos los aspectos que se deben tener en cuenta a la hora de realizar la toma fotográfica, a lo largo de este apartado se ha considerado oportuno mostrar solo los estudios más relevantes y necesarios, considerados cruciales a la hora de digitalizar de modo riguroso la tipología de objetos elegidos en esta investigación.

2.1.2.1. Problemáticas, materiales y parámetros de configuración para la correcta documentación fotogramétrica

En el contexto del ámbito de la fotogrametría, la cámara fotográfica desempeña un papel decisivo a la hora de determinar la calidad del modelo resultante. Se han realizado varios estudios para analizar el impacto de diferentes cámaras y objetivos en cuanto a la calidad de la textura de color y de las mallas obtenidas en los modelos fotogramétricos. En el mercado actual existen multitud de modelos de cámaras fotográficas, por lo que el análisis del potencial de cada tipo de cámara será determinante a la hora de valorar una documentación de calidad. Aspectos importantes por destacar son el sensor y los objetivos. Respecto al sensor, cuanto mayor sea el número de píxeles que registra, mayor será la calidad de la imagen (Sapirstein & Murray, 2017). Esto se verá traducido en una mejora del detalle y de la fidelidad a la hora de obtener tanto el volúmen como la textura cromática del modelo. Por otro lado, según los tipos de objetivos empleados, los niveles de detalle pueden variar, ya que algunos logran capturar detalles más finos que otros (Lastilla et al., 2019). Varias investigaciones han indicado los efectos adversos del uso de objetivos con capacidad de *zoom*, al dar lugar a relevantes distorsiones (Matsuoka, 2014; Sapirstein, 2016). Por esta razón, se desaconseja su empleo en la fotogrametría (Sapirstein & Murray, 2017).

Otra de las grandes problemáticas a la hora de realizar la captura fotográfica es la que tiene que ver con la gestión de la PDC (Profundidad de Campo). Su control adecuado será determinante,

ya que puede afectar a la precisión del modelo 3D. Este parámetro repercute aún más cuando digitalizamos objetos de pequeño formato y se emplea para ello objetivos macro. Valores muy bajos o altos de la PDC pueden perjudicar la alineación de la imagen, crear nubes de puntos con mayor ruido o repercutir en la calidad de la textura con elementos inexistentes o borrosos (E. Marziali & Marziali, 2019).

Diversos estudios se han centrado en modelos de mediano y pequeño formato, con el uso de objetivos macro. En ellos, los investigadores destacan que una pequeña apertura de diafragma y, por tanto, una PDC elevada, produce menos discrepancias entre los modelos 3D y el artefacto digitalizado (figura 5) (Farella, Morelli, Grilli, et al., 2022; Farella, Morelli, Rigon, et al., 2022). Sin embargo, se ha observado que una apertura de diafragma excesivamente pequeña también puede empeorar el resultado, tal como se refieren otros autores, dando lugar a variaciones en la nitidez de la imagen según la distancia de la cámara (Webb et al., 2020). De acuerdo con los análisis expuestos, para lograr un nivel de nitidez aceptable y, con ello, mayor calidad y detalles, sería conveniente emplear valores medios del PDC. Un valor de f/8 ofrecerá una calidad ideal (Sapirstein & Murray, 2017). En trabajos más recientes, se ha recurrido al apilamiento de enfoque con el fin de garantizar que el modelo 3D resultante sea más preciso y detallado (Ravanelli et al., 2022).

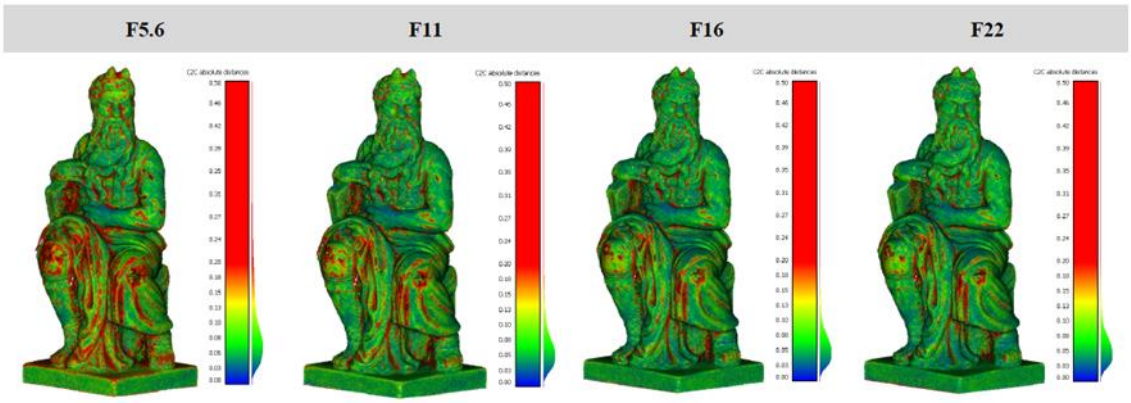


Figura 5. Análisis de diferentes focales. Rango [0,00/0,50 mm]. © Elisa Mariarosaria Farella, Luca Morelli, Eleonora Grilli, Simone Rigon y Fabio Remondino.

Otros estudios han realizado comparaciones entre la calidad de los modelos obtenidos mediante el procesamiento de las imágenes fotográficas con distintos programas de levantamiento fotogramétrico (figura 6) (Đurić et al., 2014; Bianconi et al., 2017; Adamopoulos et al., 2019). En este punto cabe recalcar que la calidad del modelo está condicionada, por un lado, por el solapamiento que hay entre una imagen y otra, por el proceso de revelado digital de las fotografías, así como por el programa informático. Este último dependerá de las herramientas y algoritmos, pues unos lograrán mejores resultados en la precisión de la malla o textura de color que otros.

Por otro lado, el potencial de los programas informáticos está en continua evolución con algoritmos cada vez más avanzados que permiten agilizar los trabajos de manera más rápida y de mejor calidad. Por ello, los estudios en este campo deben revisarse periódicamente para reflejar los avances actuales. En distintos análisis realizados por profesionales del sector se recalca la necesidad de utilizar programas informáticos capaces de procesar imágenes de alta calidad para garantizar el máximo detalle en la textura de color y malla del modelo 3D.

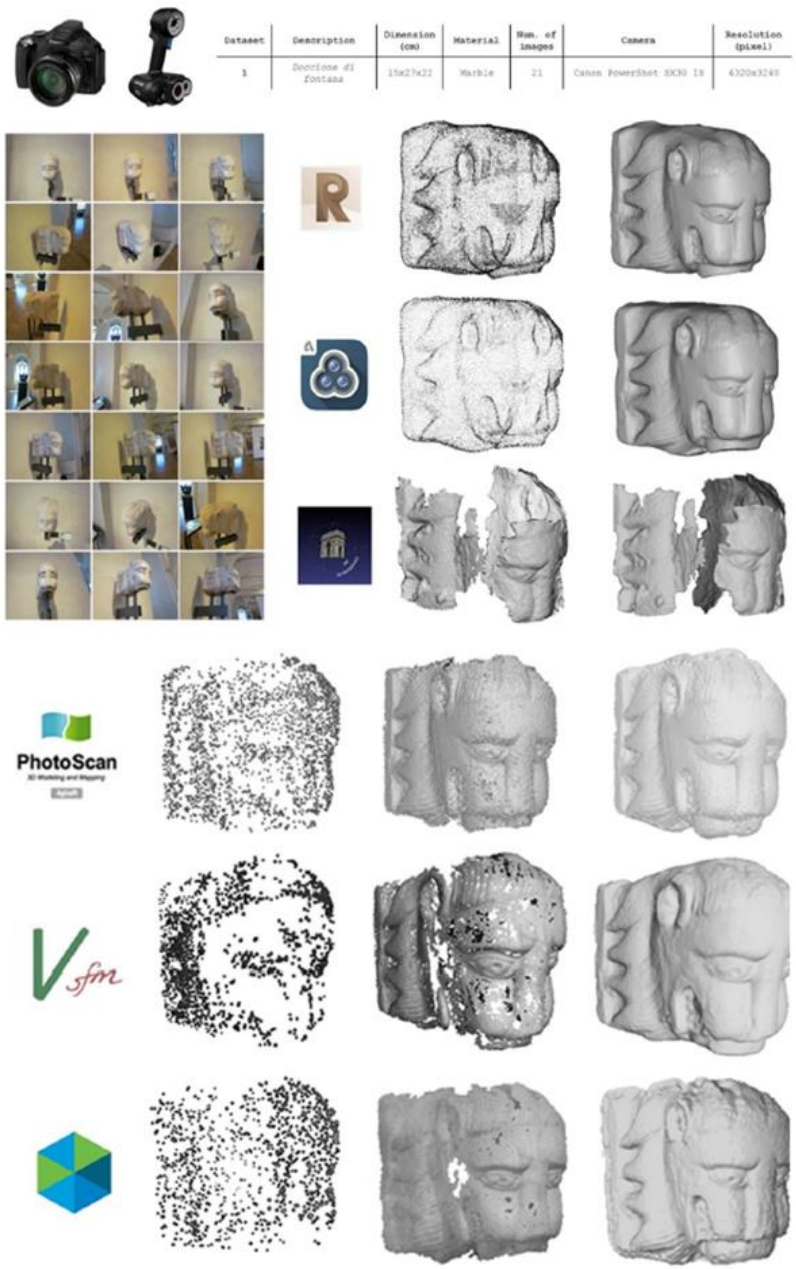


Figura 6. Análisis de diferentes programas informáticos de fotogrametría. © Fabio Bianconi, Sofia Catalucci, Marco Filippucci, Roberto Marsili, Michele Moretti, Germán Rossi y Emanuela Speranzini.

Aparte de los materiales de captura mencionados hasta el momento, las escalas y marcadores son imprescindibles durante el registro fotográfico. Los marcadores facilitan la orientación de las fotografías, además, permite obtener unas referencias y parámetros de medición. Los propios programas informáticos de fotogrametría presentan la posibilidad de imprimir estos marcadores y cuentan con herramientas de escalado de alta precisión (Metashape, 2023). Este procedimiento se aplicó, por ejemplo, en una de las esculturas de terracota que representan los ejércitos de Qin Shi Huang (259 a. C.- 210 a. C) (Guidi & Frischer, 2020, pp.676-688). Mediante dos puntos de referencia, el programa informático calculó la distancia y escala del objeto según la medida marcada (figura 7). No obstante, a pesar de realizar las mediciones manuales e insertarlas en el programa informático, estas referencias producen errores. Estos fallos se deben a una relación adimensional, por ejemplo, 1: k donde k es la dimensión máxima entre el sujeto dividido por el

error absoluto (Fraser & Brown, 1986). De hecho, son muy frecuentes los errores y no solamente se debe a la omisión o insuficientes marcadores, sino también a la óptica de los objetivos de baja calidad y a una inadecuada calibración (Sapirstein & Murray, 2017).



Figura 7. Terracota guerrero del ejército de Qin Shi Huang. © Gabriele Guidi y Bernard D. Frischer.

Otros estudios revelan la importancia de estos marcadores, sobre todo en figuras de pequeño tamaño, y han propuesto la implementación de una metodología de alta precisión para asegurar una gran calidad gracias a un escalado de 1:10.000 (figura 8) (S. Marziali & Dionisio, 2017; Sapirstein, 2018).

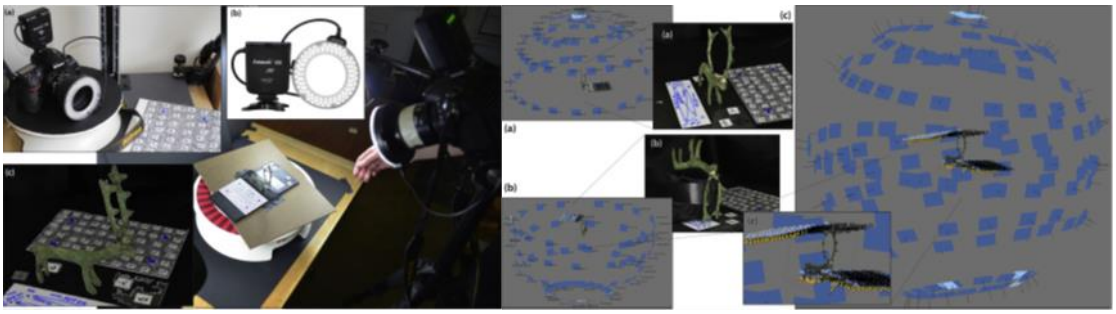


Figura 8. Proceso de digitalización con marcadores y obtención del modelo. © Philip Sapirstein.

Sin embargo, en objetos pequeños o medianos esta precisión puede resultar alterada si los marcadores no se ubican con precisión. Incluso con diferencias micrométricas de la posición de los puntos, la escala se puede ver afectada. Ello deja claro que la fotogrametría por sí sola no logra determinar la escala real. Por ello, durante la captura fotográfica es imprescindible usar escalas para tener una referencia real y precisa. Para resolver este problema, organizaciones especializadas en la captura digital han diseñado diversas escalas calibradas con precisiones de 1/10 milímetros (figura 9). Estas herramientas se componen de varios marcadores que sirven para establecer puntos de referencia, definir la escala y ayudar en la alineación de la imagen. Presentan tres tipos de marcadores circulares, siendo estos soportados por diversos programas informáticos de fotogrametría. Se dividen en codificados y no codificados. Los codificados siempre se nombran de manera consistente, mientras que los no codificados se nombran de modo secuencial por el orden en el que el programa los identifica (Cultural Heritage Imaging, 2015).



Figura 9. Barras de escalas. © Cultural Heritage Imaging.

Cuando existe una rigurosa planificación y control del entorno, junto como una configuración adecuada de la cámara, los resultados a obtener incluso con métodos simples pueden ser de altísima calidad (Sapirstein, 2018).

Si bien la técnica convencional de la fotogrametría está basada prácticamente en el uso de una única cámara fotográfica, existen otros estudios más avanzados consistentes en la captura con un número más elevado de cámaras fotográficas (Leipner et al., 2016; Hafeez et al., 2017) o registros estereoscópicos. Esta última técnica está centrada en reproducir el máximo detalle posible, pudiendo observar la captura estereoscópica mediante dos cámaras. La primera es una cámara normal para la fotogrametría PG, dotada de una luz flash. La geometría global obtenida gracias a esta cámara mediante la fotogrametría convencional se fusionó con los resultados logrados por la segunda cámara utilizada durante la toma fotográfica según la técnica PS denominada (*Photometric Stereo*, Fotogrametría Estéreo) para resaltar, mediante las normales, los detalles más minuciosos (figura 10) (Yeh et al., 2016).

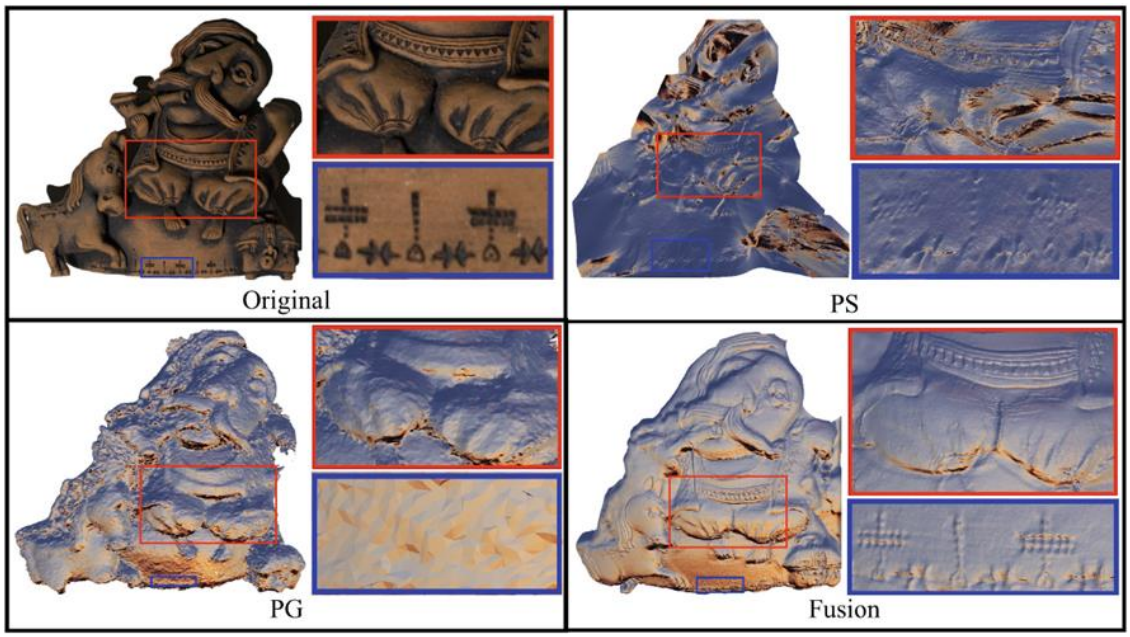


Figura 10. Fusión de la geometría fotogramétrica PG con la información PS. © Chia-Kai Yeh, Nathan Matsuda, Xiang Huang, Fengqiang Li, Marc Walton y Oliver Cossairt.

Por otro lado, durante el registro fotogramétrico hay que tener en cuenta también la materialidad que conforma cada objeto, pues según sus características van a crear un impacto considerable en el acabado, precisión y calidad del modelo 3D. Los materiales y estrategias de captura han de adaptarse de manera específica a las propiedades físicas de cada obra (Ch'ng et al., 2019). Por lo general, las grandes limitaciones que presenta la fotogrametría son en el correcto registro volumétrico y textura de color en zonas muy blancas, oscuras, colores uniformes, materiales reflectantes o brillantes. Cuando un modelo reúne estas características, la precisión será alterada debido a que los programas informáticos de fotogrametría no tienen mucha información de análisis comparativo entre una imagen y otra y, por tanto, es propenso a generar errores graves. Por el contrario, en modelos con textura, colores variados y sin brillos, los programas informáticos tienen mucha información para comparar y calcular puntos en común y, como resultado, los acabados son realmente buenos. Pero volviendo a la problemática de los brillos, que es el principal factor presente en los modelos anatómicos científicos seleccionados para esta investigación, dependiendo del grado de los mismos o de si la obra presenta zonas translúcidas o transparentes, la dificultad del correcto registro aumenta. En tales escenarios, es preciso utilizar diversas estrategias de iluminación y captura de imagen con el objetivo de minimizar los brillos y reflejos. Hay casos de extrema complejidad que diferentes expertos han abordado para solventar estas problemáticas con estrategias muy rigurosas en objetos de vidrio (Qian et al., 2016; Wu et al., 2018). En el caso de estos materiales transparentes o translúcidos, los niveles de estudio y equipamiento, como polarizadores o retroiluminación, son más complejos, pero necesarios para reproducir fielmente el modelo.

2.1.2.2. Otros sistemas y métodos de captura fotogramétrica

Retomando de nuevo el tema de las cámaras fotográficas, el rápido progreso en la investigación sobre esta tecnología adaptada a dispositivos móviles ha avanzado de manera significativa, hasta el punto de convertirse en un tema de estudio en la digitalización de objetos. Aunque en este trabajo no se ha abordado el uso de los dispositivos móviles, merecen ser destacadas algunas de las publicaciones llevadas a cabo en los últimos años, ya que el flujo de trabajo y los resultados alcanzados resultan realmente interesantes para mejorar las estrategias de captura.

Cada vez es más habitual encontrar artículos comparativos entre diversas cámaras fotográficas o los teléfonos móviles modificados, algunos espectralmente, u otros dispositivos como cámaras térmicas para la obtención de modelos 3D enfocados al análisis de las obras o acerca de sus propiedades métricas (Adamopoulos et al., 2019). Cada uno de los dispositivos de captura proporciona una determinada información, ya sea de mayor o menor calidad. Sin embargo, en general, estas investigaciones persiguen ofrecer un equipamiento portátil cuyo montaje y precio sean mínimos. Esto representa una gran ventaja del empleo de dispositivos móviles, ya que son más compactos y ligeros que cualquier cámara profesional y, además, ofrecen funciones adicionales como GPS (*Global Positioning System*, Sistema de Posicionamiento Global) para la captura de datos de orientación y localización.

Un ejemplo de este tipo de estudios es el realizado por Collins et al. (2019), en el que se comparó la calidad del registro de objetos de pequeño tamaño realizado mediante una cámara digital réflex de 12,2 megapíxeles y un teléfono móvil de 8 megapíxeles. El análisis de resultados

reveló que la cámara réflex alcanzaba una precisión inferior a 40 µm, por 80 µm en el caso del dispositivo móvil (figura 11). El documento aclara que la cámara réflex ofreció mejores resultados dada la calidad del sensor y la óptica del objetivo macro 50 mm, en comparación con los 8 mm de la cámara del dispositivo móvil. A pesar de ello, el flujo de trabajo desarrollado para automatizar la toma fotográfica por medio de la incorporación de un sistema Arduino Nando y un motor en el plato giratorio, destaca el interés de obtener procesos realmente rápidos, y ofrece una calidad aceptable tanto en la malla como en la textura de color.

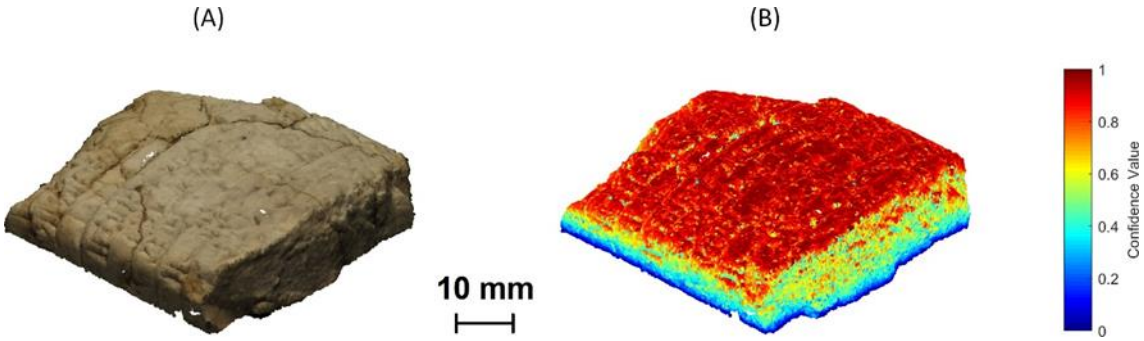


Figura 11. a) Nube de puntos densa reconstruida. b) Nivel de confianza de cada punto. © Tim Collins, Sandra I. Woolley, Erlend Gehlken y Eugene Ch'ng.

Otra interesante investigación sobre la adquisición de modelos 3D por medio de dispositivos móviles plantea un flujo de trabajo más fácil y asequible. Di Paola e Inzerillo (2018), han recurrido a estos artilugios para lograr únicamente la textura de color. En otros casos, debido a que el flujo de trabajo de una fotogrametría convencional puede ser más laborioso, esta nueva visión está pensada, sobre todo, para el personal no cualificado del entorno de los museos (figura 12) (Apollonio et al., 2021).



Figura 12. Materiales y estrategias de captura para la digitalización mediante el teléfono móvil. © Fabrizio Ivan Apollonio, Filippo Fantini, Simone Garagnani y Marco Gaiani.

Para lograr una apariencia similar a la malla original, expertos en la materia, después de realizar la retopología de la malla con el fin de reducir el número de polígonos, han aplicado diversos mapas de normales. Finalmente, concluyeron el modelo con la textura de color a través del uso de herramientas de gestión de color, un proceso imprescindible para la reproducción fiel del patrimonio cultural. Esta investigación recalca que los dispositivos móviles tipo *Sized CCP* ofrecen resultados óptimos. Los datos existentes del ColorChecker Classic ofrecen un rango de error medio prácticamente idéntico al de la cámara réflex (figura 13) (Apollonio et al., 2021). Para asegurar una mayor precisión en la gestión de color ejecutada, una vez finalizada la fotogrametría, volvieron a someter la textura a procesos de gestión de color para evitar posibles variaciones que suelen sufrir por los propios programas informáticos fotogramétricos (Gaiani et al., 2020). Esta revisión concluye que mediante determinados teléfonos móviles se pueden lograr resultados bastante precisos y de calidad, tanto en la obtención de la malla como de la textura de color.

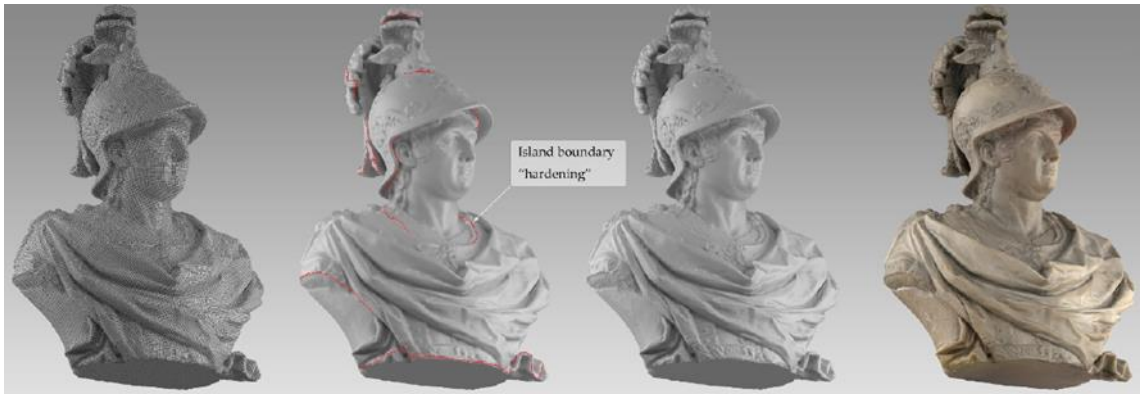


Figura 13. Proceso de tratamiento de la malla en *quads* (polígonos de 4 lados) y aplicación de los mapas de normales. © Fabrizio Ivan Apollonio, Filippo Fantini, Simone Garagnani y Marco Gaiani.

El avance constante de la fotogrametría ha propiciado la aparición de técnicas novedosas para la creación de modelos 3D por medio de fotogramas extraídos de un vídeo. Así, la videogrametría se ha convertido también en una estrategia novedosa para capturar con rapidez los objetos. Aunque este enfoque es menos habitual, en los últimos años se han realizado diversos estudios y experimentos para evaluar su eficacia.

Destaca en esta línea un trabajo reciente donde se compararon los procesos de obtención de imagen y los resultados alcanzados en los modelos virtuales entre la tradicional fotogrametría y la videogrametría (Torresani & Remondino, 2019). Los vídeos analizados se tomaron con una resolución de 1920 x 1080 px, por medio de un teléfono móvil tipo Samsung S9 plus. En función de los resultados obtenidos, los autores concluyeron que esta técnica podría servir como alternativa a la fotogrametría convencional con cámaras réflex. Si bien es cierto que, durante la extracción de los fotogramas, ya sea manual o automática por medio de diversos programas informáticos, los detalles se reducen debido a que, con frecuencia, los fotogramas registran parte del movimiento o genera superposiciones que dejan como resultado zonas poco nítidas. En investigaciones más precisas, se han implicado el uso de dos tecnologías de cámaras de vídeo, una para la localización y otra para la cartografía simultánea. Este sistema se ha comparado con un escáner láser tipo Fro Focus3D X 330 y los resultados fueron bastante similares (Ortiz-Coder & Sánchez-Ríos, 2020).

Esta breve revisión permite comprobar que tanto las cámaras réflex, mirrorless o teléfonos móviles, empleados para la toma fotográfica o videográfica, son herramientas aptas para la fotogrametría, dependiendo del nivel de precisión y detalles necesarios que se precise obtener. Sin embargo, en el caso de un dispositivo móvil aún no dispone de medios suficientes que puedan competir con las de las cámaras réflex o mirrorless. Y esto es debido a dos aspectos principales. El primero de ellos se debe, principalmente, al tamaño del sensor y, en segundo lugar, a las lentes. Las dimensiones de los sensores de los teléfonos móviles son muy reducidas en comparación con cualquier cámara profesional, por lo que no pueden capturar tanta luz como los sensores más grandes de las cámaras réflex, ni lograr mayor resolución, lo que provoca un enorme incremento del ruido en la imagen. Además, las cámaras réflex o mirrorless ofrecen mayor control manual sobre ajustes clave, como la escala de sensibilidad ISO, la velocidad de obturación y diafragma, entre otras, imprescindibles para afrontar determinadas condiciones de iluminación. Los dispositivos móviles en estos aspectos, pese a que permiten su manipulación manual, suelen depender de ajustes automáticos poco adecuados para la fotogrametría profesional.

Por otro lado, los sistemas de estabilización óptica creados en los teléfonos móviles son realmente sofisticados y pueden producir distorsiones geométricas en las imágenes. Los modelos 3D obtenidos con los dispositivos móviles requieren de un postproceso de la malla para lograr resultados óptimos (Apollonio et al., 2021). Su utilización se queda bastante escasa cuando de lo que se trata es de documentar de modo fielmente. No obstante, estos dispositivos son herramientas necesarias a fin de evaluar su potencial, como han señalado varios autores (Akca & Gruen, 2009). Por todo ello, los modelos 3D obtenidos por medio de fotografías con cámaras réflex o mirrorless, serán mejores que los logrados por cualquier teléfono móvil. Asimismo, los fotogramas también apuntan a que las cámaras réflex o mirrorless muestran mejores resultados respecto a los dispositivos móviles, pero cualquiera de ellos, independientemente de las herramientas utilizadas, no alcanzan la precisión y calidad de las fotografías.

2.1.2.3. Gestión de color

En el ámbito del patrimonio cultural, la representación precisa del color es un aspecto crucial. Las imágenes digitales, independientemente de la cámara, interpretarán las fotografías con unos valores cromáticos diferentes a la visión humana. Con el fin de reproducir y asegurar la máxima precisión del color, lo más cercana posible a la percepción humana, las imágenes necesitan ser tratadas mediante un proceso de gestión del color a través de perfiles de cámaras.

La gestión del color es una ciencia que garantiza una reproducción precisa del color mediante el control de las características cromáticas de los dispositivos de entrada, de visualización y de salida a lo largo de un flujo de trabajo digital (International Color Consortium, 2010). La caracterización del color se puede lograr mediante diversas muestras de color basadas en las cartas de Munsell o Pantone, un modelo de espacio adaptado a la percepción humana (CIE Lab) CIE (*Commission internationale de l'éclairage*, Comisión Internacional de la Iluminación) o mediante valores de potencia espectral (Ruiz & Pereira, 2014).

Numerosos estudios han explorado la cuestión de la gestión del color en diversos campos (Benedetti et al., 2012; Finlayson et al., 2015). A pesar de ello, esta revisión se centra solo en aquellos trabajos relevantes aplicados al patrimonio cultural.

La reproducción precisa del color en las imágenes digitales depende de varios factores, como de las condiciones de iluminación presentes durante la toma fotográfica, ya sea natural, artificial o mixta, de las características técnicas de la cámara y de la representación matemática, es decir, de la información del color a lo largo del proceso de digitalización (Gaiani et al., 2003). En los casos donde los entornos de la toma de datos tienen una luz mixta o solamente natural, la reproducción fiel del color resulta más compleja. Para llevar a cabo este proceso será imprescindible capturar al menos una de las fotografías con una carta de color con las mismas condiciones de iluminación empleadas en toda la documentación. Además, resultará muy útil registrar el CRI (C*olor Rendering Index*, Índice de Reproducción Cromática) y la temperatura de color de las fuentes de luz artificiales mediante un espectrofotómetro para poder afinar las imágenes con calidad (Ruiz & Pereira, 2014).

Para saber con exactitud qué color se está viendo, es necesario representarlo de modo numérico a través de la disciplina colorimétrica (Pereira, 2013, p.21). Un control adecuado de estas características evitará diversos escenarios problemáticos (Molada-Tebar et al., 2017, 2019). Sin embargo, lograr una alta precisión en la gestión del color según las directrices internacionalmente reconocidas ISO/TS 19264–1:2017 (Organización Internacional de Normalización [ISO], 2017; Rieger, 2016), puede convertirse en un proceso bastante complejo (Olejnik-Krugly & Korytkowski, 2020). Además, aparte de la iluminación artificial o natural, según qué carta de color, pantallas de visualización y cámaras se empleen, los resultados van a variar en mayor o menor medida. Asimismo, el programa informático utilizado para crear los perfiles también presenta diferencias, ya que trabajan con algoritmos distintos (Korytkowski & Olejnik-Krugly, 2017). Por tanto, según la decisión de los materiales a usar y el proceso de tratamiento de la imagen, vamos a obtener unos resultados u otros.

Estudios sobre la calidad de diversas cámaras con sus respectivos perfiles optimizados han sido objeto de análisis con el fin de comparar y poder seleccionar las mejores herramientas según los criterios de FADGI (*Federal Agencies Digitization Initiative*, Iniciativa de Digitalización de las Agencias Federales). Los expertos concluyeron que prácticamente todas las cámaras analizadas con perfiles optimizados generan importantes variaciones a la hora de valorar la calidad del color, por lo que han de ser evitadas (Berns & Smith, 2012).

En otros casos se han analizado de manera minuciosa los rangos de error que se producen entre diferentes tipos de perfiles ICC, DCP (*Digital Cinema Package*, Paquete de Cine Digital) o DCP+ICC y espacios de color (ProPhoto RGB, AdobeRGB o Adobe sRGB) con distintas cámaras réflex (PhaseOne 645DF, Canon EOS 5D Mark II o APS-C Nikon 7100), bajo diferentes fuentes de iluminación (luz continua SpectraLight D50 QC Light Booth, CCT55002K; luz continua de tungsteno SpectraLight QC Light Booth; luz discontinua, CCT54820K). Los profesionales concluyeron que, para lograr una alta fidelidad y calidad en una imagen, los perfiles DCP no son suficientes en comparación con los perfiles ICC según los estándares ISO/TS 19264–1:2017 (ISO, 2017; Rieger, 2016). Respecto al perfilado mixto DCP+ICC, mencionan que el perfil DCP se podría omitir, ya que los valores logrados no aportan más información que los facilitados por ICC únicamente (Korytkowski & Olejnik-Krugly, 2017).

Un grupo de fotógrafos experimentados del Rijksmuseum, con una amplia trayectoria en la gestión del color, analizaron en profundidad por qué determinados perfiles de cámara producen

desviaciones de color, sobre todo, en los valores negros de la obra. En concreto, analizaron la carta X-Rite Colorchecker SG por medio de mediciones a través de un espectrofotómetro modelo i1Pro. Los resultados obtenidos revelaron que los parches negros de la carta mencionada producen importantes desviaciones del color. Por tanto, para lograr una calidad y rigurosidad adecuada, es crucial utilizar datos espectrofotométricos propios, en lugar de los datos proporcionados por el proveedor (Kirchner et al., 2021).

La reproducción exacta del color puede ser todo un reto cuando se intenta conseguir una percepción correcta en un monitor RGB (*Red, Green, Blue* - Rojo, Verde, Azul). Un flujo de trabajo de calibración del color adecuado implica una revisión exhaustiva de la compensación de la exposición, la corrección óptica, la eliminación de ruido de la imagen, la nitidez, la aplicación del balance de blancos y la creación de perfiles ICC. Estos dos últimos pueden realizarse a través de una carta de color Gretag Macbeth y del programa informático X-Rite ColorChecker Passport (Apollonio et al., 2014). Con ello, se consigue una gestión del color fiel al objeto real en unas condiciones de iluminación ideales, que sería muy difícil de lograr en entornos naturales sin este proceso.

Perseguir la máxima precisión y fidelidad es todo un desafío y así lo muestran diversos especialistas mediante un flujo de trabajo más definido en diferentes aspectos técnicos como los iluminantes, el cálculo de los valores triestímulos, los espacios de color, las diferencias de color, o las coordenadas de cromaticidad. Resulta pertinente recurrir a ecuaciones polinómicas de segundo orden, ya que permiten transformar los datos del espacio RGB crudo de la propia cámara fotográfica al espacio de color CIE XYZ (Molada-Tebar et al., 2017). Por medio de la caracterización se establecen una relación entre los parámetros RGB del dispositivo y las coordenadas triestímulo generadas por el colorímetro CIE; así, las imágenes de salida con un espacio sRGB ofrecen valores independientes al sensor de la cámara y, por tanto, unos datos más fiables (Molada-Tebar et al., 2019).

Estos aspectos son especialmente relevantes a la hora de documentar el patrimonio cultural, sobre todo en tratamientos de conservación-restauración. Protocolos operativos para el control de la calidad del color en procesos de limpiezas con modelos 3D han sido puestos a punto por varios autores (figura 14) (Apollonio et al., 2017).



Figura 14. Gestión del color aplicada en los procesos de limpieza. Cabeza de Neptuno © Fabrizio Ivan Apollonio, Marco Gaiani, Vilma Basilissi y Laura Rivaroli.

En el contexto de la imagen digital, el uso de técnicas de gestión del color puede mejorar significativamente la calidad de la textura del color. Sin embargo, es importante tener en cuenta que la eficacia de estas técnicas puede verse afectada por diversos factores, como las condiciones de iluminación, los ajustes de la cámara y la resolución de la imagen.

2.1.3. Combinación del escaneado y la fotogrametría

Como se ha puesto de manifiesto en los apartados anteriores, no existe una única técnica o una mejor herramienta para la digitalización del patrimonio cultural. La elección de un sistema u otro, o de su combinación, estará condicionada por la tipología material y volumétrica del objeto, por el grado de precisión y resolución requerido, por los tiempos y costes disponibles, así como por el entorno de registro.

En un interesante estudio sobre la Fuente de Neptuno de Bolonia (Italia), los autores han recurrido a sistemas combinados de escaneado láser terrestres TLS, el escáner de luz estructurada SLS, y la fotogrametría, con el fin de lograr la máxima precisión y resolución posible en este modelo tan complejo debido tanto a sus materiales constitutivos, como a los elementos volumétricos y a las características dimensionales (figura 15) (Girelli et al., 2019).



Figura 15. a) Digitalización mediante escáneres láser. b) Digitalización por medio de escáner de luz estructurada. c) Digitalización por medio de fotogrametría. d) Resultado final del modelo 3D tras combinar las tres técnicas. © Valentina A. Girelli, Maria Tini, Mirko Dellapasqua y Gabriele Bitelli.

El análisis de estas técnicas combinadas disponibles para la digitalización del patrimonio cultural, con diversos sensores pasivos y activos, así como el desarrollo de numerosos algoritmos y sistemas informáticos para la adquisición de datos, puede consultarse en numerosos trabajos ya publicados (Manson et al., 2008; Koch & Kaehler, 2009; Tucci et al., 2015; Mandelli et al., 2017;

Segreto et al., 2017; Dostal & Yamafune, 2018; Ramm et al., 2022). Comparaciones métricas entre diversos dispositivos móviles y cámaras réflex para la fotogrametría, así como escáner láser terrestre TLS, de luz estructurada SLS, (Adamopoulos, Rinaudo, et al., 2020), y procesos videogramétricos comparados con escáneres láser para objetos cercanos CRLS (Herráez et al., 2016), están en constante análisis con el fin de ofrecer actualizaciones acerca de los resultados y el potencial de cada una de estas técnicas sobre diversos bienes.

El tradicional proceso manual de escaneado y fotogrametría, es decir, la digitalización a mano ha sido suplantado progresivamente por sistemas robóticos muy avanzados que facilitan el registro volumétrico y el tratamiento de datos automatizados (figura 16) (De Stefano et al., 2016; Santos, Ritz, Fuhrmann, & Fellner, 2017; Santos, Ritz, Fuhrmann, Monroy, et al., 2017). Dichos sistemas han demostrado su eficacia, sobre todo cuando requiere de la combinación de técnicas para asegurar una gran resolución y calidad tanto en el volumen como en la textura de color y cuando se precisa digitalizar de modo masivo el patrimonio.

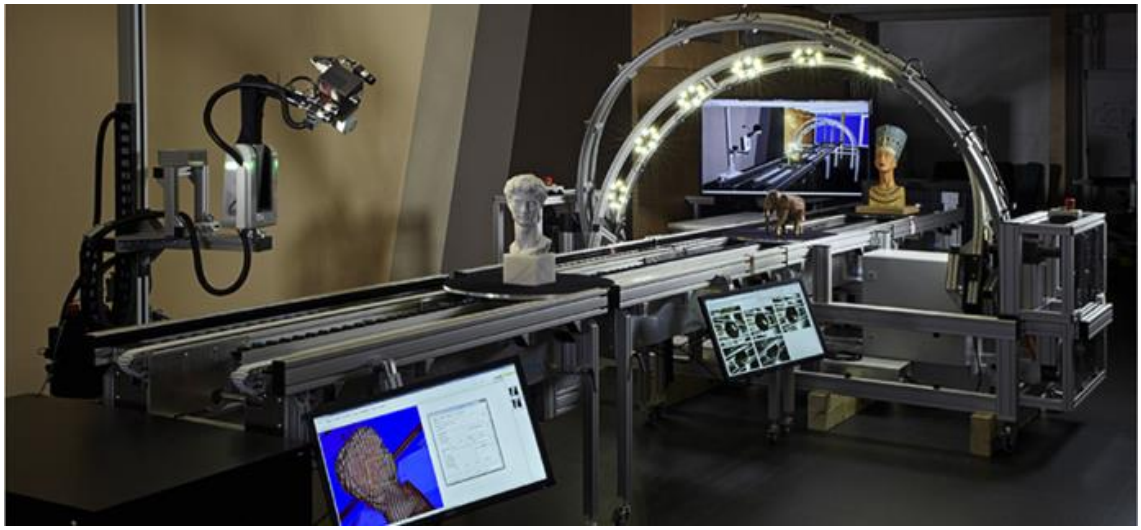


Figura 16. Sistemas automatizados de digitalización de escaneado y fotogrametría CultLab3D. © Antonio De Stefano, Reimar Tausch, Pedro Santos, Arjan Kuijper, Giuseppe Di Gironimo, Dieter W. Fellner y Bruno Siciliano.

Por lo general, se ha determinado que la fotogrametría ofrece su máximo potencial en la captura de texturas de color, incluso en ocasiones favorece el correcto registro de las mismas en áreas complejas. No obstante, la calidad de esta técnica suele estar limitada por factores como las especificaciones de la cámara y las condiciones de iluminación. Además, la fotogrametría es relativamente económica en comparación con muchos dispositivos de escaneado y ofrece una mayor flexibilidad en cuanto a la captura de modelos de diversos tamaños.

En el caso del escaneado láser terrestre TLS, el láser para objetos cercanos CRLS o de luz estructurada SLS, siempre va a presentar algunas ventajas sobre la fotogrametría. Cuando se abordan investigaciones científicas, la alta precisión que ofrecen en el volumen general y detalles, suele ser superior a la fotogrametría. Por otro lado, puede ser más eficiente en cuanto a los tiempos de registro y automatizado, ya que un solo escaneado consigue proporcionar toda la información requerida en comparación con las numerosas fotografías necesarias para lograr un resultado similar en la fotogrametría. Además, se deben tener en cuenta la considerable cantidad de trabajo manual y el tiempo dedicado al procesamiento de las fotografías antes de desarrollar el modelo 3D.

2.1.4. Documentación científica, análisis y estudio de los datos virtuales

Diversos métodos de digitalización 3D permiten documentar con precisión el volumen y la textura cromática de un objeto. Aunque la explotación de esta información se ha centrado principalmente en la documentación y difusión a gran escala, como se ha comentado ya, esta no resulta suficiente para los profesionales del sector de la conservación y restauración del patrimonio cultural. Por ello, algunos equipos interdisciplinares han intentado establecer relaciones entre los datos por medio de múltiples aplicaciones, que se reflejarán a continuación.

En general, uno de los primeros procesos antes de la intervención consiste en documentar y cartografiar las patologías. Inicialmente, la cartografía se realizaba de modo manual mediante calcos en diferentes hojas de papel y láminas transparentes. Según han ido evolucionando las tecnologías, estos mapas se elaboraron de manera digital en 2D. Entre los programas informáticos más relevantes destaca Adobe Photoshop, Adobe Illustrator, o Autocad, que ofrecen múltiples opciones y combinaciones para obtener el resultado necesario en cada caso. A pesar de la gran información que permiten representar estas cartografías de patologías en 2D sobre una imagen fotográfica o dibujo, carecen del carácter preciso y global de un modelo tridimensional.

A partir del modelo escaneado, fotogramétrico o combinado, es posible efectuar numerosas representaciones cartográficas. Su desarrollo se ha realizado relativamente hace poco tiempo en el campo de la arquitectura (Brunetaud et al., 2012). En el ámbito de la escultura, su aplicación es más reciente (Esclapés Jover et al., 2017; Sterp, 2017; Apollonio et al., 2018). La evolución de las representaciones cartográficas digitales 3D es constante, fruto del rápido desarrollo y mejora de los programas informáticos de infografía 3D. Esta evolución ha sido objeto de amplios análisis comparativos frente a los sistemas 2D convencionales, considerándose que los primeros ofrecen una información más precisa durante el proceso de creación de diversos mapas (figura 17) (Pfeuffer et al., 2018).

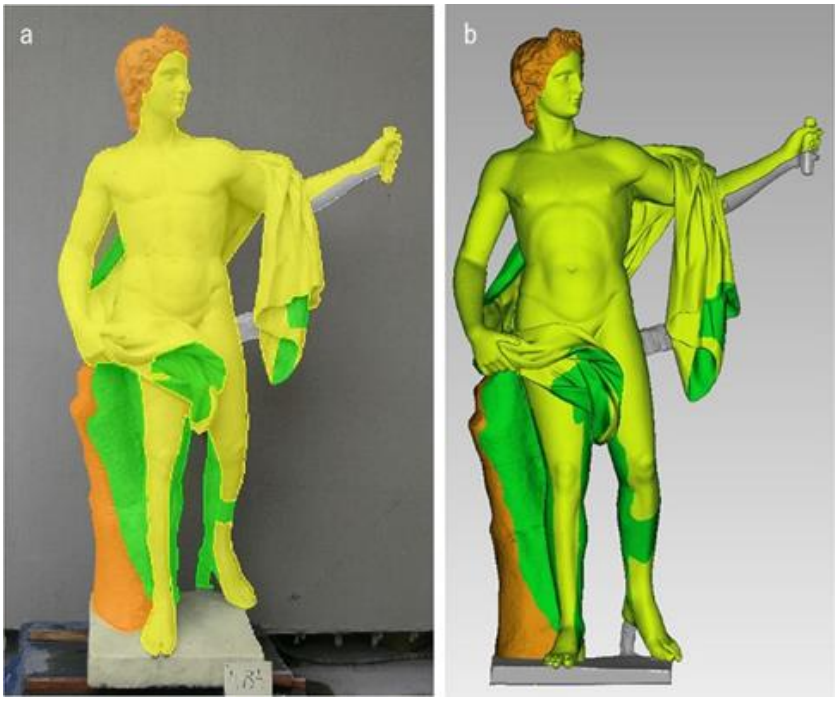


Figura 17. Escultura de Apolo, Potsdam Sanssouci. a) Cartografía 2D. b) Cartografía 3D. © Carolin Pfeuffer, Max Rahrig, Rolf Snethlage y Rainer Drewello.

La caracterización de los objetos relativa a su estado de conservación es un tema activo de investigación debido a la gran necesidad de mejorar los procesos de ejecución, así como las calidades y precisiones. En un interesante estudio, Grilli y Remondino (2019), han profundizado en diversos métodos automatizados de segmentación y clasificación de datos fiables y eficaces, con el fin de obtener con mayor rapidez las cartografías. Un factor significativo, aparte de calcular diversas patologías y materiales constitutivos del objeto, es que dichos mapas también ofrecen el porcentaje en relación con el área superficial del modelo, lo que enriquece enormemente no solo la detección de las alteraciones de la obra sino la obtención de datos cuantificados (figura 18).



Figura 18. Cartografías donde se han identificado los materiales no originales, así como el estado de conservación de la obra. © Eleonora Grilli y Fabio Remondino.

Las cartografías tridimensionales ofrecen varias ventajas con respecto a las bidimensionales. Entre las más destacadas cabe citar la precisión y calidad de las representaciones, una información más completa, global y holística, la posibilidad de cuantificar las alteraciones respecto al área superficial de la obra, y el poder contemplar el modelo desde todos los puntos de vista. Con ello, el conservador-restaurador adquiere una información y comprensión pormenorizada del diagnóstico de la obra.

Los estudios de análisis de datos para diagnosticar el estado de conservación de un objeto y obra de arte son cruciales en el sector de la conservación y restauración del patrimonio cultural. De ahí que diversos especialistas hayan valorado la necesidad de analizar y recabar datos científicos sobre los modelos 3D, con la puesta a punto de diversas aplicaciones. Los trabajos innovadores y de referencia, que han inspirado todas las investigaciones posteriores, fueron los llevados a cabo durante la restauración del David de Miguel Ángel, en los trabajos realizados durante los años 2002-2004. Fue un proyecto pionero en el que se exploraron los límites de la tecnología de análisis de aquella época para poner al servicio de los restauradores la posibilidad de estudiar y seleccionar los procedimientos de tratamientos más adecuados. Con ese objetivo, se realizaron registros visuales del particulado atmosférico en la superficie escultórica de la figura, medidas físicas, centros de masas, peso, distancias lineales, entre otras mediciones, así como análisis centrados en la caracterización petrográfica y colorimétrica del mármol, imágenes UV,

rayos X, etc., que se incorporaron al modelo 3D y se difundieron a través de una plataforma web (figura 19) (Callieri et al., 2004). De los resultados experimentados en aquel momento mediante la infografía 3D, dicha herramienta solamente insinuó su potencial, por lo que podría proporcionar nuevas aplicaciones en la conservación, restauración y documentación de los bienes culturales (Dellepiane et al., 2008).

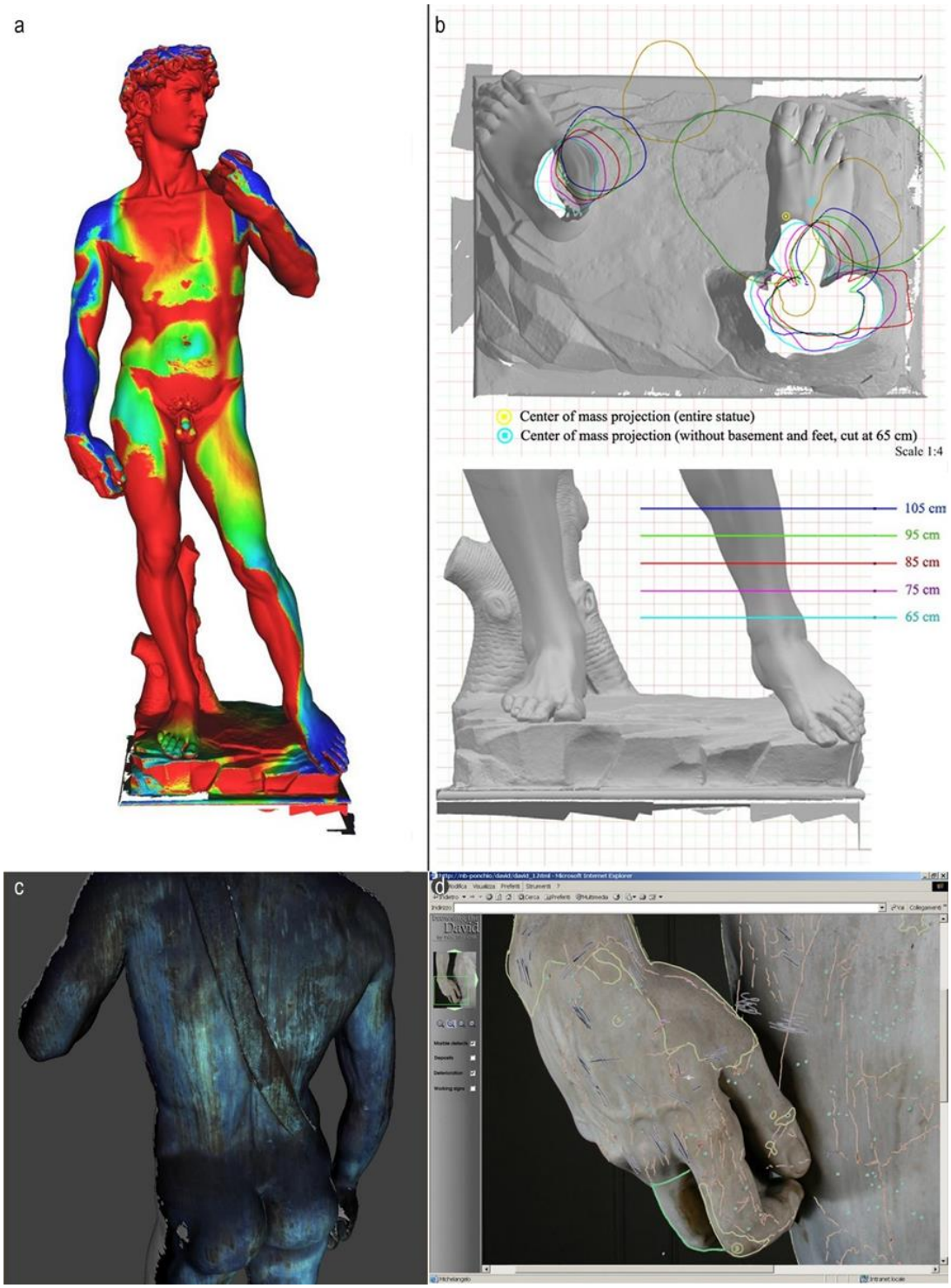


Figura 19. a) Exposición de la superficie al polvo u otras contaminaciones. b) Medidas físicas, centro de masas, peso, distancias lineales, etc. c) Mapeado de múltiples imágenes UV en el modelo 3D. d) Diversas patologías que presenta la escultura. © Marco Callieri, Paolo Cignoni, Fabio Ganovelli, Gaetano Impoco, Claudio Montani, Paolo Pingi, Federico Ponchio y Roberto Scopigno.

Los cimientos plantados en el proyecto *The Digital Michelangelo de Stanford*, han dado pie a herramientas como CHISel, un programa informático similar a un GIS (*Geographic Information System*, Sistema de Información Geográfica), especializado en documentar y analizar los procesos de restauración en esculturas. La información cuantitativa generada se recoge en diferentes capas, por lo que facilita en grado sumo los diversos análisis y su posterior gestión informática (figura 20) (Torres et al., 2013).

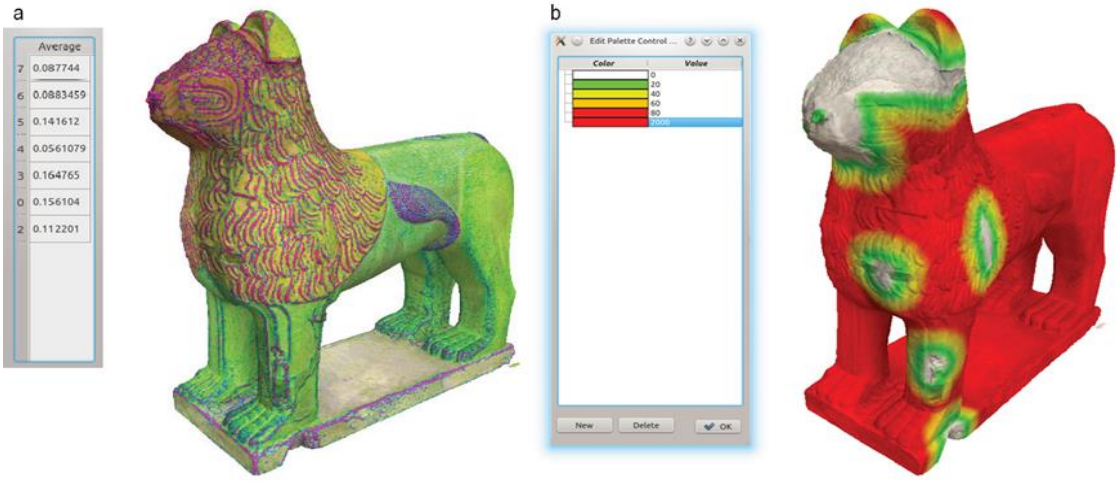


Figura 20. a) Cálculo de la rugosidad media de cada segmento. b) Análisis de los campos de distancia de las zonas dañadas. © Juan C. Torres, L. López, Celia Romo, Germán Arroyo, Pedro Cano, F. Lamolda y Mª del Mar Jiménez.

Las aplicaciones que permiten analizar en mayor profundidad los daños en superficie se han desarrollado de modo más extenso en el campo de los bienes inmuebles, pero estos son perfectamente extrapolables al campo escultórico. Como ejemplos destacados cabe citar las aplicaciones basadas en filtros espaciales y morfológicos sobre los modelos tridimensionales, ya sean las nubes de puntos o mallas poligonales, que permiten obtener información cuantitativa de diversas alteraciones como grietas, fracturas o pérdidas de material (Galantucci & Fatiguso, 2019). Otros sistemas más avanzados basados en tomografía ultrasónica 3D y escáneres de radar, han demostrado su capacidad para detectar y localizar fracturas (Pietra et al., 2017; Colombero et al., 2022).

Un equipo de investigación interdisciplinar llevó a cabo una metodología exhaustiva para adquirir datos cuantitativos y cualitativos sobre la geometría, los materiales y la degradación del templo de Apolo Pitio, en la Acrópolis de Rodas, Isla de Rodas (Grecia), para interrelacionar los datos por medio de tecnologías de la información espacial y medioambiental. Todos los datos se procesaron mediante un sistema GIS con el fin de documentar los materiales constitutivos, pero además el objetivo fue analizar la extensión y patrones de las alteraciones. Este enfoque permitió al equipo evaluar intervenciones anteriores, identificar las causas del deterioro y determinar la mejor decisión sobre materiales y técnicas de restauración (Adamopoulos et al., 2017). Otros sistemas basados en GIS aplicados a los modelos tridimensionales permiten organizar las diversas capas de información, por medio de textura 2D coordenadas (López et al., 2020). Este sistema resulta más ágil cuando los profesionales necesitan intercambiar o compartir información durante sus trabajos. En este sentido, también hay que destacar el sistema BIM (*Building Information Modeling*, Modelado de Información para la Construcción), una valiosa herramienta de carácter interdisciplinar imprescindible para generar y vincular información mediante representaciones

gráficas y mediciones, supervisar bienes culturales e intercambiar o compartir datos durante la investigación. Hay una especial aplicación en los bienes inmuebles, donde ofrece agilidad y eficiencia en el análisis y seguimiento de los bienes culturales (Historic England, 2017b; Banfi, 2017; Historic England, 2019).

La aplicación de diversas técnicas de análisis y complementación de los modelos tridimensionales con datos cuantitativos y cualitativos están en constante evolución. Un interesantísimo programa informático Agata, desarrollado por diversos expertos del sector, permite efectuar numerosos análisis sobre el modelo 3D en tiempo real. Entre las operaciones más útiles para los investigadores destaca la gestión de datos por capas de diversas anotaciones, incluso informaciones bidireccionales entre la superficie y los datos (figura 21 a y b). Asimismo, la posibilidad de realizar cálculos complejos, mediciones lineales y geodésicas de zonas, así como estimar la cantidad de polvo atmosférico existente sobre una determinada área (figura 21 c). Entre otras funciones permite realizar renderizados con distintos algoritmos de visualización que destacan diversas características de la zona geométrica, así como almacenar la información en una base (Soler et al., 2017). También se han desarrollado IS (*Information Systems*, Sistemas de Información) basados en web para apoyar los estudios y tratamientos de conservación-restauración por medio de modelos 3D y datos mapeados sobre los mismos (Apollonio et al., 2018).

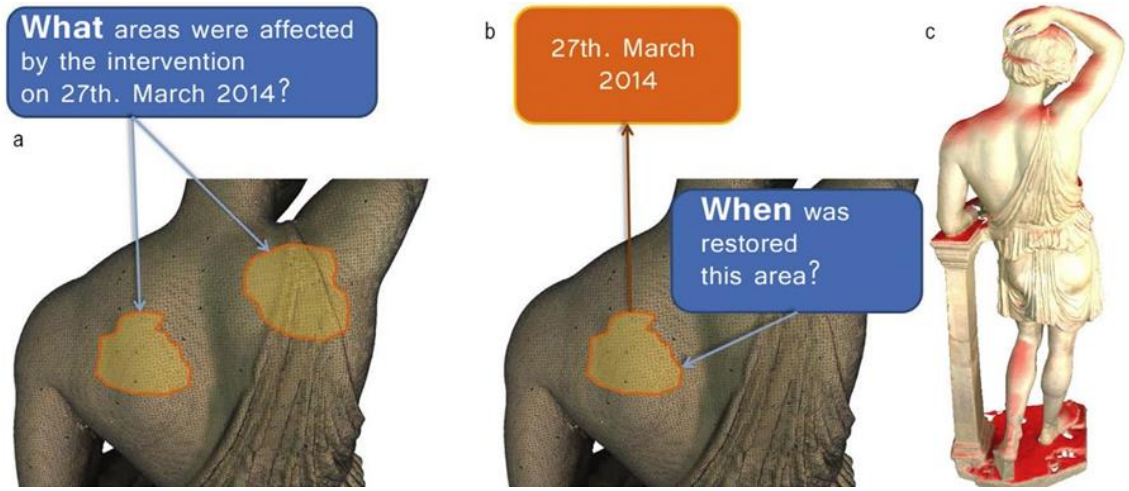


Figura 21. a y b) Relación bidireccional entre la superficie y los datos de zonas intervenidas. c) Detección de partículas de suciedad atmosféricas sobre la escultura. © Francisco Soler, Francisco Javier Melero y María Victoria Luzón.

A menudo, los bienes culturales han sido sometidos a intervenciones estructurales históricas para abordar diversos problemas y mitigar el deterioro de objetos dañados, pero una parte significativa de estos tratamientos requiere de una reevaluación para garantizar la estabilidad estructural de la obra de arte. En este sentido, algunos especialistas han aprovechado el potencial de los modelos 3D obtenidos por escáneres CRLS, con el fin de analizar cambios dimensionales (figura 22). Para ello, han realizado un seguimiento escaneando la pieza en diferentes épocas del año, lo que les ha permitido llevar a cabo comparaciones y detectar cambios derivados de las intervenciones históricas (Hess et al., 2015). Este seguimiento resulta de gran interés puesto que la información que revelan estos modelos puede evitar posibles alteraciones, algunas irreversibles en determinados casos.

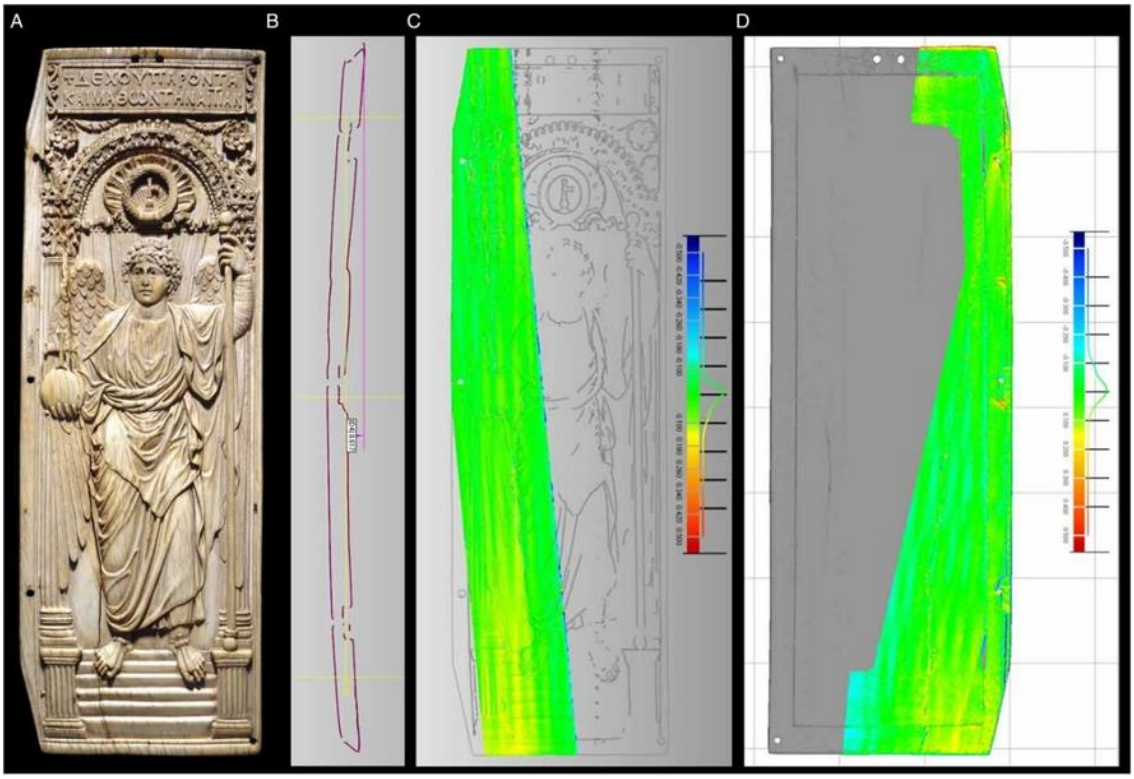


Figura 22. a) Panel de marfil que representa al Arcángel Miguel, British Museum. b) Sección transversal donde se aprecia el alabeo del panel de marfil. c y d) Análisis comparativo de los modelos escaneados en diferentes épocas. © Mona Hess, Capucine Korenberg, Clare Ward, Stuart Robson y Chris Entwistle.

La elevada calidad y precisión de un modelo 3D permite analizar la geometría, los materiales constitutivos y el estado de conservación, entre otros muchos aspectos. Algunos autores han recurrido a los modelos de altísima calidad en la malla para realizar estudios acerca de las técnicas constructivas. Un ejemplo de ello es el caso comparativo entre dos esculturas idénticas de bronce que representa a Hércules ebrio, una encontrada cerca del pórtico occidental del Foro de Veleia (Italia), y otra conservada en el Museo Cívico Medieval de Bolonia, con el fin de determinar si una de ellas era una réplica de la otra (figura 23 a) (Dall'Asta et al., 2016). Un ejemplo similar es el caso de la Fuente de Neptuno, de la ciudad de Bolonia. La escultura del dios del mar, ubicada en el Museo Cívico Medieval, es el arquetipo del modelo colocado en la fuente, por lo que se propuso evaluar de modo cuantitativo, así como describir los cambios y diferencias dimensionales durante el análisis virtual (figura 23 b y c) (Girelli et al., 2020). Otros trabajos también se han centrado en el seguimiento del estado de conservación y, para ello, se llevan a cabo comparaciones de digitalizaciones de la obra de manera periódica (Payne, 2019).

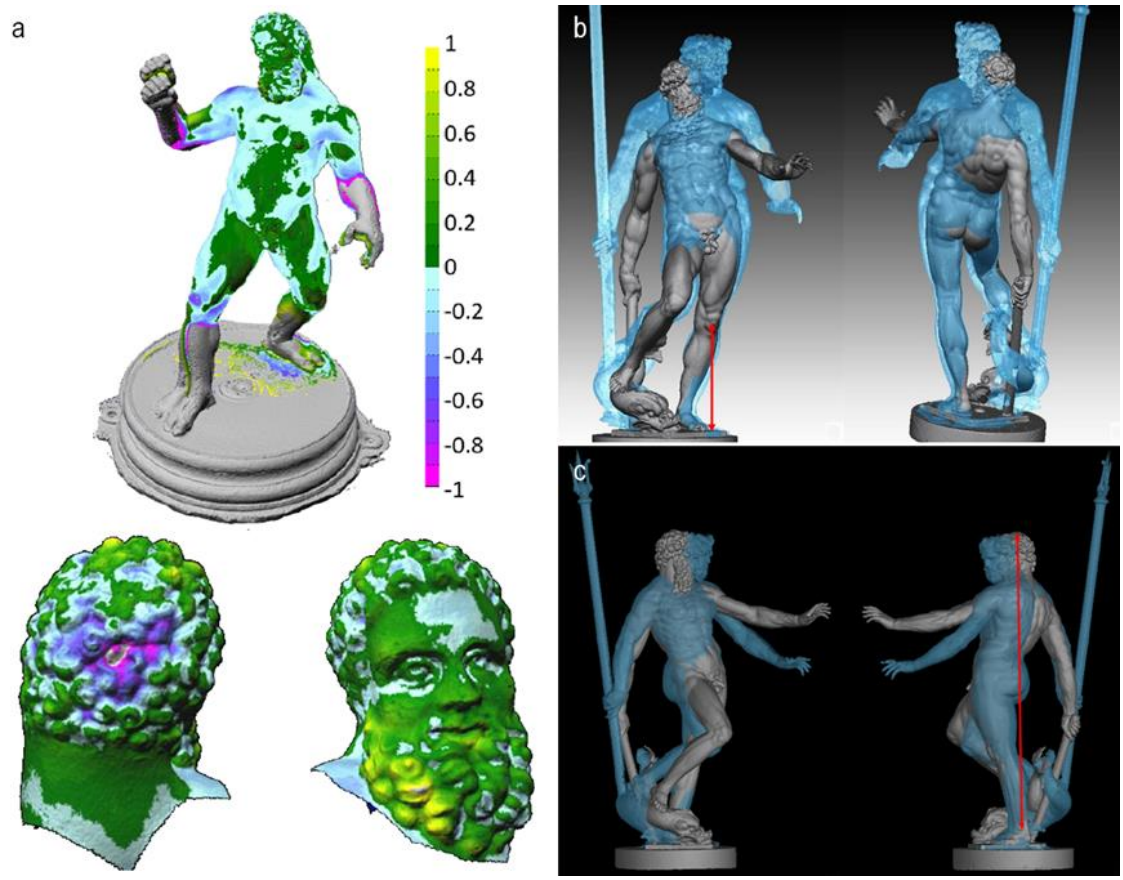


Figura 23. Análisis comparativo entre esculturas. a) Superposición de las dos esculturas idénticas de Ercole Ebbro. © E. Dall'Asta, Nazarena Bruno, G. Bigliardi, A. Zerbi y Riccardo Roncella. b) Neptuno escalado utilizando la longitud de la pierna del arquetipo. c) Neptuno escalado utilizando la altura del arquetipo. © Valentina Girelli, Maria Tini, M. D'Apuzzo y Gabriele Bitelli.

2.1.5. Restauraciones y reconstrucciones virtuales

Los modelos digitalizados se utilizan con frecuencia para resolver estudios hipotéticos, ya sean restauraciones o reconstrucciones virtuales mediante la infografía 3D. Las aplicaciones complementarias que ofrecen son múltiples (Bennardi & Furferi, 2007; Colombo & Perzolla, 2016; Biagi Maino & Maino, 2017), por ello, deben ser empleados con prudencia por parte del conservador-restaurador. Dichas aplicaciones sobre el patrimonio no están legisladas o normalizadas por la UNESCO (*United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization*; Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura) o el ICOMOS (*International Council on Monuments and Sites*, Consejo Internacional de Monumentos y Sitios), existiendo en consecuencia un enorme vacío que regule la calidad y rigurosidad de las operaciones; es preciso recordar que con estos medios digitales es realmente fácil crear resultados arbitrarios. Es, por tanto, imprescindible realizar una reflexión deontológica y técnica de los límites de la intervención. Pese a que numerosos profesionales del sector del patrimonio cultural han tratado de recomendar diversas pautas para la correcta aplicación (Estevan et al., 2010; Pietroni & Ferdani, 2021), son varios los trabajos referentes cuya metodología y principios garantizan el máximo rigor y respeto por el original.

Las aplicaciones de la restauración virtual enfocadas a la conservación del patrimonio se presentan como herramientas auxiliares para llevar a cabo estudios de intervención sin alterar el

objeto real, y deben ajustarse a la ética de la conservación-restauración (Esclapés Jover et al., 2017). Entre las aplicaciones más destacadas se encuentran aquellas relacionadas con los procesos de anastilosis, la limpieza y las reconstrucciones volumétricas y cromáticas.

2.1.5.1. Limpieza y reconstrucción del color virtual

El inevitable paso del tiempo suele dejar sus huellas sobre las obras. Sin embargo, las técnicas de restauración virtual permiten recuperar de modo hipotético el aspecto que pudo tener en origen un objeto u obra de arte. Uno de los casos más interesantes quizás sea la aplicación de estas técnicas sobre la obra Ángel de Lichfield, una escultura medieval descubierta en excavaciones recientemente en la propia catedral de Lichfield (Reino Unido). Con el objetivo de retirar diversos restos de tierra y de suciedad superficial, así como de igualar todos los fragmentos con el mismo grado de limpieza, sin tocar la obra, realizaron diferentes procesos de limpieza virtual sobre el modelo 3D por medio de herramientas de clonación tomadas como referencias de áreas cercanas a la zona clonada. A continuación, y mediante el análisis de los pigmentos pudieron estimar el color faltante y reconstruir cromáticamente el conjunto escultórico (figura 24) (Geary & Howe, 2009). Con la misma metodología se llevó a cabo el estudio de la policromía faltante en una tumba de la época lucana, tras realizar la restauración consistente en retirar las partículas de suciedad superficial de la misma (Ferrucci et al., 2020).



Figura 24. a) Modelo original escaneado. b) Modelo 3D una vez realizada la limpieza virtual de las partículas de suciedad. c) Modelo 3D tras realizar la reconstrucción virtual de la policromía. © Dean and Chapter of Lichfield Cathedral. © Angela Geary y Emily Howe.

Las posibilidades de combinaciones de los modelos digitalizados y su análisis como herramienta de apoyo para la restauración física se pueden realizar desde diversas perspectivas. Una aplicación un tanto diferente se ha llevado a cabo sobre las pinturas rupestres de Roca dels Moros y Els Gascons, arrancadas de su emplazamiento original y trasladadas al museo de Arqueología de Cataluña. Bea y Angás (2017), digitalizaron tanto los fragmentos del museo como los abrigos para volver a ubicar de manera virtual las pinturas en su sitio de origen, incluso reconstruyendo por completo la policromía de forma virtual. Con ello, pudieron analizar el aspecto que podrían haber tenido las pinturas en el momento de su creación.

2.1.5.2. Anastilosis

Uno de los procesos más abordados dentro de la restauración virtual es la anastilosis. A menudo, puede ser una labor problemática, sobre todo cuando el conjunto volumétrico es complejo y los fragmentos presentan una gran dificultad para ser unidos entre sí. Diferentes expertos han desarrollado sistemas de restricción en diferentes fragmentos, según su composición y experiencia del conservador-restaurador. Este proceso implica establecer un vínculo entre las respectivas regiones de unión de dos fragmentos mediante la indicación de diferentes puntos de referencia en la superficie de cada fragmento, en lugar de utilizar solamente un punto. Con ello se pretende evitar los ensamblajes automáticos no asistidos que muchas veces conducen a inexactitudes (Scopigno et al., 2011; Palmas et al., 2013). Uno de los resultados acerca de esta metodología rigurosa y eficaz se puede apreciar con mayor detalle en la escultura de terracota, Pietranico Madonna, dañada gravemente durante el terremoto de 2009 que ocurrió en los Abruzos (Italia) (figura 25) (Arbace et al., 2013). Otro ejemplo similar y de enorme importancia en la aplicación de esta técnica, se halla en el trabajo llevado a cabo por el *Metropolitan Museum of Art* durante los estudios previos a la intervención de la escultura de mármol Adán, de Tullio Lombardo (1460-1532) (Riccardelli et al., 2014).



Figura 25. a) Estado inicial de la Madonna tras el terremoto. b) Proceso de anastilosis virtual. c) Anastilosis virtual finalizada. © Lucia Arbace, Elisabetta Sonnino, Marco Callieri, Matteo Dellepiane, Matteo Fabbri, Antonio Iaccarino Idelson y Roberto Scopigno.

Con el objetivo de lograr las uniones con la máxima precisión, diversos investigadores han desarrollado procesos basados en diferentes puntos GAN (*General Adaptive Neighborhood*, Entorno General Adaptativo) en torno a un contorno límite cuya descripción se logra por medio del OLAP (*Oriented Local Alphabetic Pattern*, Patrón Alfabético con Orientación Local). Estos se emparejan a través de diversas estrategias calculando la posición inicial en función de los GANs e ICP (Los GAN en torno a un contorno límite) (Zhang et al., 2018). Son sistemas complejos, pero cuyos resultados han demostrado tener una enorme eficacia y precisión.

2.1.5.3. Reconstrucción virtual

En el ámbito de las reconstrucciones virtuales existen varios ejemplos que demuestran el potencial de los modelos digitalizados combinados por medio de la infografía 3D para tratar diversas hipótesis (Pietroni & Ferdani, 2021). Un caso interesante son los estudios de las figuras del frontón del templo de Zeus en Olimpia (Grecia). Anteriormente, se suponía que había cuatro disposiciones de las esculturas; sin embargo, gracias a la precisión de los escaneados y los diversos estudios, se han podido descartar dos de ellas debido a su composición y formato, ya que

el espacio es muy limitado en el frontón (figura 26) (Patay-Horváth, 2012, 2014). Otro caso similar gira en torno al templo de Borobudur (Indonesia), donde los relieves se ocultaron tras varios muros durante la colonización holandesa. Los autores del trabajo utilizaron fotografías monoculares y sus correspondientes mapas de profundidad, así como el modelo fotogramétrico para reconstruir las figuras con un 95% de presión (Pan et al., 2020).

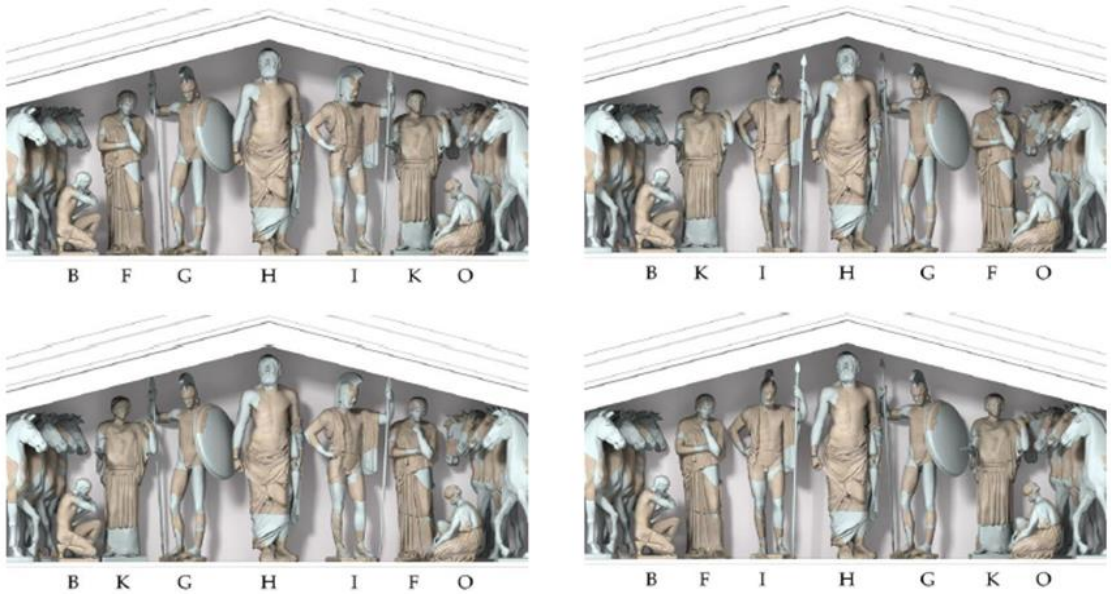


Figura 26. Reconstrucción de la disposición de las figuras centrales. Los fragmentos reconstruidos están representados con un color azul claro. © Andrés Patay-Horváth.

Los procesos de reconstrucción por medio de técnicas de escultura digital contribuyen a analizar diferentes etapas de un tratamiento con el fin de valorar dicha intervención y asegurar el máximo respeto por la obra (figura 27) (Tucci et al., 2017). Las reconstrucciones aportan una valiosísima información, pero cuando son muy intervencionistas han de quedarse solamente en la hipótesis virtual.



Figura 27. Reconstrucción virtual de elementos perdidos. a) Estado inicial. b) Hipótesis reconstruida. c) Ubicación de la reconstrucción sobre el estado inicial. © Grazia Tucci, Valentina Bonora, Alessandro Conti y Lidia Fiorini.

Por lo general, las reconstrucciones virtuales requieren de una detallada documentación de partida 2D, ya sean textos, grabados, bocetos o pinturas. Se puede citar en este sentido el proyecto de investigación que se centró en recuperar artefactos patrimoniales perdidos, en concreto, el monumento ecuestre del duque Francesco III d'Este (1698-1780), construido, en 1774, en Módena (Italia) y destruido 20 años más tarde. Mediante diversas pinturas, grabados, un fragmento del

momento y el modelo de estuco preparatorio que aún conservan, se desarrolló un flujo de trabajo en el que se combinó la digitalización del estuco y se reconstruyeron los elementos faltantes por medio de la documentación 2D, hasta texturizar el mármol e incluso ubicar el monumento en su sitio de origen mediante RA (Gherardini & Sirocchi, 2022). Como estos ejemplos, son varias las aplicaciones de reconstrucción virtual que se han llevado a cabo sobre los bienes muebles e inmuebles, como se ha podido apreciar en esta breve revisión, incluso en reconstrucciones faciales partiendo de un modelo escaneado con MSCT (*Multislice Computed Tomography*, Tomografía Computarizada Multicorte) (J. Marić et al., 2020).

En muchas ocasiones, las reconstrucciones virtuales pueden ser muy controvertidas y esto se debe, en gran medida, por un lado, a la falta de un lenguaje común para llevar a cabo los procesos de reconstrucción virtual y, por otro, a la carencia de fuentes utilizadas referenciadas junto con el proyecto 3D. Esta limitación deja patente el pequeño porcentaje de estudios acerca del tema. Algunos expertos pioneros en la reconstrucción virtual arqueológica han centrado sus líneas de investigación en crear un marco común que conecte la documentación arqueológica y la reconstrucción virtual en el mismo modelo (Demetrescu, 2015). La herramienta desarrollada EM (*Extended Matrix*, Matriz Ampliada), es capaz de efectuar un seguimiento y mostrar los pasos necesarios en el proceso de modelado basado en diversas fuentes (figura 28) (Demetrescu et al., 2016). Los cimientos de este proyecto están dando pasos gigantescos en la documentación científica, poniéndolo a prueba en herramientas 3D de código abierto. Gracias a las mejoras constantes de los programas informáticos, estos procesos son cada vez más fáciles de aplicar. En uno de los últimos trabajos sobre este tema, los autores muestran una mejora de la difusión de los datos de EM, por medio de complementos como EMtools para Blender y una nueva versión de EMviq, empleados con el fin de mejorar el proceso de modelado digital basados en fuentes, así como su virtualización inmersiva (Demetrescu et al., 2023). Este innovador método constituye una poderosa herramienta para la reconstrucción del patrimonio cultural y puede revelar nuevos conocimientos sobre el pasado.

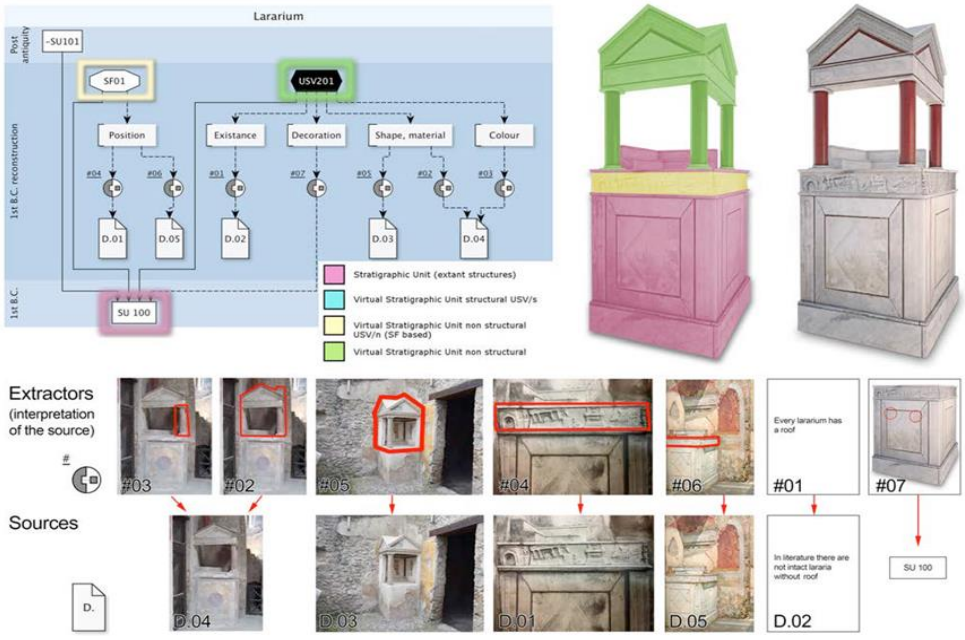


Figura 28. Proceso de reconstrucción mediante el enfoque de la EM. © Emanuel Demetrescu, Daniele Ferdani, Nicolò Dell'Unto, Anne-Marie Leander Touati y Stefan Lindgren.

2.1.6. Divulgación 3D mediante dispositivos de pantalla, RV, RA, RM e impresión 3D

La gran cantidad de información obtenida a partir de la digitalización 3D y la virtualización de bienes culturales es ahora fácilmente accesible a través de múltiples medios, como cualquier dispositivo de pantalla, RV, RA o RM (Realidad Mixta) (Bekele & Champion, 2019; Malik et al., 2021). Con ello, diversos museos, colecciones y trabajos de investigación han encontrado un medio novedoso de difusión (Nancarrow, 2016).

2.1.6.1. Dispositivos de pantalla

La visualización de contenidos en dispositivos de pantalla se ha convertido en una solución popular para la interacción con el público y la promoción de proyectos de conservación (figura 29) (Walthew et al., 2020), aunque estos sistemas han encontrado un amplio campo de aplicación en los espacios museísticos con el fin de enriquecer la información de los bienes que en ellos se albergan (Andujar et al., 2012).



Figura 29. a) Interacción con visor RTI. b) Interacción con un visor 3D. © Jessica Walthew, Sarah Barack, Adam Quinn y Nolan Hill.

El proceso de creación de un modelo digital entraña diversos niveles de complejidad, sobre todo en lo que respecta a la elaboración de representaciones realistas de elementos volumétricos. En este sentido, Wijnhoven y Moskvin (2020), han recurrido a métodos basados en parametrización, diseño asistido por ordenador y simulación de cuerpo rígido. Con estos métodos se han creado modelos digitales de gran realismo, como demuestra el caso de una cota de malla de Vimose, datada en 150-220 d.C.

2.1.6.2. Realidad Virtual

La RV es un método muy utilizado en el campo del patrimonio cultural, ya que ofrece una forma mejorada de explorar objetos gracias a sus capacidades de visión estereoscópica, sonido y seguimiento del usuario. Además, permite manipular y editar en tiempo real objetos y entornos expositivos, lo que proporciona una experiencia más envolvente (figura 30) (Drossis et al., 2018). Cada vez son más numerosas las aplicaciones e investigaciones para adaptar este medio inmersivo a los requerimientos del patrimonio (Duguleană et al., 2019). Su desarrollo se ha ido ampliando para diseñar recorridos museísticos (Gonizzi Barsanti et al., 2015; Geurds et al., 2018; Pietroni, 2019; Loaiza Carvajal et al., 2020).

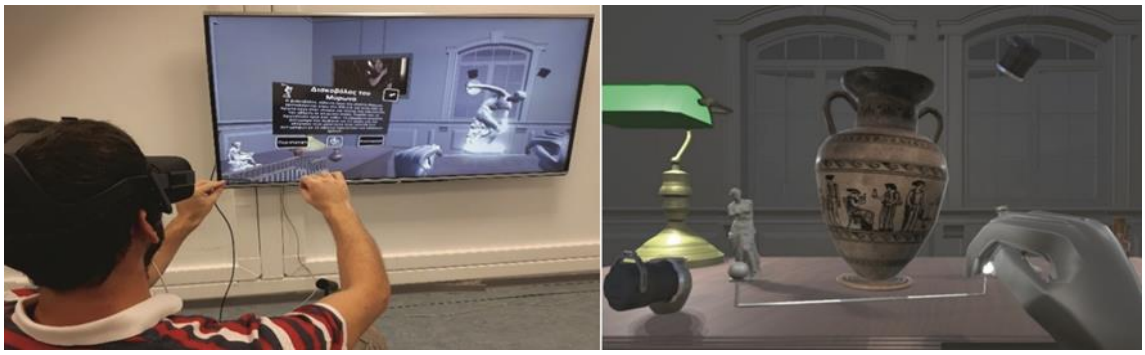


Figura 30. Visualización inmersiva, manipulación y complementación del modelo con información. © Giannis Drossis, Chryssi Birliraki y Constantine Stephanidis.

A la hora de visualizar cualquier resultado, en función del dispositivo utilizado, siempre habrá discrepancias en mayor o menor medida en cuanto a la reproducción fiel de color. Para resolver este problema, algunos expertos han realizado algunas aproximaciones a la gestión del color por medio de perfiles ICC en ciertos dispositivos RV, dada la escasa investigación e importancia cuando se trabaja con el patrimonio cultural (Díaz-Barrancas et al., 2018).

Los avances en los videojuegos son el principal motor para generar una mejora constante en estas herramientas de visualización. Uno de los trabajos más destacados lo representa la reconstrucción y recreación del Foro de Augusto, Roma (Italia), elaboradas con bases sólidas bien documentadas y reproducidas (figura 31) (Ferdani et al., 2020). La experiencia interactiva e inmersiva eleva un escalón más la difusión de nuestro legado e historia.

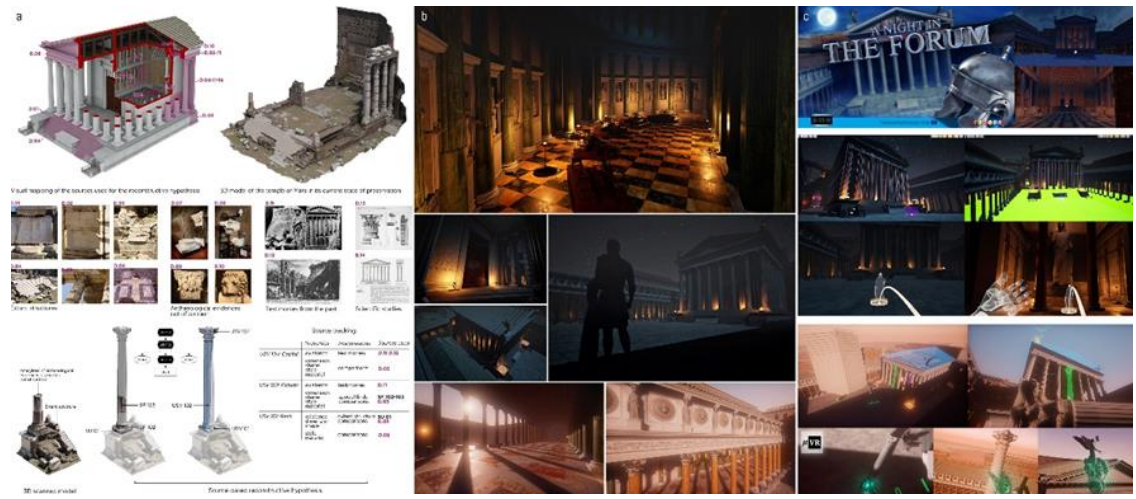


Figura 31. a) Proceso de reconstrucción con datos científicos y precisos. b) Renderizado en tiempo real del Foro de Augusto. c) Interacciona con el Foro de Augusto por medio de un videojuego. © Daniele Ferdani, Bruno Fanini, Maria Claudia Piccioli, Fabiana Carboni y Paolo Vigliarolo.

2.1.6.3. Realidad Aumentada

Por otro lado, en el caso de los sistemas de RA, a diferencia de la RV, permite ubicar un determinado modelo virtual en el entorno real. Esta aplicación sobre el patrimonio cobra especial interés para complementar y visualizar reconstrucciones virtuales, o para establecer un planteamiento de hipótesis, etc. Las posibilidades son enormes, por lo que muchos profesionales optan por la creación de aplicaciones interactivas enfocadas a complementar la información de un museo o de un determinado bien cultural (figura 32) (Duguleana & Voinea, 2018; Blanco-

Pons et al., 2019; Boutsi et al., 2021; Banfi et al., 2023). Para los museos, aunque aún presenta muchas limitaciones, la RA resulta ser una herramienta de enorme potencial para atraer al público y contribuir a su educación (Fanini et al., 2023).

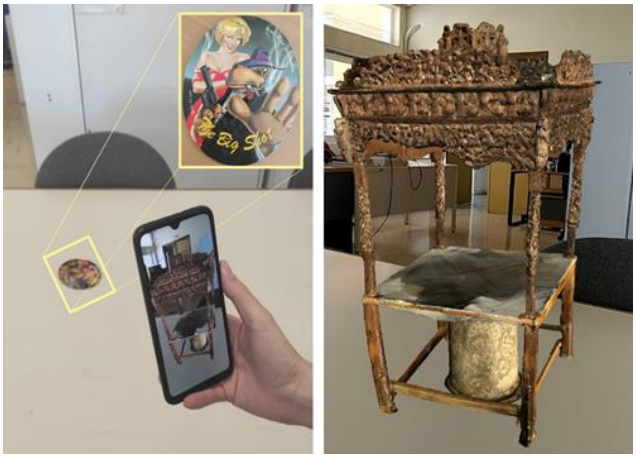


Figura 32. Ampliación de la RA para la visualización de un objeto. © Argyro Boutsi, Styliani Verykokou, Sofia Soile y Charalabos Ioannidis.

2.1.6.4. Realidad Mixta

Respecto a la RM, su funcionamiento se basa en fusionar los entornos virtuales con los reales, una combinación entre la RV y RA, pero proporcionando mayor grado de realismo interactivo del modelo virtual con el entorno real. Teniendo en cuenta el poco tiempo de desarrollo y explotación de esta técnica, en algunos trabajos han tratado de encontrar las mejores aplicaciones para el patrimonio cultural con la combinación de diversos programas informáticos y servicios de acceso abierto (Rahaman et al., 2019). Otro ejemplo del uso de esta tecnología se ha llevado a cabo con el fin de mejorar el aprendizaje cultural (Bekele et al., 2021).

En general, las reconstrucciones virtuales son contempladas a través de una pantalla, RV o RA, si bien existen otras opciones interesantes de plasmar estos resultados en tiempo real directamente sobre el bien cultural mediante proyectores (Peral et al., 2005).

2.1.6.5. Plataformas web

Los sistemas de visualización mencionados anteriormente tienen un ámbito de aplicación limitado debido a su reciente aparición y exploración. Además, no son una solución viable para el público general, ya que la mayoría de las personas carecen de los medios necesarios de acceso a los modelos 3D y visualizarlos. En este sentido, las plataformas web en los últimos diez años han tenido un enorme papel para poder divulgar dichos contenidos, puesto que su función de renderizado permite visualizar cualquier modelo tridimensional alojado en ellas, pero también hay que tener en cuenta las limitaciones que presentan. Algunas se encuentran en el tiempo de renderizado, por lo que diversos investigadores han desarrollado algoritmos basados en WebGL (*Web Graphics Library*, Biblioteca de Gráficos Web) que combinan la carga progresiva de la resolución y la compresión de la malla (Ponchio & Dellepiane, 2015). Con ello, los contenidos de la web se visualizan de manera más rápida prácticamente en cualquier dispositivo. El avance en estos sistemas ha supuesto un antes y un después en el modo de consultar los datos, pues ha ido sustituyendo el antiguo método de visualización basado en la transferencia de archivos.

En el mercado actual existen diversas plataformas web, siendo las más utilizadas, Sketchfab, enfocada más al uso comercial y profesional (Felicísimo et al., 2018), Visual Media Service, utilizada más en el ámbito académico (Ponchio et al., 2016; *Visual Media Service*, s.f.), al igual que 3DHOP (*3DHOP - Gallery*, s.f.), destinada a apoyar la publicación en la web de resultados de alta resolución, así como diversas documentaciones de restauración (Potenziani et al., 2015; Scopigno et al., 2017) o Nexus (*Nexus: Adaptive 3D* , s.f.), entre otras. Recientemente, se han analizado algunos aspectos relacionados con estas plataformas, tales como el potencial que brindan, el progreso y las políticas de gestión y de alojamiento de modelos, así como las posibilidades de visualización, con el fin de examinar la calidad y rigor científico que hay detrás de los modelos alojados en ellas (Hernández-Muñoz, 2023). Estos dos últimos aspectos son muy relevantes, puesto que hay una enorme falta de debate y desarrollo metodológico de investigación y documentación, así como de control de calidad por parte de las diferentes plataformas web (Statham, 2019). Es necesario una inspección rigurosa cuando se difunden los trabajos de digitalización, ya que la calidad dependerá no solo de los medios utilizados para el registro, sino también de los procesos de optimización que requieran los modelos originales debido al elevado peso de los archivos (Donadio et al., 2018).

De entre todas las plataformas, Sketchfab es la que más ha ido destacando en los últimos años, debido principalmente al enorme volumen de materiales, donde numerosos museos, coleccionistas y especialistas autónomos, han difundido los bienes culturales y trabajos (figura 33). Algunas ventajas que presenta la plataforma mencionada es que permite contemplar modelos 3D por medio de tecnología WebGL, lo que facilita su utilización y acceso a todo el público desde cualquier dispositivo de pantalla, incluso su adaptación directa para verlos en redes sociales o páginas web. Además, permite configurar y visualizar los contenidos de manera inmersiva mediante cualquier dispositivo de RV (Lloyd, 2016; Ratigan, 2017), e incluso RA por medio de la aplicación disponible de la plataforma para el móvil. Asimismo, posibilita complementar los modelos 3D mediante notificaciones, que se enriquecen con textos, imágenes o vídeos, por lo que resulta ser una buena alternativa.

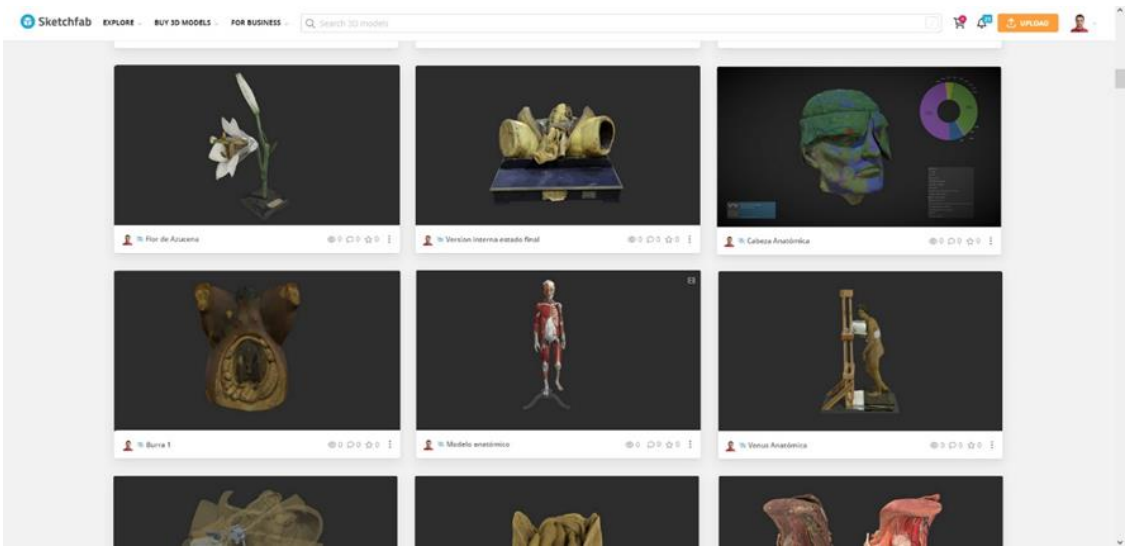


Figura 33. Modelos 3D disponibles en la plataforma web Sketchfab. © Emanuel Sterp Moga.

En cuanto a su utilización, presenta una interfaz muy sencilla y eficaz. Permite un control de la ubicación, escala, iluminación, insertar diversos entornos por medio de imágenes HDR (*High*

Dynamic Range, Alto Rango Dinámico), recurrir a texturas artificiales PBR (*Physically Based Rendering*, Renderizado Basado en la Física) en los que es posible configurar por separado los diferentes canales, tales como *diffuse, height, normal y smoothness*, entre otras muchas opciones enfocadas a proporcionar a los modelos 3D las características físicas de los materiales originales de manera muy realista.

En la actual era digital, el vertiginoso avance tecnológico hace que los procesos y metodologías de digitalización y almacenamiento de datos sean diversos en diferentes puntos del mundo. Esta situación genera una falta de conexión que se produce entre las instituciones culturales. En los últimos años, con el fin de establecer un espacio común de red en la misma línea entre las instituciones museísticas y profesionales del sector del patrimonio cultural que satisfaga los diversos requerimientos de cada aplicación, la Comisión Europea ha estado trabajando en la elaboración de un informe sobre una nube colaborativa. En ella, se recoge una gran demanda y necesidad por parte del sector cultural de generar una base general por medio del espacio *Cloud* que permite almacenar todos los datos, metadatos y paradatos.

La información hoy en día que se genera de los archivos, catálogos, bibliografías, historial de conservación y procesos de restauración mediante documentación 2D y 3D, así como bibliotecas digitales, medios sonoros o videográficos, múltiples algoritmos y simulaciones virtuales, entre otras muchas, son cada vez más voluminosas y requieren de áreas adecuadas donde salvaguardar todo el material. El objetivo de este proyecto es ir más allá del almacenamiento y crear, una red que responda a las necesidades del complejo ecosistema del patrimonio cultural, con un espacio en el que se pueda compartir, comparar, identificar, gestionar y analizar los diferentes estudios y materiales, y que garantice en todo momento la conservación de los datos. Un espacio en el que se permita producir un entorno virtual de investigación, con soporte técnico de programa informático y diversas herramientas de análisis y creación de aplicaciones (realizar restauraciones virtuales, detectar copias, modificaciones, falsificaciones, cambios en los archivos), entre otras muchas opciones, con el fin de avanzar en el conocimiento y conservación de nuestro legado patrimonial (Brunet et al., 2022).

2.1.6.6. Impresión 3D

La evolución de la tecnología de impresión tridimensional ha experimentado un crecimiento significativo desde la década de 1980. Fruto del desarrollo y de los avances en la ingeniería, el campo del patrimonio cultural también se ha visto influido por diversos tipos de aplicaciones. Hoy en día existen multitud de impresoras 3D basadas en tecnologías de construcción aditivas y sustractivas. Entre las impresiones aditivas destacan las tecnologías empleadas mediante la extrusión del material como FDM, la estereolitografía SLA (*Stereo Litography Apparatus*, Aparato de Litografía Estereoscópic), la µSLA (Microstereolitografía), la sinterización láser SLS (*Selective Laser Sintering*, Sinterizado Selectivo por Láser), el MJ (*Material Injection*, Inyección de Material), la DED (*Directed Energy Deposition*, Deposición de Energía Directa), y la LOM (*Laminated Object Manufacturing*, Fabricación Laminada), entre otros tipos derivados de los mismos y, estos a su vez, con sus muchas variaciones que hay en cada una de las categorías mencionadas. Por otro lado, las impresoras sustractivas están basados en un proceso de mecanizado CNC. Según el objetivo y la necesidad, se optará por un sistema u otro. En general, dentro del sector del patrimonio cultural la técnica de impresión más utilizada es FDM, seguida

de SLS y CNC. Cada una de ellas presenta diversas ventajas y desventajas, según las herramientas y materiales empleados, pero todas muestran ciertas limitaciones en cuanto a las calidades y dimensiones a obtener. Los modelos fotogramétricos se utilizan habitualmente para la adquisición de datos y la creación de modelos virtuales destinados a la impresión 3D por motivos económicos (Inzerillo & Di Paola, 2017). Sin embargo, el proceso de fabricación puede verse mejorado por medio de diversos escáneres (Balletti & Ballarin, 2019). Estudios comparativos entre diferentes dispositivos de registro de escáneres láser y la posterior impresión de los resultados por medio de técnicas FDM y SLS, se han analizado para valorar los detalles superficiales (figura 34) (Adami et al., 2015). Las mejoras constantes hacen imprescindible revisar y comparar estos sistemas para detallar diversas aplicaciones y calidades según los objetivos del proyecto (Balletti et al., 2017).



Figura 34. a) Diversos escaneados y resultado del modelo final tras ensamblar cada uno de los escaneados. b) Impresión 3D mediante SLS (amarillo) y FDM (rojo). © Andrea Adami, Caterina Balletti, Francesco Fassi, Luigi Fregonese, Francesco Guerra, Laura Taffurelli y Paolo Vernier.

Numerosos trabajos han analizado las aplicaciones y finalidades de la impresión 3D en el patrimonio cultural. Entre las más utilizadas están aquellas que se centran en poner de relieve el papel de la conservación, la valorización, la comunicación, la interacción y el disfrute. En la actualidad, la aplicación más frecuente ha consistido en obtener réplicas tangibles por medio de FDM o SLS para las figuras de pequeño o mediano tamaño (Tucci & Bonora, 2007; Adami et al., 2015) y CNC para grandes formatos (figura 35) (Di Paola & Inzerillo, 2018; Merchán et al., 2019). Estas réplicas se usan con el fin de analizar y diagnosticar una obra o para enriquecer la experiencia museística (Wilson et al., 2018). Asimismo, otros estudios se han centrado en la obtención por impresión aditiva de soportes específicos que se adaptan a la superficie del objeto con el fin de poder exhibirlos adecuadamente en el museo (Barbieri et al., 2022).

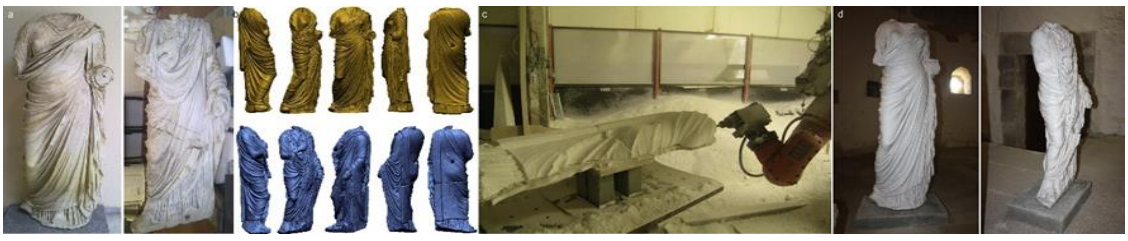


Figura 35. a) Las dos estatuas romanas que se reproducirán. b) Digitalización de las estatuas. c) Proceso de obtención de réplicas por medio de CNC. d) Resultado final de las réplicas. © María José Merchán, Pilar Merchán, Santiago Salamanca, Emiliano Pérez Hernández y Trinidad Nogales.

2.2. Técnicas digitales 3D aplicadas a los procesos de conservación–restauración

2.2.1. Reintegración cromática virtual

En muchas ocasiones resulta pertinente recurrir a los modelos 3D para analizar diversas técnicas de reintegración cromática discernibles según el caso de estudio. Las herramientas virtuales permiten reducir la necesidad de una manipulación excesiva de la obra durante este proceso.

Los primeros estudios en relación con la reintegración cromática virtual se realizaron sobre imágenes bidimensionales. En ellas se demostró la utilidad de esta metodología cuando el restaurador se enfrenta a problemas complejos como son la reconstrucción de partes faltantes, ya que los estudios virtuales permiten realizar numerosas pruebas para identificar la técnica y los colores más adecuados de cada laguna (figura 36) (González López & Martínez Calvo, 2009; Sterle & Ramovš, 2020). Otros expertos han profundizado en la reintegración cromática por medio de la creación de una paleta de colores virtuales desarrollada a través de una metodología rigurosas consistente en medidas de color (sistema CIE LAB) con la ayuda de un espectrofotómetro, cartas de color y apoyadas por análisis de laboratorio de cada uno de los pigmentos. Este método ha permitido obtener unos colores muy afines a los pigmentos reales sin generar aberraciones (Coba Peña et al., 2017).



Figura 36. Proceso de reintegración cromática virtual. a) Tinta plana. b) Rigatino. c) Puntillismo. © Mª José González López y Vanessa Martínez Calvo.

Aparte de los estudios en imágenes bidimensionales, investigaciones más recientes muestran las posibles ventajas de emplear modelos en 3D para estos fines. Diversos profesionales han ensayado esta aplicación sobre la malla de los modelos 3D o directamente sobre la textura del modelo 3D (Henriques et al., 2016; Soto-Martin et al., 2020).

2.2.2. Análisis y seguimiento del proceso de limpieza

En ocasiones, optar por el empleo de los modelos digitales 3D puede ser de gran ayuda cuando se requiere una minuciosa documentación. Algunos especialistas han utilizado modelos 3D para complementar no solo el estado de conservación, sino todo el proceso de restauración (Pelosi et al., 2016). Cuando se precisa de un mayor control, por ejemplo, en el tratamiento de limpieza, también estos sistemas pueden ser muy útiles. Así lo han aplicado algunos autores durante la restauración en curso de la Fuente de Neptuno en Bolonia, como una herramienta objetiva para documentar todas las fases del proceso de limpieza mediante una retroalimentación en tiempo real. Con la precisión y el detalle del modelo 3D se han podido identificar zonas ya limpiadas y restos que aún no se han retirado (Apollonio et al., 2017). En otras aplicaciones la digitalización 3D realizada, antes y después de la limpieza, ha facilitado la identificación de áreas en las que el proceso de remoción ha sido más o menos eficaz. Con ello, se han podido detectar zonas que aún conservan suciedad superficial y se ha conseguido retirar este particulado atmosférico de manera muy controlada, actuando solamente sobre dichas áreas (figura 37) (López-Martínez et al., 2018).

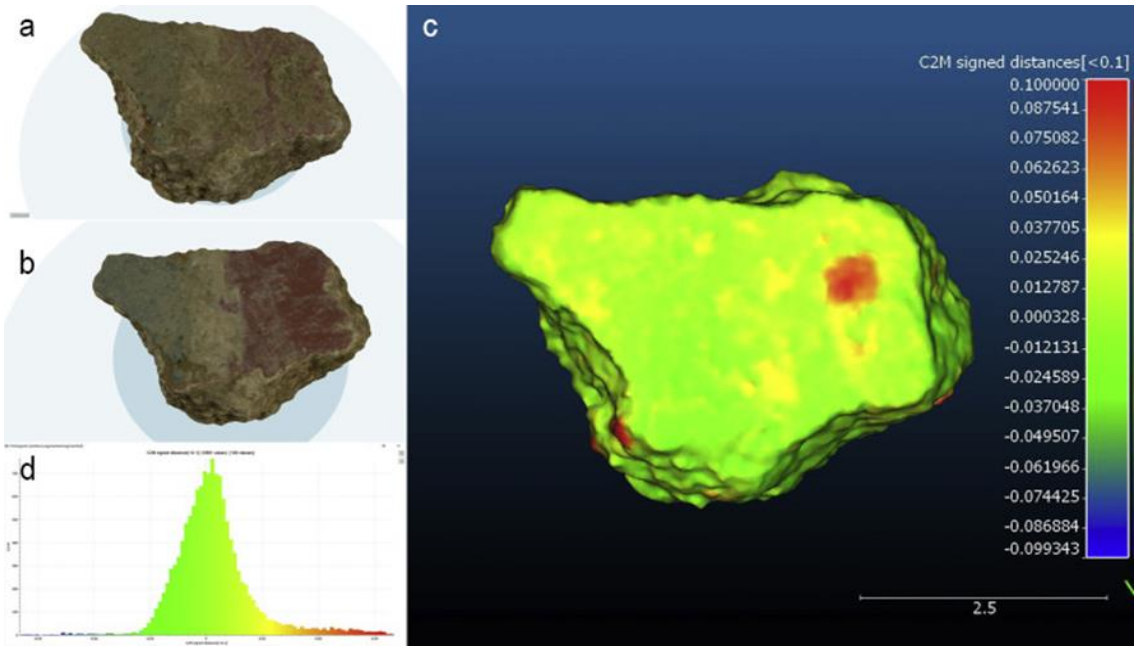


Figura 37. a) Estado inicial del fragmento. b) Estado después de la limpieza. c) Mapa de distribución de las distancias. d) Histograma de la distribución de la distancia. © Teresa López-Martínez, Ana García-Bueno y Víctor J. Medina-Flórez.

2.2.3. Diseño e implantación de prótesis para la adhesión de fragmentos

Los procesos de anastilosis son cruciales para determinar, con sumo detalle, la ubicación y posición de los fragmentos previamente a su adhesión en la intervención real, como se ha comentado en puntos anteriores. Además, en ocasiones, estos procesos virtuales pueden contribuir

a analizar sistemas de unión y estructuras necesarias para asegurar la estabilidad estructural de la escultura (figura 38) (Arbace et al., 2013).

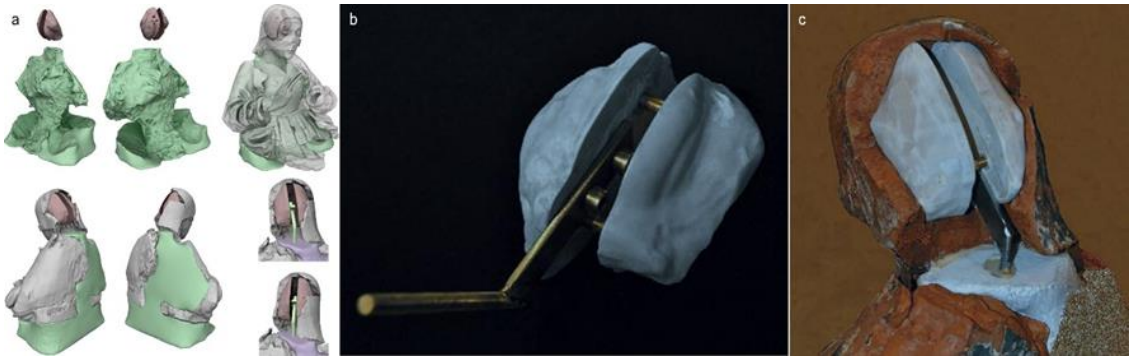


Figura 38. a) Diseño de los elementos de soporte. b) Obtención del soporte con sistema mecánico para soportar la cabeza. c) Aplicación en la obra real. © Lucia Arbace, Elisabetta Sonnino, Marco Callieri, Matteo Dellepiane, Matteo Fabbri, Antonio Iaccarino Idelson y Roberto Scopigno.

En los casos en que la unión de fragmentos requiere de la máxima precisión, también es esencial recurrir a los modelos virtuales 3D. Un ejemplo de este tipo se encuentra en el trabajo desarrollado por un grupo de expertos italianos que optaron por esta herramienta de apoyo durante la intervención de restauración en la escultura Mitra Tauróctona de la ciudad de Tarquinia (Italia). En este caso, la colocación exacta de los pernos en la región fracturada se analizó con precisión milimétrica mediante el uso de modelos virtuales en 3D y se realizaron análisis de elementos finitos con el fin de determinar las tensiones mecánicas. Con el objetivo de efectuar las perforaciones en el punto exacto, diseñaron una prótesis a modo de pasador para la broca, totalmente ajustada al volumen de la superficie y a la posición a perforar mediante la impresión 3D (figura 39) (Festa et al., 2015).

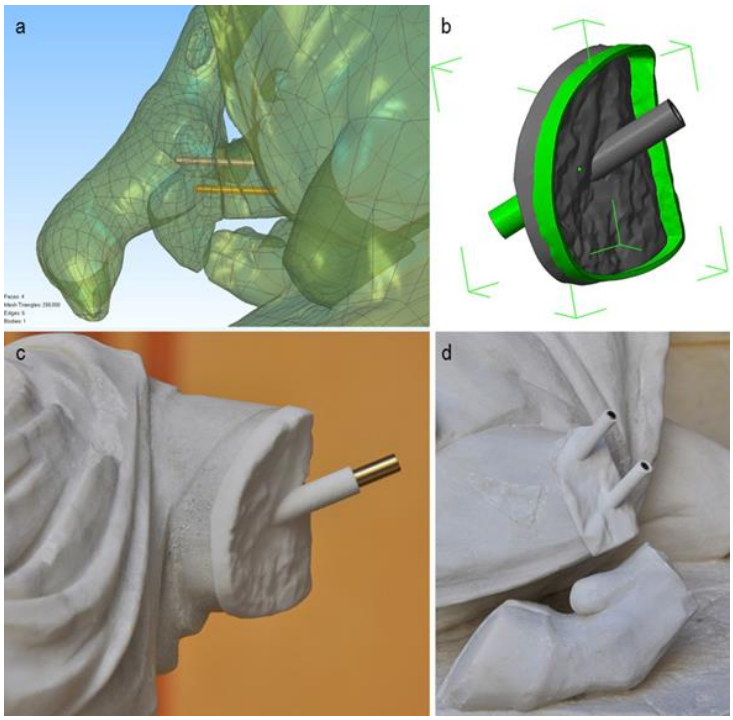


Figura 39. a) Análisis virtual de la posición de los pernos. b) Diseño de las prótesis con la guía de taladros. c y d) Impresión 3D y aplicación de la prótesis de guía para efectuar los taladros. © Luciana Festa, Antonio Iaccarino Idelson, Carlo Serino y Flavia Vischetti.

2.2.4. Réplicas obtenidas por medios de impresión 3D para ensayar intervenciones

Los estudios virtuales de anastilosis son muy importantes cuando el objetivo es dotar de estabilidad estructural a un objeto real en riesgo de pérdida. Aunque estos estudios suelen ser complementarios, han demostrado su capacidad para analizar las posiciones de los fragmentos y el material faltante en tres dimensiones. Sin embargo, el desarrollo de metodologías puestas a punto para ensayar dichas operaciones mediante facsímiles previamente a la intervención en la obra real proporciona una mayor formación y comprensión de la dificultad y medios necesarios para el tratamiento.

En este sentido, una de las aplicaciones pioneras, cuyos resultados han puesto de manifiesto su eficacia y necesidad cuando las adhesiones de fragmentos son realmente complejas, se ha llevado a cabo en la escultura de mármol de Adán, de Tullio Lombardo, restaurada durante los años 2002-2010 por el *Metropolitan Museum of Art*. Digitalizados cada uno de los fragmentos fracturados de la escultura y efectuados los numerosos estudios estratégicos de intervención, se fabricó por medio de CNC un facsímil de la escultura para poder llevar a cabo los análisis pertinentes con los mecanismos de sujeción diseñados. Esta metodología posibilitó ensayar las adhesiones con el máximo rigor previo al abordaje de la obra real (figura 40) (Riccardelli et al., 2014).

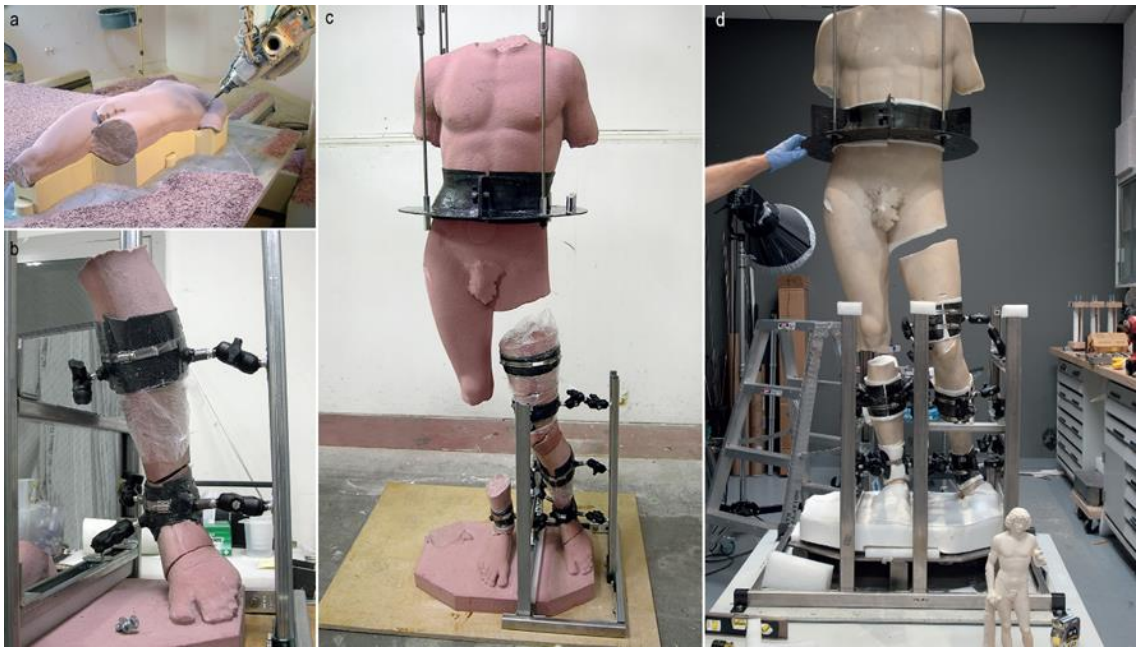


Figura 40. a) Creación del facsímil de la escultura de Adán por medios sustractivos. b y c) Ensayos de las operaciones de adhesión por medio de diversas estructuras sobre el facsímil. d) Realización de las adhesiones en la obra real tras los estudios llevados a cabo tanto de manera virtual como a través del facsímil. © Carolyn Riccardelli, Michael Morris, George Wheeler, Jack Soultanian, Lawrence Becker y Ronald Street.

2.2.5. Reintegraciones volumétricas impresas en 3D

Cada vez es más frecuente recurrir a la digitalización e impresión 3D de fragmentos, ya que resultan ser herramientas muy eficaces en casos complejos. Quizás una de las aplicaciones más representativas para la reconstrucción de partes faltantes y su ubicación en la obra real fue el caso de los bustos funerarios del siglo II d. C., que resultaron dañados a consecuencia de la invasión del ISIS en 2015. Expertos del Instituto Superior de Conservación y Restauración Italiano,

modelaron virtualmente las partes faltantes aprovechando los elementos conservados de la obra con el fin de adaptarlos perfectamente a la forma de las áreas perdidas. Su posterior impresión 3D, ofreció no solo un encaje perfecto, sino también efectuar una aplicación rápida y eficaz, con resultados de una altísima calidad, reversibilidad y discernibilidad (Squires, 2017).

Un estudio actual muestra un exhaustivo análisis de anastilosis y posterior modelado de las partes estructurales faltantes en la estatua Bodhisattva, una escultura de Buda en piedra. En concreto, en esta investigación se ha utilizado la pieza existente como muestra para crear un modelo simétrico de la parte faltante, que luego se ha fabricado mediante tecnología de impresión 3D y, después, se ha integrado en la obra real. Previamente a su ubicación en la obra real, se ensayó el encaje de las nuevas piezas por medio de una maqueta impresa en 3D de toda la obra. Esto permitió realizar los estudios de restauración con una enorme precisión y seguridad, y facilitó al mismo tiempo una evaluación clara y detallada de los resultados (figura 41) (Jo et al., 2020). Con ello, se ha podido consolidar la estructura y devolver a la pieza una lectura homogénea, sin llevar a cabo ningún contacto directo sobre la misma durante los estudios previos.

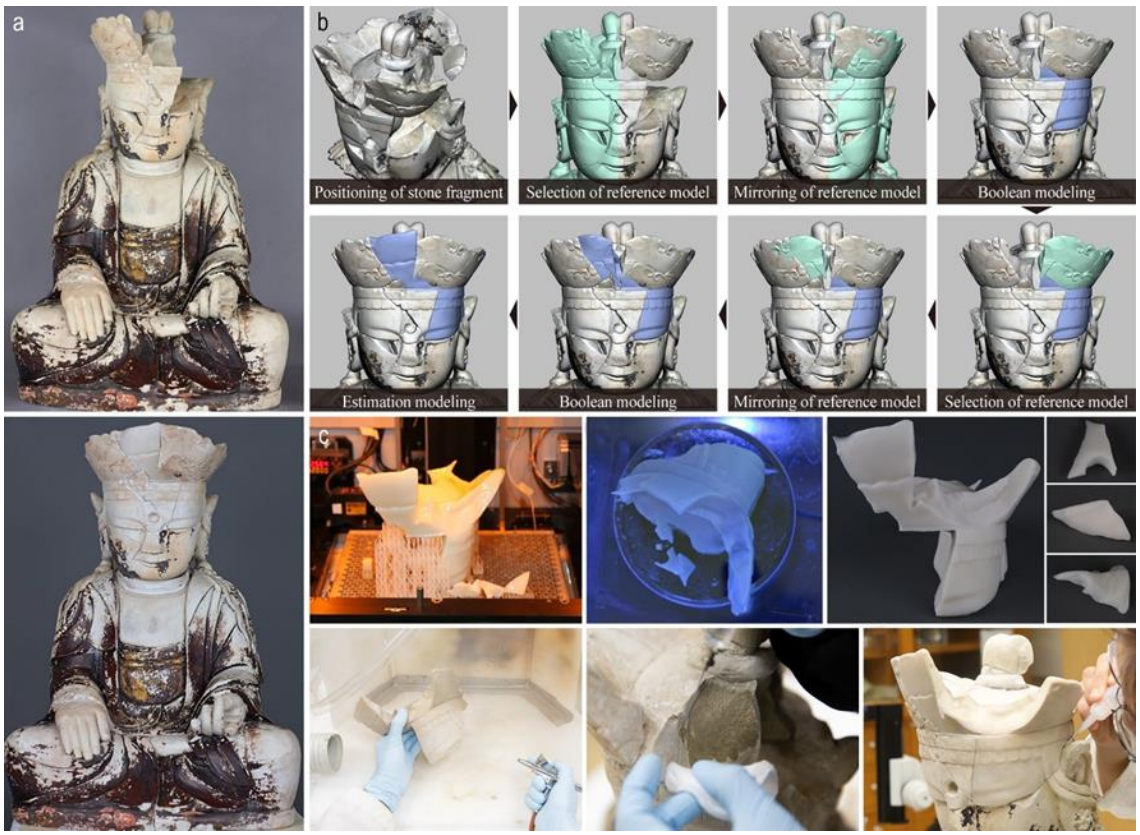


Figura 41. a) Antes y después de la reintegración volumétrica. b) Proceso de restauración virtual. c) Obtención de los fragmentos por medio de la impresión 3D y aplicación en la obra real. © Young Hoon Jo, Seonghyuk Hong, Seong Yeon Jo y Yoon Mi Kwon.

La aplicación de la impresión 3D, enfocada a la reintegración volumétrica de partes faltantes con diversos fines, se ha ido extendiendo cada vez más en los últimos años (Di Paola et al., 2017; De Luca et al., 2019; Jo & Hong, 2019).

Otra investigación de interés es la relativa a la reintegración volumétrica de cuencos de vidrio del siglo XVI-XVII, que se ha llevado a cabo mediante la impresión FDM con filamentos de ABS (*Acrylonitrile Butadiene Styrene*, Acrilonitrilo Butadieno Estireno). Este método de reintegración

volumétrica ha permitido reducir las manipulaciones excesivas de estos objetos tan frágiles durante su estudio y ha proporcionado una gran estabilidad estructural, así como una visión completa de cada uno de los cuencos de vidrio (Díaz-Marín & Aura-Castro, 2017). Otro estudio relacionado se ha centrado en el desarrollo de una prótesis reversible y transparente, en este caso para un cuenco Ding negro que forma parte del Museo Chifeng de la Universidad de Chifeng (China) (figura 42). Con el fin de asegurar la máxima compatibilidad de los materiales impresos en 3D con los originales del cuenco, los autores del trabajo realizaron pruebas preliminares de resistencia a las manchas, así como un análisis de la evolución del amarillamiento por medio de envejecimiento artificial UV (S. Liu et al., 2022). Aquí, la metodología desarrollada cumple con las premisas de la "mínima intervención, autenticidad y reversibilidad".

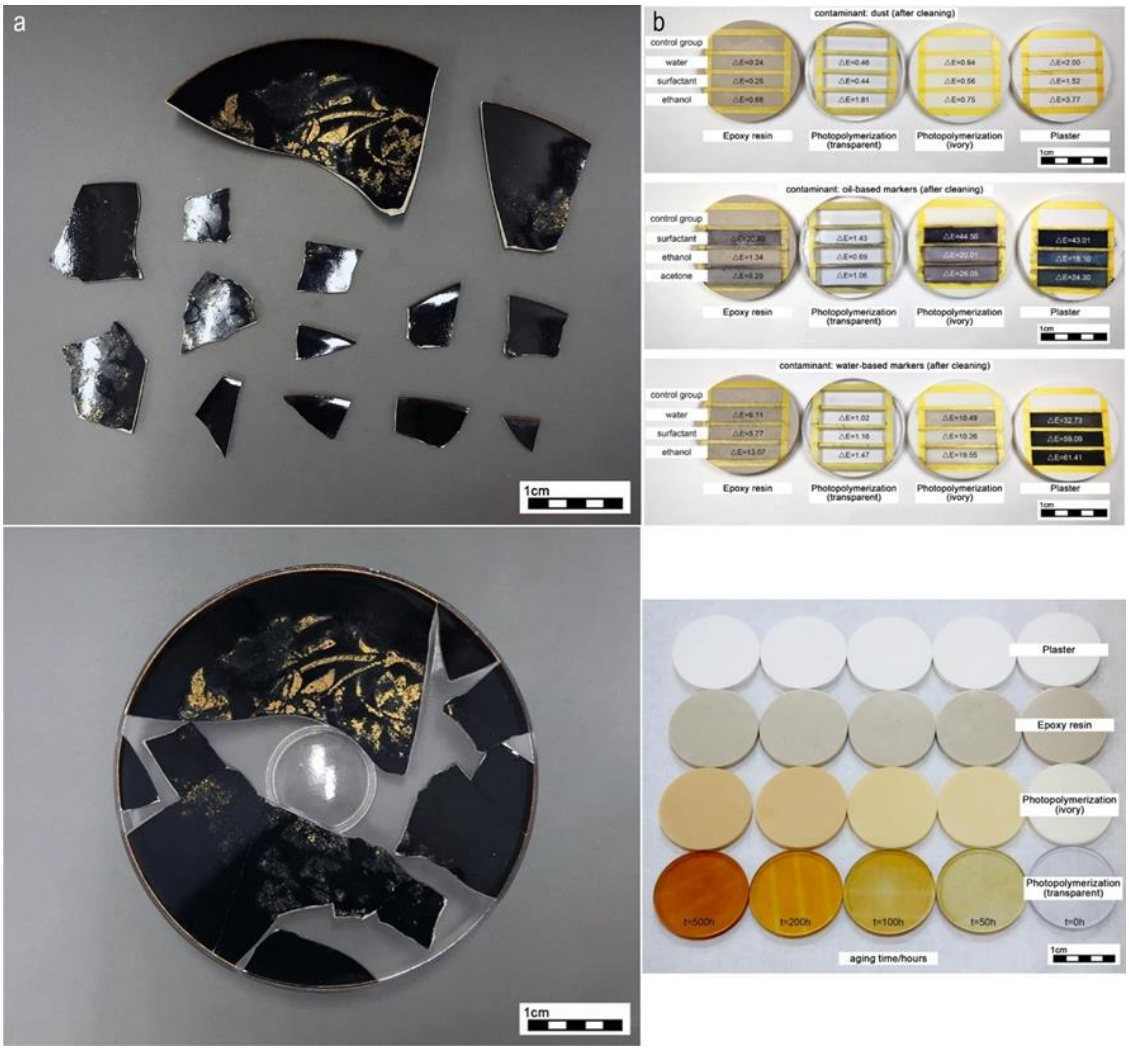


Figura 42. a) Antes y después de la intervención. b) Ensayos de manchas por medio de contaminantes y pruebas de resistencia al envejecimiento UV. © Shengyu Liu, Yuanwei Tu, Xin Wang, Bo Qin, Zhenda Xie, Yeliang Zhang, Hai Zhang y Dongbo Hu.

La impresión 3D de figuras para las reintegraciones volumétricas se ha convertido en un tema de investigación crucial debido a la incertidumbre que rodea al comportamiento de los diversos materiales utilizados para su creación. Sin embargo, cuando se requiere de otros materiales que no se pueden obtener por medio de la impresión 3D, diversos autores han recurrido a la creación de moldes. En algunas investigaciones, el trabajo se ha centrado en la obtención de diferentes moldes directamente impresos en 3D sobre los que colar el positivo. En este sentido, cada una de

las figuras precisan de estudios individuales y minuciosos de los diferentes cortes que será necesario crear en los moldes (figura 43) (Herholz et al., 2015). Otros profesionales se han decantado por la realización de moldes por medio de silicona sobre la pieza impresa en 3D (Alderighi et al., 2018). Ambas estrategias, enfocadas a lograr positivos, cumplen de modo riguroso con el criterio de la "mínima intervención", ya que en ningún momento se realiza un contacto directo con la obra.



Figura 43. a) División de fragmentos para la impresión de moldes. b) Obtención de los moldes impresos. c) Obtención del positivo. © Philipp Herholz, Wojciech Matusik y Marc Alexa.

Los sistemas digitales 3D, basados en la digitalización e impresión 3D, han demostrado ser herramientas eficaces no solo para realizar, analizar y probar prácticas innovadoras de restauración, y generar moldes, sino también para monitorizar los trabajos de intervención de forma preventiva. Un ejemplo significativo se encuentra en el Real Monasterio de la Santísima Trinidad de Valencia, donde algunos autores recurrieron al uso de una prótesis impresa en 3D, equipada de sensores encargados de registrar los datos medioambientales. Este método permite la monitorización continua de las condiciones ambientales y los posibles cambios en la estructura del monumento, lo que, a su vez, puede ayudar a la detección temprana de cualquier problema (Niquet et al., 2020).

2.2.6. Análisis de las características y materiales en los procesos de impresión 3D

Los estudios sobre las características y los comportamientos de diversos materiales han sido estudiados detalladamente por diferentes especialistas (Panetta et al., 2015). Algunos trabajos se han centrado en analizar la calidad de la impresión según la posición de la pieza requerida, la resolución aplicada, así como el tipo de material empleado (Alexander et al., 1998; Zhou et al., 2020). En otros trabajos han desarrollado algoritmos que permiten orientar la pieza en la mejor posición posible según su volumen (Zwier & Wits, 2016).

Por otro lado, durante la preparación y ejecución de la impresión 3D FDM, son varios los factores que influyen sobre las propiedades mecánicas del objeto. Diferentes equipos interdisciplinares han analizado la posición, los ángulos y la densidad de relleno con el fin de optimizar el proceso de impresión (Mohamed et al., 2015; Nidagundi et al., 2015; Hooshmand et al., 2021). Pese a que estos trabajos están enfocados a otras áreas de conocimiento, son cada vez más relevantes en aplicaciones sobre el patrimonio cultural cuando se precisa de soportes o estructuras que van a estar sometidos a esfuerzos mecánicos.

Diversos investigadores han caracterizado los materiales de impresión FDM por medio de ensayos de tracción (Zohdi & Yang, 2021) y flexión (Song et al., 2017) debido a las propiedades

anisotrópicas que tienen. Los materiales más utilizados en la impresión FDM son el PLA (*Polylactic Acid*, Ácido Poliláctico) y ABS. Algunos autores han centrado sus investigaciones sobre ellos en su comportamiento mecánico (Rouf et al., 2022). Otros, han analizado los patrones de impresión y los diversos porcentajes de rellenos, así como las diferentes posiciones en la orientación, que tienen una repercusión muy notable en las propiedades mecánicas del objeto impreso (Doungkom & Jiamjiroch, 2019).

En otros trabajos se han centrado en el material ABS, reforzado con diferentes aditivos, por ejemplo, TiO_2, elastómeros o yute, todos ellos con un 5% en peso (Torrado Perez et al., 2014), entre otros aditivos (Torrado et al., 2015). También se han efectuado estudios comparativos entre el PLA y la fibra de carbono, cuyos resultados han mostrado una mayor ductilidad en la fibra de carbono en comparación con el PLA (figura 44) (Soud et al., 2019), así como especificaciones de las propiedades del PLA (Andó et al., 2021).

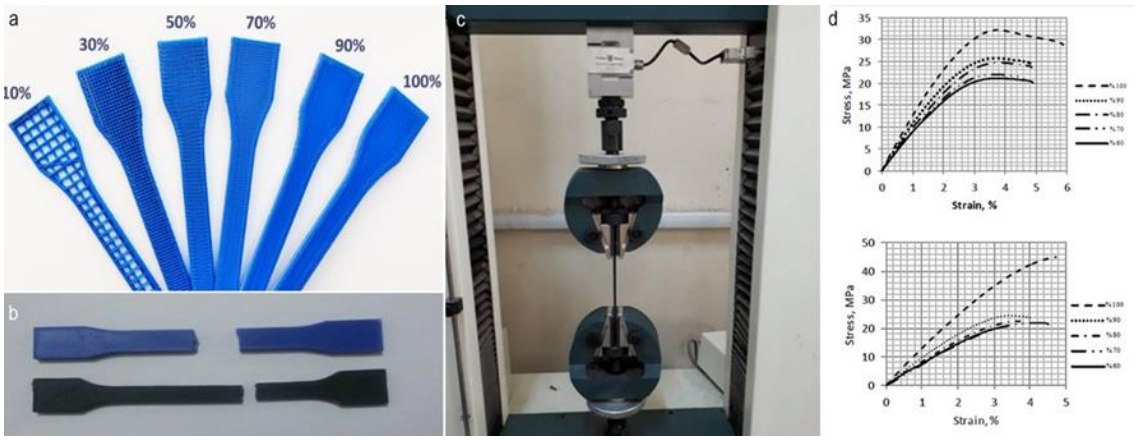


Figura 44. a) Estructura interna con diferentes densidades. b) Resultado de las probetas tras realizar el ensayo de tracción. c) Máquina de tracción *Tinius Olsen H50KT*. d) Gráfico tensión-deformación de las probetas de ácido poliláctico y fibra de carbono. © Wafa A. Soud, Ihsan A. Baqer y Mohammed R. Ahmed.

Investigaciones más complejas han combinado el material de impresión ABS con diversos patrones, dejando huecos en su interior para ser rellenados con diferentes resinas. Los resultados de estos estudios demuestran que este tipo de combinaciones mejoran la rigidez hasta un 45% (Belter & Dollar, 2015).

Son numerosas las investigaciones realizadas de momento en campos ajenos al patrimonio cultural; sin embargo, la mayor parte de los trabajos se han centrado en un reducido número de materiales, no habiendo estudios sobre un espectro más amplio.

2.3. Técnicas digitales 3D aplicadas a los procesos de conservación-restauración en modelos anatómicos científicos

Las colecciones de artefactos científicos que albergan los museos, bibliotecas, institutos y recintos universitarios de todo el mundo, custodian modelos de enorme valor material, educativo y cultural (Sanz & Bergan, 2002). Dentro de estas colecciones, existe una gran variedad de piezas en áreas como la Historia Natural, la Botánica, la Zoología, la Geología, la Antropología y la Arqueología, entre otras (Suarez & Tsutsui, 2004; Aragon et al., 2007; Were, 2010; Ruiz de Lacanal & Galán-Pérez, 2013; Casanova & Romeiras, 2020).

En los últimos años, los eruditos que estudian las colecciones anatómicas científicas como parte de la "cultura material" han destacado la importancia de las prácticas científicas del pasado, lo que ha provocado un aumento del interés por su conservación (Fiorini et al., 2008; Baldini, 2009; Nepi, 2009; Nesi et al., 2009; Riva et al., 2010; Dumont et al., 2011; Cocks, 2014; Gouriveau, 2018; Angelini & Gori, 2019; G. Mayoni, 2020; Narang et al., 2021).

En la práctica, la gran variedad y combinación de materiales en una misma pieza plantea un importante reto al conservador-restaurador cuando se enfrenta a determinados procesos de intervención. La extraordinaria complejidad técnica con la que los artífices elaboraron cada uno de los detalles anatómicos, los avatares que estos modelos artificiales han sufrido a lo largo del tiempo, junto con las numerosas manipulaciones, los traslados y la exposición en espacios que no cumplieron con los requisitos mínimos para su preservación, son algunos de los principales factores que han contribuido a su deterioro.

Debido al crítico estado de conservación, la fragilidad de los diferentes materiales, y la gran dificultad que supone intervenir estas piezas, son varios los trabajos que han tratado en los últimos años de desarrollar diferentes metodologías de conservación-restauración para salvaguardar estas colecciones (Gabbriellini et al., 2009; Sánchez Ortiz, 2015; Cárdenas Valenzuela, 2015; M. G. Mayoni, 2016). No obstante, los métodos tradicionales de estudio e intervención en algunos casos no parecen satisfacer las necesidades técnicas ni proporcionar suficiente información para completar tratamientos delicados. En este contexto, los avances tecnológicos en 3D han surgido como una posible solución.

La comunidad científica ha investigado el uso de diversos sistemas de digitalización 3D para la documentación y el estudio de objetos de colecciones científicas. En el campo de las ciencias naturales, los estudios y análisis relacionados con la digitalización han experimentado una importante expansión (Herbert et al., 2013; Ströbel et al., 2018; Ziegler et al., 2020; Tan et al., 2022), aunque, su aplicación es limitada debido a las dificultades que plantea el registro fiel (Nguyen et al., 2014; Medina et al., 2020). Otros estudios plantean el uso de sistemas de escaneado para documentar y analizar ciertos ejemplares, como la investigación llevada a cabo sobre los corales escleractinios, en la que se realizaron mediciones de su superficie y volumen (Reichert et al., 2016). Sin embargo, dada la diversidad de objetos de las colecciones científicas, es necesario desarrollar y perfeccionar las estrategias de digitalización adaptadas a cada tipología para lograr una documentación más realista y fiel. De hecho, así lo demuestran algunos autores en sus trabajos, donde han dedicado sus esfuerzos a identificar plantas y descubrir nuevas especies mediante técnicas avanzadas de digitalización (Wang et al., 2022).

Recientemente, la fotogrametría se ha aplicado en los procesos de diagnóstico en colecciones pomológicas, de modo particular en la colección "Garnier Valletti" del Departamento de Ciencias Agrícolas y Medioambientales de la Universidad de Estudios de Milán (Italia). Además del análisis tridimensional virtual, se han utilizado otras técnicas de imagen como el infrarrojo cercano, la fluorescencia visible inducida por radiación UV y los rayos X para proporcionar un análisis exhaustivo de los objetos que componen la citada colección (figura 45) (Grifoni et al., 2022).

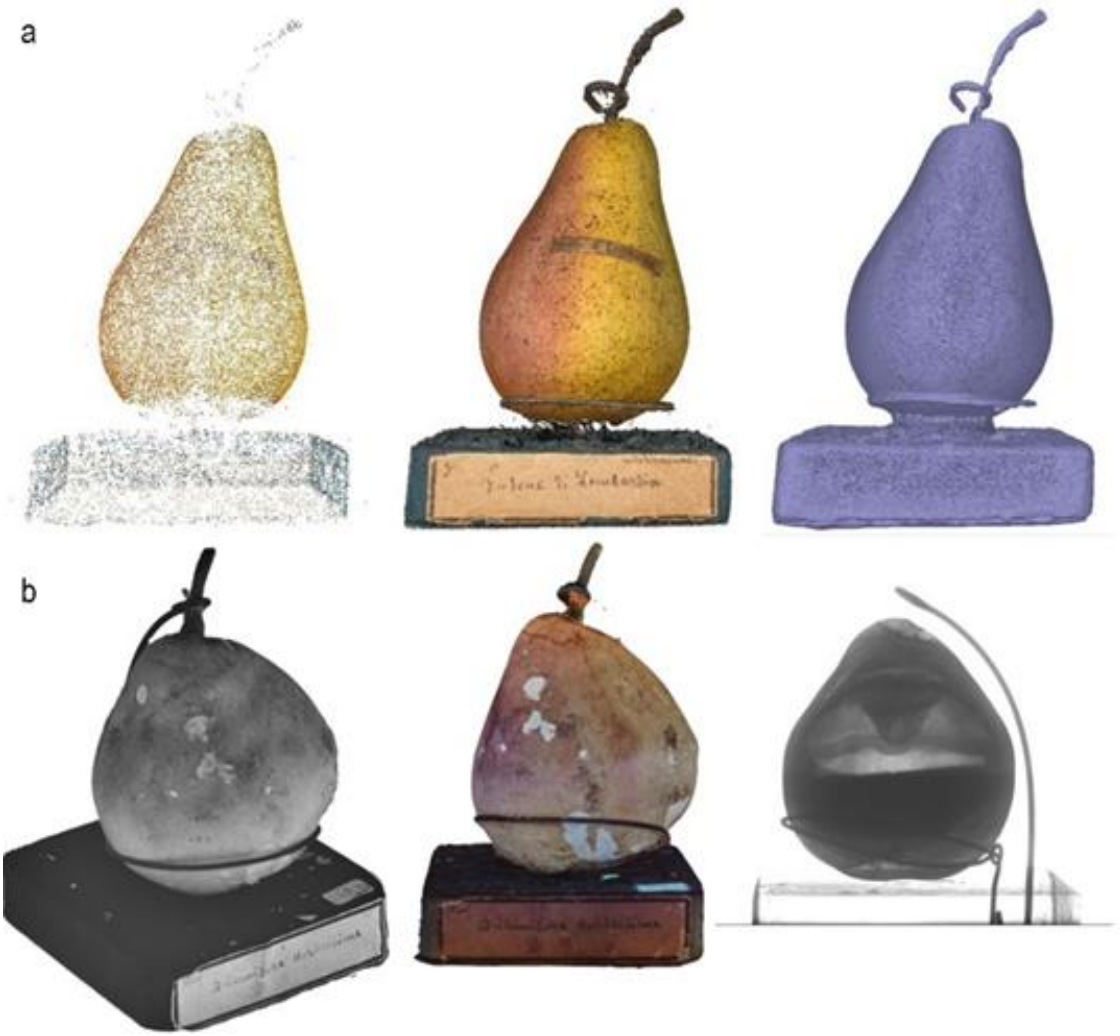


Figura 45. a) Proceso de obtención del modelo fotogramétrico. b) Diversos espectros, infrarrojo cercano, fluorescencia visible inducida por radiación UV y rayos X. © Emanuela Grifoni, Letizia Bonizzoni, Marco Gargano, Jacopo Melada, Nicola Ludwig, Silvia Bruni y Ilaria Mignani.

La utilización de técnicas digitales 3D aplicadas a las colecciones científicas que comprenden artefactos didácticos de anatomía humana, animal y botánica, seleccionados en esta investigación, ha sido poco investigada. Solo en los últimos cinco años se le ha prestado un mayor interés dada la necesidad de profundizar y analizar las intervenciones de restauración.

Quizás una de las primeras aplicaciones de la digitalización 3D que se ha llevado a cabo en el contexto de las colecciones de estudio es la obra *La Parturienta* (n.º Ref.: MAJP000138) elaborada por Juan Cháez (c. 1750-c. 1809) y Luigi Franceschi (s.f.), durante el siglo XVIII. La escultura de bulto redondo en cera está ubicada en el Museo de anatomía "Javier Puerta" de la Facultad de Medicina, Universidad Complutense de Madrid. Con motivo de la exposición "Arte y Carne: La anatomía a la luz de la ilustración", se llevó a cabo la restauración de esta magnífica pieza (Sánchez-Ortiz, 2016, pp.97-107). Entre los numerosos estudios y análisis de materiales e intervenciones, durante el año 2015 se procedió a efectuar la digitalización 3D mediante la fotogrametría gracias a la colaboración establecida con el IPCE (Instituto del Patrimonio Cultural de España) (figura 46); la aplicación de esta técnica posibilitó la adquisición de una información esencial para realizar un riguroso diagnóstico del estado de conservación y planificar así los tratamientos sobre la obra real.

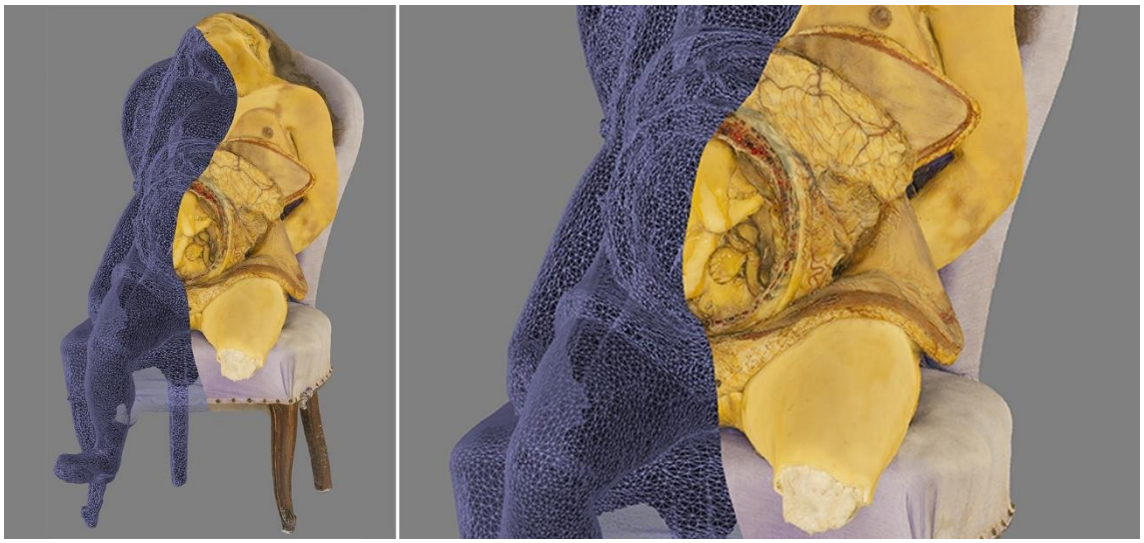


Figura 46. Digitalización 3D de *La Parturienta* (Ref.: MAJP000138) por medio de la fotogrametría. © IPCE.

La digitalización de este tipo de artefactos didácticos, así como el análisis de diversos procesos de intervención, suponen un gran reto debido principalmente a las características materiales que presentan las obras para registrar fielmente el volumen y la textura de color. Por ello, en los últimos años son numerosos los investigadores que están experimentando con las tecnologías 3D en estos singulares artefactos.

En este sentido, una de las primeras aplicaciones ha sido con fines divulgativos, un caso habitual en gran parte del sector del patrimonio cultural. Desde el año 2017, diversas instituciones y profesionales han difundido sus colecciones a través de la plataforma web Sketchfab (figura 47). Investigaciones específicas acerca del flujo de trabajo fotogramétrico con estos fines en el marco de las colecciones anatómicas científicas se han publicado recientemente (Hernández-Muñoz et al., 2023).

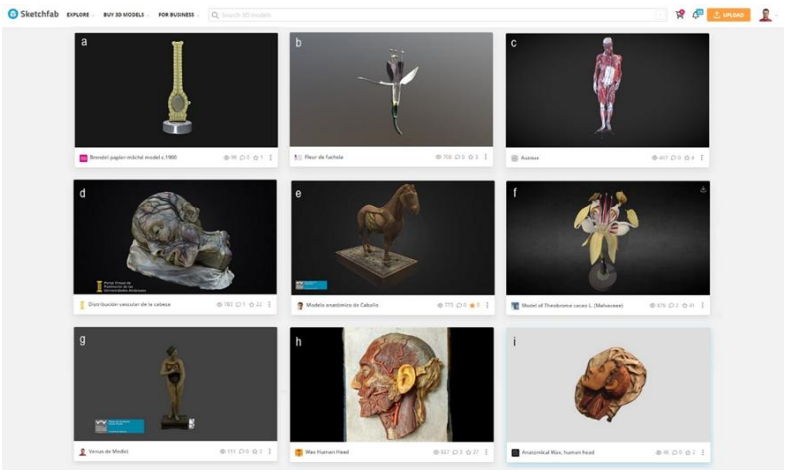


Figura 47. a) Museo Nacional de Liverpool (Ver modelo 3D). b) Instituto Nacional Superior de Enseñanza y Educación de la Academia de París (Ver modelo 3D). c) Museo de Anatomía de la Universidad de Chile (Ver modelo 3D). d) Atalaya 3D: Universidades de Andalucía, un proyecto creado entre diez universidades andaluzas para la conservación y difusión de su patrimonio cultural (Ver modelo 3D). e) Museo Veterinario Complutense de la Facultad de Veterinaria de la Universidad Complutense de Madrid (Ver Modelo 3D). f) Herbario de la Universidad de Melbourne (Ver modelo 3D). g) Museo de anatomía Javier Puerta de la Facultad de Medicina de la Universidad Complutense de Madrid (Ver modelo 3D). h) Museo Ashmolean (Ver Modelo 3D). i) El sistema de museos de la Universidad de Florencia (Ver modelo 3D). © Emanuel Sterp Moga.

Otros autores han utilizado el escaneado con luz estructurada para documentar y divulgar las colecciones anatómicas científicas, al tiempo que han analizado diversas hipótesis sobre las técnicas constructivas de estos artefactos (Niquet et al., 2018; Niquet & Barberá, 2018). Sin embargo, las aplicaciones de este método se han visto limitadas en términos de calidad y rigor científico. La difusión por medio de los escáneres no ofrece el mejor resultado en la textura de color, aunque sí en el volumen para poder imprimirlos en 3D.

El crítico estado de conservación en que se encuentran muchos artefactos científicos, unido a la delicada naturaleza de los materiales, hace necesaria la utilización de tecnologías de vanguardia para mejorar los procesos de restauración. La necesidad de emplear las nuevas técnicas 3D va más allá de la documentación, diagnóstico y difusión, ya que se precisa de análisis minuciosos y de disponer de medios reales que mejoren los tratamientos complejos de conservación-restauración.

La aplicación con éxito de la tecnología de digitalización e impresión 3D para enriquecer los procedimientos de restauración ha quedado demostrada en los resultados derivados del proyecto Santander-UCM Ref.: PR26/16-20322, con título *Aplicación de las nuevas tecnologías de modelado e impresión 3D a la restauración de modelos anatómicos de cera de las colecciones científicas de la Universidad Complutense de Madrid*.

Durante el transcurso del proyecto diversos especialistas realizaron una investigación cuya metodología se ha centrado en la reconstrucción de pérdidas volumétricas de un modelo anatómico del siglo XVIII conocido como *Parto de Frente* (n.º Ref.: MAJP000145). El artefacto forma parte del Museo de Anatomía "Javier Puerta", ubicado en la Facultad de Medicina de la Universidad Complutense de Madrid. Los fragmentos faltantes de la figura se modelaron virtualmente después de digitalizarlos y, posteriormente, se compararon con varias técnicas de reproducción de dichas piezas a partir de distintos tipos de moldes. El primer método consistió en crear un positivo de cera utilizando moldes de silicona tradicionales. Para ello, se imprimieron en 3D los fragmentos que faltaban y se crearon moldes con ellos. El segundo enfoque consistió en un experimento en el que se probaron varios filamentos con el fin de imprimir directamente los moldes tras su modelado virtual. Esto se hizo con el propósito de lograr una producción más rápida de los moldes. El objetivo era comparar distintas técnicas para obtener positivos de cera, ya que el método tradicional, que consiste en hacer los moldes directamente sobre la obra real, sería impensable debido a la complejidad volumétrica y de los múltiples y delicados materiales. Además, el material del molde tiene el potencial de alterar el pH de la obra y podría causar daños irreversibles durante la extracción de la silicona. Con esta metodología, se evitó el contacto con la obra y todas las manipulaciones asociadas al proceso, de modo que se redujo de manera considerable el riesgo de causar un posible deterioro (figura 48) (Hernández-Muñoz & Sánchez-Ortiz, 2019).

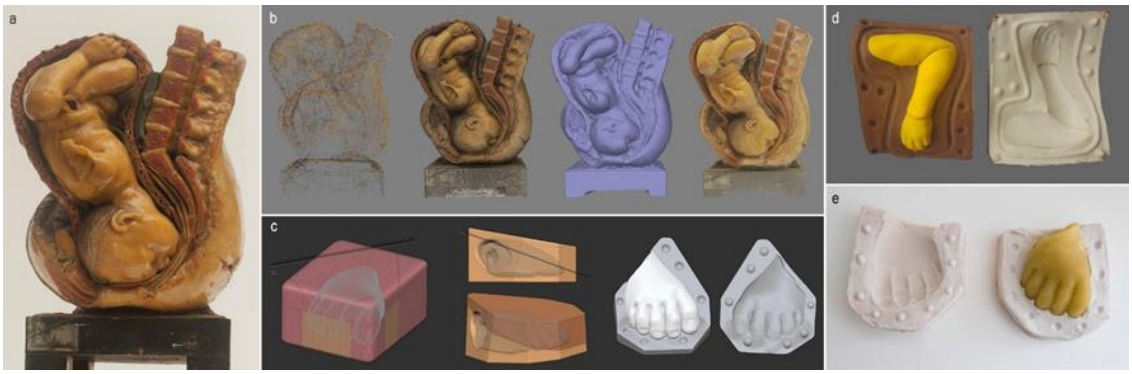


Figura 48. a) *Parto de Frente*, siglo XVIII (n.º Ref.: MAJP000145) © Toya Legido. b) Proceso fotogramétrico y obtención del modelo 3D. c) Diseño de moldes virtuales. d) Impresión 3D del fragmento faltante y proceso de realización de molde mediante silicona. e) Impresión 3D de los moldes y positivado en cera del fragmento faltante. © Óscar Hernández-Muñoz y Alicia Sánchez Ortiz.

Otros de los estudios, resultado del proyecto mencionado anteriormente en colaboración con el proyecto I+D+i Ref.: HAR2013-42460-P, *La ceroplástica en veterinaria: documentación, caracterización de materiales y métodos de conservación-restauración en la colección Complutense,* ha sido la reconstrucción, primero virtual y luego física, de una de las partes mutiladas pertenecientes a una escultura anatómica en cera *Miología de un buche* (n.º Ref.: MV-300), atribuida a Pedro Pablo Sánchez Osorio (s.f.) y Cristóbal Garrigó (1799-1863), realizada en el siglo XIX para el Real Colegio de Veterinaria de Madrid, que en la actualidad se encuentra ubicada en el Museo Veterinario Complutense de la Universidad Complutense de Madrid. Ante la falta de fuentes de documentación para llevar a cabo la reconstrucción del fragmento perdido correspondiente a la cabeza, se consideró necesario realizar una reconstrucción virtual. Para ello, se modeló en un programa informático de escultura digital un cráneo de *Equus africanus asinus* a partir de referencias fotográficas, para, posteriormente, crear cada uno de los músculos presentes en el cráneo mediante técnicas de modelado digital (figura 49). Una vez generado el modelo virtual, se imprimió la cabeza en 3D y se crearon los respectivos moldes de silicona para poder hacer el positivo en cera. Durante el proceso de positivado se aplicaron ceras de diferentes colores con el fin de dotar de mayor realismo a las distintas partes anatómicas de las cabezas. El objetivo final era complementar el modelo anatómico original, colocando la reproducción junto a él en el espacio expositivo, pero sin incorporarlo en ningún momento a la obra real, aproximando al espectador a la intención original de la obra (figura 50) (Hernández-Muñoz et al., 2019). Otros ejemplos enfocados al desarrollo de este tipo de metodologías se basan en propuestas de procesos de reintegración volumétrica para el tratamiento de partes faltantes, consideradas estas imprescindibles para asegurar la estabilidad estructural del conjunto escultórico (Hernández-Muñoz et al., 2020).

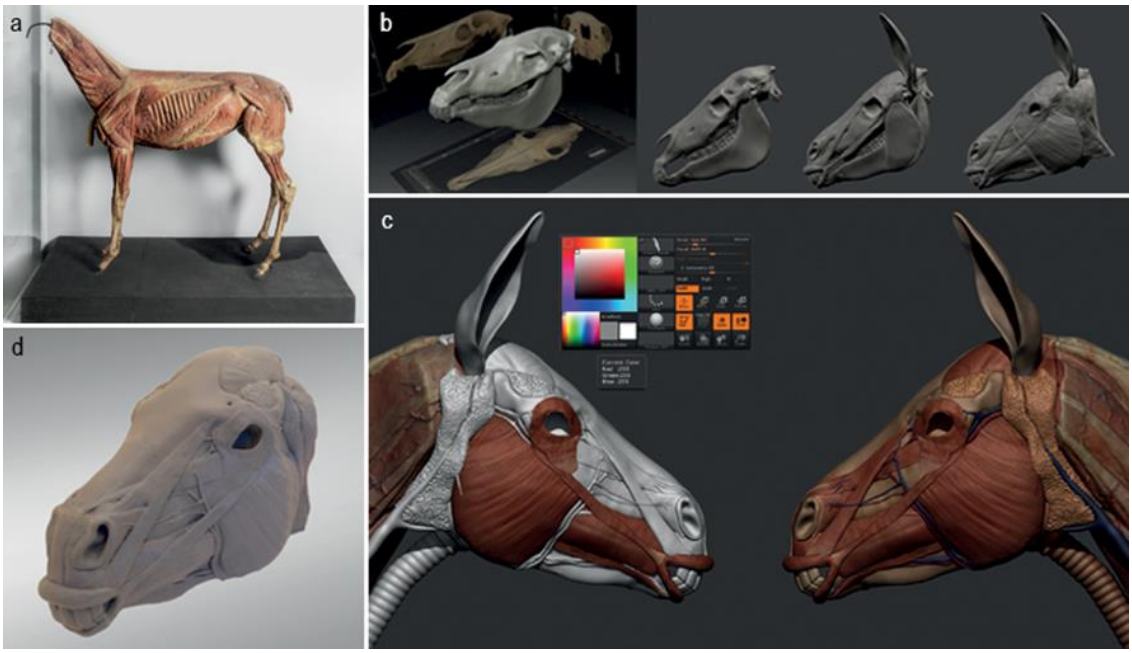


Figura 49. a) Escultura anatómica de bulto redondo en cera *Miología de un buche* (n.º Ref.: MV300) © Toya Legido. b) Análisis de la anatomía a través del cráneo de *Equus africanus asinus.* c) Proceso de reconstrucción virtual de los músculos faciales. d) Impresión 3D de la cabeza modelada. © Óscar Hernández-Muñoz, Alicia Sánchez Ortiz y Paris Matía Martín.



Figura 50. a) Proceso de vaciado de la cera en el molde. b) Realización de detalles anatómicos. c) Resultado final de la cabeza mutilada. © Óscar Hernández-Muñoz, Alicia Sánchez Ortiz y Paris Matía Martín.

A raíz del reconocido potencial analizado de las técnicas digitales 3D en este tipo de artefactos, debido a la necesidad de profundizar en otros muchos aspectos relacionados con la documentación rigurosa y fiel, así como en estudios concretos de diversos procesos de conservación-restauración, los trabajos de este equipo de investigación continuaron con el proyecto I+D+i Ref.: PGC2018-098396-B-I00: *Metodologías innovadoras en conservación de colecciones científicas con*

modelos didácticos de Botánica, Anatomía humana y animal basadas en tecnologías 3D. Durante su transcurso, se exploraron en profundidad estrategias específicas de registro con escaneado de luz estructurada, fotogrametría y videogrametría. Estas técnicas se compararon con el fin de identificar diversas soluciones adecuadas para digitalizar los artefactos según las necesidades y problemáticas tanto de las piezas como de los diferentes entornos disponibles en los museos universitarios. Este factor resultó determinante para poder estudiar minuciosamente intervenciones de conservación-restauración de manera virtual previamente a los tratamientos en la obra real. Además, facilitó la fabricación de facsímiles de piezas desaparecidas y la construcción de estructuras auxiliares permanentes destinadas a estabilizar los artefactos e impedir que continuaran avanzando los procesos de degradación.

La documentación de artefactos científicos utilizados con fines didácticos en la enseñanza de la anatomía exige procesos estrictos, fiables, bien regulados y validados, que proporcionen la mayor precisión, nivel de detalle y realismo posibles. En este sentido, la digitalización 3D por medio del registro fotogramétrico es una herramienta crucial para analizar el estado de conservación del artefacto y realizar aplicaciones de restauración. Con el propósito de alcanzar los máximos niveles de calidad y precisión, se han desarrollado diversos protocolos de actuación para cada una de las posibles aplicaciones sobre esta tipología de patrimonio científico (Sterp Moga et al., 2020). Cuando se precisa de un mayor volumen de información en el modelo 3D, ya sea con el fin de diagnosticar o analizar determinados procesos de restauración, es necesario recurrir a otras fuentes de iluminación como la fluorescencia visible inducida por radiación UV (Sterp Moga et al., 2021). La altísima fidelidad obtenida de la textura de color, gracias a las estrategias de iluminación, captura y gestión del color de las imágenes, ha permitido otras aplicaciones consistentes en la limpieza virtual o en pruebas relativas a reintegraciones cromáticas virtuales, con las cuales se pueden complementar los protocolos de intervención en la obra real (figura 51) (Sánchez Ortiz et al., 2021).

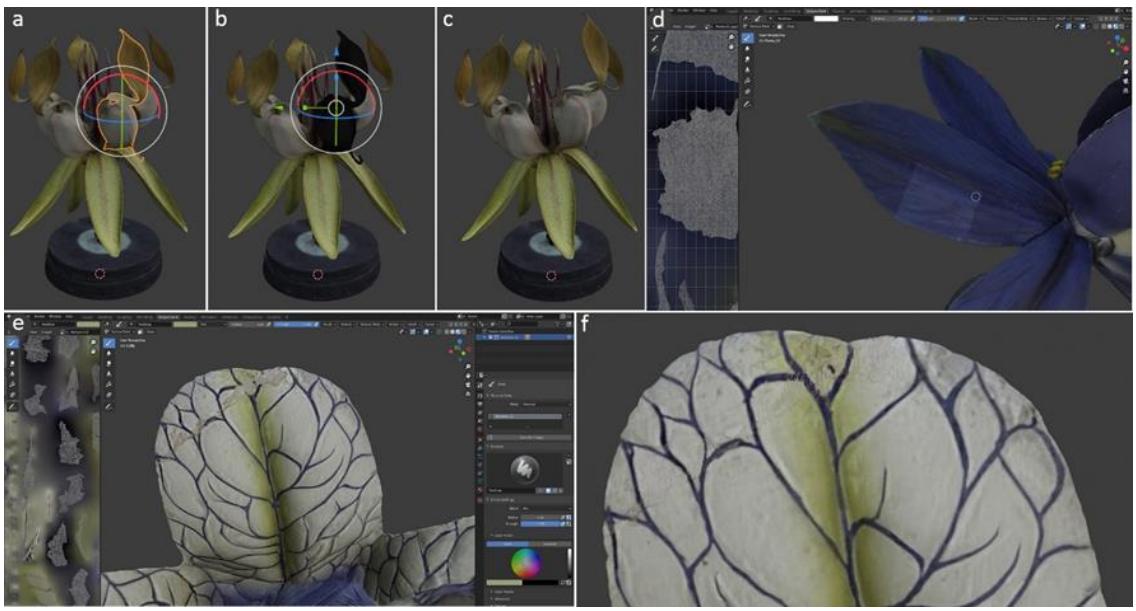


Figura 51. Diferentes procesos de restauración virtual. *Theobroma cacao* (MAF-BRENDEL nº 149 / n.º Ref.: UCM 4012655) y *Delphinium consolida* (MAF-BRENDEL nº 159 / n.º Ref.: UCM 4012655). a, b y c) Anastilosis virtual. d) Pruebas del grado de limpieza virtual. e y f) Reintegración cromática virtual. © Alicia Sánchez Ortiz, Óscar Hernández-Muñoz y Emanuel Sterp Moga.

La fotogrametría, en un proceso continuo de evolución, ha demostrado sistemáticamente su notable eficacia y calidad en el registro de las colecciones anatómicas científicas cuando se requiere de una textura de color de alta precisión. A pesar de que existen varios escáneres en el mercado, ninguno de ellos proporciona la excepcional calidad en la textura que puede conseguir la fotogrametría. Con el fin de analizar el desarrollo y adquisición de datos sobre estos artefactos, se han realizado estudios comparativos de la fotogrametría tradicional, la fotogrametría basada en ráfagas y la videogrametría, junto con los escáneres de luz estructurada (figura 52) (Hernández-Muñoz et al., 2023a). Sin embargo, en los casos en que los estudios exigen un registro volumétrico de alta calidad y precisión sin necesidad de una textura de color obligatoriamente, es preciso recurrir a escáneres de luz estructurada, ya que la fotogrametría no alcanza el nivel de precisión y resolución requerido. En este sentido, en ocasiones puede resultar imposible trasladar o manipular los objetos debido a su delicado estado de conservación. Además, la ubicación de estos artefactos en los museos puede plantear problemas debido a la limitada accesibilidad resultante de los espacios restringidos. Así pues, la digitalización correcta de estas obras constituye un reto considerable, a menudo agravado por las limitaciones espaciales y la naturaleza de los materiales constituyentes. Para superar estos retos, se han explorado diversas estrategias de registro utilizando escáneres de luz estructurada (Hernández-Muñoz et al., 2023b).

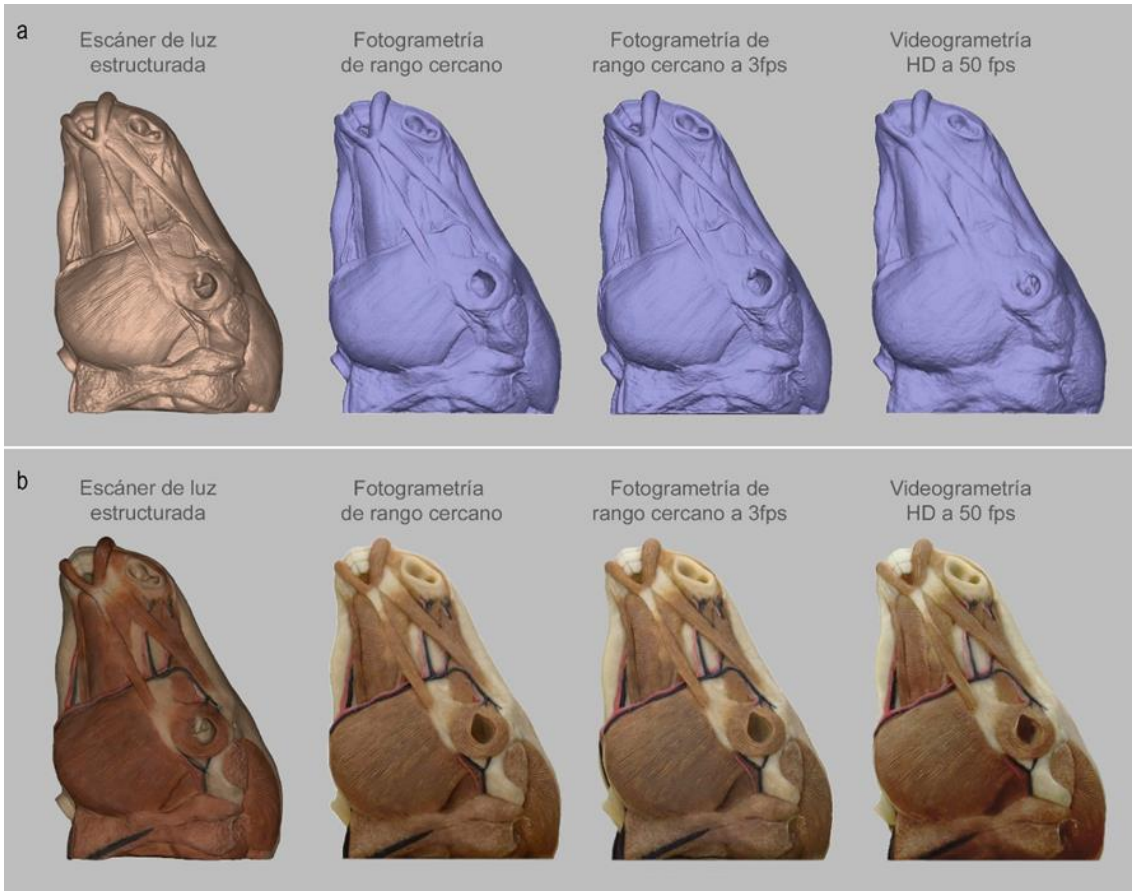


Figura 52. a) Mallas 3D obtenidas por medio de diversas técnicas de digitalización comparadas. b) Texturas de color obtenidas por medio de diversas técnicas de digitalización comparadas. © Óscar Hernández-Muñoz, Emanuel Sterp Moga y Alicia Sánchez Ortiz.

Los escáneres de luz estructurada ofrecen un enorme potencial cuando se requiere de una impresión 3D de alta calidad. Un ejemplo de ello se encuentra en una pieza dermatológica de cera, perteneciente al Museo Olavide, de la que se conserva solo su molde, aunque en un estado crítico de conservación. El estudio se ha basado en la digitalización de alta presión y resolución de los fragmentos que componen el molde, lo que ha permitido efectuar una precisa anastilosis de los mismos, así como obtener un primer estudio virtual de la patología que presenta la pieza. Para identificar mejor la enfermedad y volver a exponer el artefacto en el museo, se realizó un facsímil en cera mediante la impresión 3D del molde, de forma que en ningún momento se interactuó con el molde original (figura 53) (Hernández-Muñoz et al., 2022).



Figura 53. a) Molde original. b) Digitalización 3D del modelo. c) Anastilosis virtual. d) Creación de moldes virtuales. e) Configuración de la impresión 3D de los moldes. f) Positivo en cera a partir de los modelos impresos en 3D. g) Resultado final de la pieza dermatología perdida. © Óscar Hernández-Muñoz, David Aranda Gabrielli, Amaya Maruri Palacín, Emanuel Sterp Moga y Alicia Sánchez Ortiz.

Otra de las aplicaciones en las que se han requerido de escáneres de luz estructurada y modelado virtual, es la restauración de un modelo anatómico de caballo *Ligamento Nucal* (n.º Ref.: MV-670), realizada en el siglo XIX por Pedro Pablo Sánchez Osorio y Cristóbal Garrigó. Se trata de una obra de bulto redondo compuesta de hueso, metal y cera, ubicada en el Museo Veterinario de la Facultad de Veterinaria de la Universidad Complutense de Madrid. La pieza presentaba un estado de conservación crítico, ya que a lo largo del tiempo sufrió importantes

deterioros llegando a producirse un colapso parcial de su estructura metálica interna, lo que generó la formación de grietas, fracturas y deformaciones en la cera. Ante la imposibilidad de recuperar la forma original del objeto, se diseñaron y colocaron soportes permanentes de polimetilmetacrilato para estabilizarlo. Se utilizó una copia virtual, obtenida mediante escaneado 3D, con el fin de diseñar un soporte que se ajustará con precisión a la superficie tanto de la peana como de la figura. La impresión 3D se empleó para realizar pruebas funcionales y estéticas, mientras que el CNC se utilizó para producir el soporte final atendiendo a las características y necesidades de la obra (figura 54) (Hernández-Muñoz et al., 2023c).

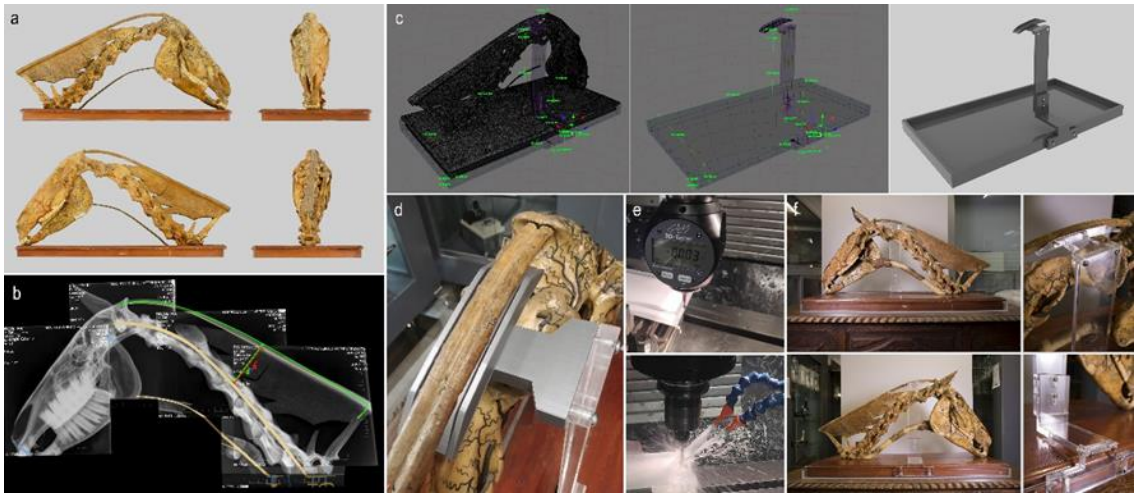


Figura 54. a) Digitalización 3D del *Ligamento nucal* (n.º Ref.: MV-670). b) Análisis de los Rayos X. c) Diseño de la estructura auxiliar permanente. d) Pruebas de funcionalidad. e) Proceso de creación de cada una de las piezas que conforman la escultura. f) Incorporación de las estructuras de polimetilmetacrilato a la obra. © Óscar Hernández-Muñoz, Emanuel Sterp Moga y Alicia Sánchez Ortiz.

A pesar de los numerosos estudios y casos analizados, a fecha de hoy el potencial que reúnen estas herramientas y las múltiples aplicaciones posibles aún no se han explorado por completo en estas colecciones anatómicas científicas. Por ello, determinados estudios requieren de ensayos más amplios y precisos, así como de protocolos y metodologías específicas para llevar a cabo cada uno de los procesos.

Aparte de los estudios mostrados en general en diversas colecciones científicas y en particular sobre las tipologías seleccionados para esta investigación, durante el transcurso del proyecto I+D+i Ref.: PGC2018-098396-B-I00, se ha profundizado en determinados aspectos más. En concreto, se han desarrollado mapas de patología detallados, se han elaborado restauraciones virtuales con criterios científicos, en las que se ha analizado el seguimiento del estado de conservación, probado diversos materiales de impresión 3D para la fabricación de moldes y caracterizado distintos materiales de impresión 3D con el fin de crear estructuras auxiliares. Estas investigaciones se tratan de manera más amplia en otros apartados de la tesis (Sterp Moga et al., 2022a; Sterp Moga et al., 2022b; Sterp Moga et al., 2022c).

3.

MATERIALES Y MÉTODOS







3. MATERIALES Y MÉTODOS

Los modelos anatómicos didácticos poseen notables morfologías, colores y acabados realistas. Hoy en día, estos modelos siguen mostrándonos su lado más artístico y científico. Por lo tanto, es fundamental emplear métodos de digitalización fiables para asegurar una correcta documentación.

En la actualidad, la aplicación de los escáneres 3D y la fotogrametría tienen un amplio desarrollo como herramientas de preservación para la documentación y divulgación del patrimonio cultural. Son técnicas de análisis no-invasivas, donde cada una de ellas presenta diferentes cualidades, pero se complementan.

Por otro lado, la impresión 3D también ha resultado ser una gran aliada en los últimos años al ofrecer numerosas aplicaciones centradas en complementar los tratamientos de intervención. En este apartado se recogen los materiales y las metodologías seleccionadas para afrontar los diversos procesos de documentación y análisis de conservación-restauración planteados en los casos de estudio en esta tesis doctoral.

3.1. Digitalización 3D mediante escáneres de luz estructurada

3.1.1. Características de los escáneres

Las colecciones científicas de anatomía humana, veterinaria o botánica, al estar elaborados con diversos materiales cuyas composiciones volumétricas son, en gran medida, muy complejas al disponer de minuciosos detalles, por esta razón, los escáneres necesarios para la digitalización deben tener una elevada precisión y resolución, de modo que permita capturar con detalle toda la información, tanto volumétrica como cromática de la pieza a estudiar.

Debido a los diferentes tamaños de los artefactos o fragmentos anatómicos comprendidos entre 1 cm hasta 2 m de altura, es imprescindible la combinación de dos tipos de escáneres que aseguren una perfecta digitalización 3D tanto del volumen general como de los detalles en particular. En la presente investigación, se emplearon los modelos Artec Space Spider y Artec Eva, ambos de la empresa Artec 3D (figura 55). El uso de dos escáneres de la misma compañía se fundamenta en la total compatibilidad entre ellos para el uso combinado sobre un artefacto en una única sesión de trabajo. Ello permite obtener una altísima precisión en la fusión de diversas mallas. La principal diferencia entre estos dos equipos es el área de escaneado. En el caso de Artec Eva tiene un área de escaneo en su rango más cercano de 214 x 148 mm y 536 x 371 mm en su rango más lejano, permitiendo capturar zonas voluminosas. Sin embargo, el Artec Space Spider tiene 90 x 70 mm en el rango más cercano y 180 x 140 mm en el rango más lejano, lo que permite capturar zonas muy pequeñas (Artec Studio 15, 2020, p.24). Dadas estas características, el escáner Artec Space Spider muestra su máximo rendimiento en escaneados de figuras de pequeño tamaño, a partir de 5 cm, pero no está pensado para trabajar con grandes volúmenes, como es el caso de Artec Eva. Por ello, dichos escáneres se utilizaron de forma combinada. Para esculturas de mediano y gran formato, se recurrió al escáner Artec Eva, capturando el volumen general; en la misma sesión, se empleó el Artec Space Spider para registrar los detalles más minuciosos de cada área. En los objetos más pequeños, se usó solo Artec Space Spider.



Figura 55. A la izquierda Artec Space Spider y a la derecha Artec Eva. © Artec Studio 15.

Para lograr una alta calidad en el escaneado de la obra a digitalizar, es imprescindible que la precisión y la resolución del escáner sean muy elevadas. En el caso de Artec Space Spider, este tiene una precisión de 0,05 mm y una resolución de 0,1 mm. Respecto al escáner Artec Eva, su precisión es de 0,1 mm y su resolución de 0,2 mm. Ambos modelos presentan una precisión en relación con la distancia de 0.03% sobre 100 cm (Artec Studio 15, 2020, p.24).

Durante el proceso de registro, Artec Space Spider captura a una velocidad máxima de 7.5 fps (*frames per second* - fotogramas por segundo), y Artec Eva a 16 fps. De este modo se asegura que los objetos adyacentes a las áreas del modelo se superpongan a medida que se mueve gradualmente el escáner.

Los equipos presentan un diseño para uso portátil, con un peso ligero y un tamaño compacto. Artec Space Spider dispone de 4 cámaras y un proyector de luz azul. La primera es la cámara RGB y está ubicada en el centro rodeada de 6 LED (*Light Emitting Diode*, Diodo Emisor de Luz). Las tres cámaras restantes son sensores para el patrón de luz azul, que sirven para registrar el volumen tridimensional. La mayoría de los escáneres solo disponen de dos cámaras tridimensionales para el registro volumétrico. El modelo Space Spider, gracias a sus tres cámaras tridimensionales, permite una mayor resolución de hasta 0.1 mm. Respecto al Artec Eva, dispone de 2 cámaras únicamente, una RGB rodeada de 12 LEDs ubicados en el centro y otra correspondiente al sensor que registra el volumen 3D en la parte inferior. En este caso el proyector de luz está en la parte superior. Ambos escáneres son de triangulación, lo que posibilita la obtención de mallas de alta calidad.

Respecto a la textura de color, estos escáneres son capaces de llegar a 1,3 megapíxeles, en el Artec Space Spider, y a 2,3 megapíxeles, en el caso de Artec Eva, lo que asegura un registro adecuado del detalle en los modelos tridimensionales creados. Por último, presentan un método de reproducción del color de 24 bpp, que, en general, ofrece un buen resultado. En lo relativo a la calidad del color, es importante recordar que estos aparatos carecen de sistemas de control y gestión de la colorimetría de manera manual.

3.1.2. Estrategias y parámetros de registro

A lo largo del proceso de escaneado se tuvieron en cuenta una serie de factores. Primero, se observó en la pantalla del ordenador el objeto a lo largo del proceso de escaneado. En segundo lugar, se registró la superficie constantemente bajo los colores verdes que corresponden a la distancia óptima de registro. En tercer lugar, se realizaron movimientos suaves y se mantuvo la orientación del escáner perpendicular al objeto.

Previamente al comienzo del escaneado, fue de gran ayuda trazar una estrategia de captura, en cuanto a movimientos y ángulos, según se precisó en diversas zonas de cada una de las obras, con el fin de lograr un escaneado fluido y preciso.

Para el registro tridimensional de las esculturas anatómicas se emplearon dos estrategias de captura. La primera consistió en mantener estática la pieza y rodearla desde diferentes puntos de vista, a una distancia de entre 15-25 cm aproximadamente, en el caso de Artec Space Spider, y 60-70 cm, en el caso de Artec Eva. Este método se utilizó para las piezas de mediano y gran formato.

La segunda estrategia se basó en girar la obra o fragmento mediante una plataforma giratoria. Este sistema resulta ser muy útil para el registro de objetos pequeños cuya geometría no es muy compleja. Por el contrario, objetos pequeños y, sobre todo, con espesores muy finos, sin mucha textura y con poca geometría, necesitan de otros elementos adicionales para poder registrarlos adecuadamente, como los marcadores. Durante el escaneado con Artec Space Spider y atendiendo al área de escaneado tan pequeño del que se dispone, fue imprescindible recurrir al uso de estos materiales elaborados.

Existe una gran variedad de marcadores bidimensionales y tridimensionales generados muchas veces por algoritmos matemáticos. Sin embargo, para estos equipos se consideró más oportuno recurrir a unos marcadores manuales compuestos por diferentes trazos entrelazados o letras. De este modo, el escáner va a tener un mayor volumen de información y, por lo tanto, le resultará más fácil reconocer la geometría en zonas complejas de un objeto.

En el caso de los dos equipos a la hora de escanear con estos marcadores, sobre todo objetos con espesores muy finos, fue necesario en las zonas más complejas mantener el área de escaneado que indica la pantalla del programa, siempre ubicada, por un lado, en la parte del objeto y, por otra, en el marcador. En algunos casos concretos, se precisó de soportes para estabilizar las piezas más finas. Para ello, se recurrió a la espuma de polietileno no reticulado *foam*, realizando las cavidades necesarias. Además, se realizaron diversas líneas de modo que sirvieran de marcadores y, con ello, facilitar el registro.

En ambas estrategias de captura fue necesario poner los modelos o fragmentos en diferentes posiciones para poder registrarlos por completo. Asimismo, en cada uno de los modelos se precisó de un área de solape entre ellos, con el fin de alinearlos posteriormente.

Por otro lado, las estrategias mencionadas anteriormente están enfocadas al uso del escáner con las luces LEDs activadas. Para lograr un registro con el menor número de brillos causados por la existencia de películas de recubrimiento aplicadas sobre las superficies de los modelos artificiales, se procedió a capturar la superficie desactivando la luz LED de los escáneres. En este punto, al anular esta opción para poder registrar fielmente el volumen y la textura de color, los

fabricantes recomiendan generar un entorno lumínico superior a 1000 lux, ya que por debajo de estas recomendaciones la textura final se vería afectada con zonas demasiado oscuras (Artec Studio 15, 2020, p.67). En este caso, para poder asegurar una correcta digitalización se creó un entorno lumínico de 2200 lux en el punto de la obra con diferentes difusores para obtener una luz más difusa.

Otro aspecto que se tuvo en cuenta a la hora del escaneado fueron los fps. Por defecto, en el caso Artec Eva aparece siempre a la mitad de su rango entre 7-8, pudiéndose aumentar hasta los 16, si fuera necesario. En el caso del escáner Artec Space Spider, su máxima velocidad es de 7.5 y, por defecto, suele trabajar entre 5-7 fps. Durante todo el proceso de escaneado se mantuvieron los parámetros por defecto.

A la hora de escanear las piezas, dentro del programa informático Artec Studio Profesional 15, en la ventana de *escaneo*, el programa permite manipular y activar diferentes parámetros que, según cada caso, pueden resultar más o menos útiles. Dispone de opciones como, una fusión en tiempo real, alineación automatizada y eliminación automática de la base, entre otras elecciones. Algunas opciones son realmente apropiadas para obtener un registro de altísima calidad, como es el caso del registro con *textura + geometría*. Este sistema híbrido facilitó grabar la textura en el modo de seguimiento de geometría y, con ello, se pudo obtener una información geométrica y una textura de color de alta resolución.

Otra opción muy interesante que presenta es el *brillo de textura*. Esta permitió reducir ciertos brillos que se generan en los modelos durante el proceso de escaneado a causa de los constantes destellos de la luz LED de los propios equipos.

Por otro lado, hay dos parámetros más que son muy importantes y útiles a la hora de registrar ciertas superficies complejas, como la *profundidad de campo* y la *sensibilidad*. Estas dos opciones solamente están disponibles para Artec Space Spider, debido al área de escaneo tan reducido que presenta. La *profundidad de campo*, comprendida entre 400-1000 mm, permitió acceder mejor en zonas con volúmenes complicados de poco acceso. Respecto a la *sensibilidad*, posibilitó aumentar o disminuir la tolerancia de registro. El inconveniente de elevar la *sensibilidad* es que normalmente la malla se verá alterada por un ligero ruido. En algunos modelos, cuyos acabados son muy brillantes a causa de las películas filmógenas, se procedió a manipular este parámetro mínimamente para poder registrar el volumen de la obra.

Por último, respecto a la calibración de los equipos, en el caso de Artec Eva no es necesaria, pero sí en el Artec Space Spider. Aproximadamente en cada 20 artefactos escaneados se procedió a calibrar el aparato, con el fin de asegurar un registro preciso. Para ello, se recurrió al equipo compuesto por un soporte para el escáner 3D, y un patrón de calibración con su plataforma (Artec Studio 15, 2020, pp.227-250). Finalmente, mediante el programa informático Artec Studio Profesional 15 se efectuó dicha operación.

3.1.3. Procesado de los modelos escaneados

El tratamiento de los datos obtenidos se llevó a cabo con el propio programa informático de los escáneres Artec Studio Profesional 15. Este programa dispone de numerosas herramientas para realizar un procesado completo de los datos obtenidos hasta lograr el modelo final.

Antes de comenzar con los tratamientos de los datos fue de gran ayuda colocar los objetos respecto al plano. En el modo *editor*, mediante la herramienta de *transformación*, se procedió a mover y rotar los diferentes fragmentos escaneados en los ejes X, Y, Z. Esta herramienta también permite escalar y reflejar el modelo, pero estas dos opciones se evitaron para no alterar la escala real del modelo.

A lo largo del proceso de escaneado es habitual encontrar cierto ruido alrededor del modelo u otros elementos ajenos a él que no son necesarios procesar. Por ello, la limpieza de estas impurezas es muy importante para evitar, por un lado, posibles invenciones mediante volúmenes inexistentes durante el procesado de la malla y, por otro, para agilizar tiempos de trabajo. Por tanto, en primer lugar, se procedió a realizar una limpieza del ruido presente alrededor de cada fragmento escaneado. Para ello, en el modo *editor* se escogió la herramienta *borrador*. Dentro de este utensilio hay diferentes tipos de selecciones: *2D, 3D, rectangular, lazo, plano de corte*, entre otras, de las cuales la más útil para estos modelos resultó ser la *selección de lazo*. El programa informático también presenta una herramienta automática de *eliminación de ruido* en el panel de herramientas, en concreto, en la pestaña de *fusión*. Esta herramienta da muy buenos resultados al permitir eliminar grandes nubes de puntos atípicos, pero no es del todo precisa. Para limpiar todo el ruido de manera eficaz fue imprescindible recurrir a herramientas manuales.

En el transcurso del proceso de registro se observó que, en ciertas zonas complejas con espesores muy finos en la materia, el escáner empezó a duplicar el modelo, fusionando dos modelos con una ligera desviación. En estos casos, se precisó de un análisis detallado donde cada uno de los fragmentos escaneados. Se desglosaron y se seleccionaron los fotogramas que se habían desviado. Una vez escogidos estos, se separaron en un nuevo fragmento o se eliminaron según el caso.

Corregidos los pequeños errores de cada fragmento escaneado, el siguiente paso fue alinearlos. El alineado de las diferentes capturas es una fase fundamental, por ello, Artec 3D desarrolló diferentes herramientas de alineación, como *no rígida*, *compleja* y *ajuste óptimo* dentro de la pestaña *alinear*.

El modo de alineación *no rígida*, además de aplicar algoritmos de traslación y rotación, produce una adaptación entre sí de las distintas partes escaneadas originando una deformación de los datos 3D. Esta opción solamente es recomendable en los modelos que cambiaron su composición durante el proceso de escaneado. En el caso de los modelos anatómicos no se recomienda, puesto que no se asegura una gran fidelidad volumétrica.

Por otro lado, respecto a la alineación *compleja*, presenta una alineación de multipuntos que permite enlazar más de dos modelos de puntos. Esta opción, en ocasiones, puede resultar útil para alinear zonas dobladas o pequeñas irregularidades, si el *registro global* no lo solventó.

Por último, la alineación *ajuste óptimo* presenta tanto la opción manual como automática. En ambos casos se aplica únicamente los algoritmos de traslación y rotación, para asegurar una alta precisión en el volumen. Para la elección automática solamente hay que seleccionar los diferentes fragmentos que se quieran alinear. Esta herramienta supone un gran ahorro de tiempo, pero en ocasiones no es del todo resolutiva. Es por ello por lo que siempre es mejor realizar una alineación manual mediante la indicación de tres o más puntos en común de cada fragmento escaneado.

En los casos donde la geometría resultó compleja, se optó por emplear una alineación por textura dentro de la alineación *ajuste óptimo*. Esta opción facilitó el proceso de alineación y redujo el rango de error. Se aplicó dicha opción dado que los modelos anatómicos presentan una geometría compleja y una textura muy variada.

Tras finalizar la alineación de los fragmentos, el siguiente paso que se realizó fue el *registro global* dentro de la pestaña *herramientas*. Esta herramienta dispone de un algoritmo que convierte todas las superficies en un único sistema de coordenadas.

Relacionado con la calidad del registro de los escaneados, cada fragmento presenta un valor que determina el *error máximo*. Evidentemente, cuanto mayor sea este rango, menor será la precisión alcanzada. En el caso del Artec Space Spider, el rango que presenta mejores resultados en relación con las dimensiones de los modelos científicos seleccionados oscila entre 0-0.1, mientras que con valores >0.4 se obtienen resultados regulares. En el caso de Artec Eva, dentro de un rango de entre 0-0.3, los resultados son buenos, siendo el rango >1.0 donde se observan los menos exactos. Estos valores indican la precisión de captura y alineación de los diferentes escaneos. El *error máximo* solo es significativo tras realizar el algoritmo de *registro global*, pues refleja el resultado final de la precisión del modelo 3D (Artec Studio 15, 2020, p.110).

Aparte de la herramienta que determina el valor del *error máximo*, el programa informático dispone de otro utensilio de visualización denominada *modos de color*. Con ello, se puede ver la calidad del registro *error máximo* en una escala de colores comprendida de entre 0.1 correspondientes al verde hasta el rojo con valores superiores a 0.7. Los colores representan las alturas de captura, teniendo que estar todo el modelo en verde para unos resultados perfectos. En aquellos casos donde no se alcanzaron los valores óptimos tras el *registro global*, se procedió a eliminar todos aquellos fotogramas de cada uno de los fragmentos que presentaban un valor superior a 0.2.

Antes de seguir con el flujo de trabajo, se efectuó nuevamente otra limpieza del ruido existente, ya que al alinear algunos de los fragmentos, con normalidad suelen generar pequeños ruidos. Es importante realizar la máxima limpieza, puesto que de ello dependerá la calidad de la siguiente fase.

A continuación, se procedió a aplicar la *fusión* de los diferentes fragmentos alineados, para crear un modelo 3D poligonal. En la ventana de *herramientas*, en la pestaña de *fusión*, el programa informático dispone de tres opciones para crear la malla. La primera ofrece una *fusión rápida*. Esta no se recomienda debido a que se reduce la calidad. La *fusión suave* es aconsejable, sobre todo, para objetos en movimiento, ya que compensa las desviaciones durante la fusión. Este factor evidentemente no ofrece una alta precisión. En el caso de los modelos anatómicos, para obtener unos buenos resultados, se recurrió a la *fusión dura*, porque está enfocada a objetos sólidos. En el supuesto de los escaneados obtenidos con Artec Space Spider, se aplicó una resolución de 0.1 y en el caso de Artec Eva de 0.2. Es muy importante que los valores a asignar no estén por debajo de los rangos máximos de cada escáner, ya que esto podría generar errores en el modelo final. En la mayoría de los casos, al utilizar la combinación de los dos, se aplicó los valores más altos de los dos escáneres, es decir, de 0.2.

Un factor determinante que se tuvo en cuenta en todo momento fue lograr la más alta precisión volumétrica y calidad en los detalles respecto a la obra original. Por ello, se analizaron los

resultados de las mallas obtenidas en dos modelos diferentes. El primero, contiene todos los escaneados realizados, ofreciendo una superposición y repetición de la información en una misma zona. En el segundo modelo, tras obtener el *registro global* y eliminar todos los fotogramas superiores a 0.2, se suprimieron aquellas partes coincidentes en una misma zona, a excepción de las áreas de unión en cada fragmento. Con ello, se evitó la acumulación de un exceso de información. Asimismo, para analizar la calidad de la malla con sumo detalle se recurrió a los *mapas de distancias* disponibles en la pestaña *medidas*, que permitieron concretar las discrepancias entre ambos modelos.

El último paso a fin de completar el modelo fue la aplicación de la textura de color sobre la malla obtenida. A tal efecto, en la ventana de *textura* mediante la opción de *vista previa*, se analizaron los resultados gestionando los parámetros del tamaño de los triángulos (en píxeles), así como el tamaño de la salida de la textura. Las dimensiones del píxel se aplicaron siempre con la máxima calidad (16384 x 16384). Antes de seguir con el siguiente paso, el programa informático presenta una opción para *reducir el deslumbramiento*. Esta opción trabaja con algoritmos matemáticos y, en general, elimina los brillos capturados en el modelo durante el proceso de digitalización. Por último, se procedió a aplicar el *texturizado* con la finalidad de lograr una textura de calidad.

Para el proceso de escaneado y el procesado de los modelos, se utilizaron dos tipos de ordenadores. En cuanto al proceso de escaneado, se empleó un ordenador portátil tipo HP, con procesador Intel® Core™ i9-9880H de 2.3 GHz y 32 GB de RAM, con una tarjeta gráfica NVIDIA Quadro RTX 4000 con 8 GB de memoria. Respecto a los tratamientos posteriores de los datos obtenidos, se realizó mediante un PC Lenovo, con procesador Intel® Core™ i7-6700k de 4.2 GHz y 64 GB de RAM, que incorporaba una tarjeta gráfica NVIDIA GEFORCE GTX 1080 con 8 GB de memoria.

3.2. Digitalización 3D mediante fotogrametría

3.2.1. Problemática de la fotogrametría aplicada a los modelos anatómicos científicos

Durante la planificación de la estrategia de captura fotográfica se encontró una enorme dificultad debido a la intensa reflexión de la luz sobre los modelos anatómicos a causa de la existencia de películas filmógenas brillantes. Por otro lado, cuando una superficie presenta numerosos brillos o zonas con huecos >2 cm, es muy común que durante el procesado del modelo fotogramétrico se generen errores tanto en la malla como en la textura de color. Esta problemática es difícil de resolver, puesto que la fotogrametría se basa en la búsqueda de diferentes puntos homólogos entre dos o más imágenes. En zonas subexpuestas y sobreexpuestas el programa informático no es capaz de reconocer puntos en común entre una imagen y otra y, por tanto, altera las zonas de una manera arbitraria.

En otras tipologías de objetos con características físicas similares, en cuanto a brillos y zonas traslúcidas o transparentes, algunos autores recomiendan aplicar ciertos productos para modificar la refracción de la superficie del material. Uno de los productos más empleados es el ciclododecano (Díaz Marín, 2017), un hidrocarburo cíclico saturado ($C_{12}H_{24}$) que al ser aplicado sobre una superficie proporciona un acabado opaco y cuya principal propiedad es su capacidad

de sublimar en horas. Al generar dicha superficie opaca, el registro fotogramétrico se realizaría sin apenas problemas. Los artefactos anatómicos están construidos con una gran variedad de materiales y presentan una morfología bastante texturizada y compleja debido a la presencia de numerosos huecos estrechos de difícil acceso. A causa de estas características y a la incertidumbre de la reacción a largo plazo sobre los materiales constituyentes o a la posibilidad de dejar residuos, se descartó el empleo del mismo.

Una vez analizadas las dificultades necesidades para registrar fielmente los modelos anatómicos, se procedió a desarrollar nuevas estrategias específicas de captura para este tipo de piezas. Para ello, durante el proceso se tuvieron en cuenta una serie de factores, tales como: analizar las características volumétricas de los modelos anatómicos, dimensiones, considerar el entorno, examinar la presencia de brillos o zonas oscuras, analizar una estrategia para iluminar adecuadamente el entorno de la pieza, trazar una estrategia de captura fotográfica teniendo en cuenta el número de fotografías, anillos, ángulos y las alturas necesarias de cada anillo.

3.2.2. Materiales y configuración de la captura fotográfica

Al ser la fotogrametría una técnica basada en el uso y relación de múltiples imágenes analizadas entre sí, la calidad y precisión del objeto a reproducir dependerá en gran medida de la cámara fotográfica. Por ello, se tuvo en cuenta dos factores determinantes, por un lado, el sensor y, por otro, el objetivo. Existen diversos tamaños del sensor, pero evidentemente, cuanto más grande sea mayor número de píxeles presenta y, por lo tanto, mayor calidad tendrá la imagen. Ello proporcionará mayor información para generar el modelo 3D. Para el registro fotográfico, se utilizó un equipo compuesto por una cámara Canon EOS 5D Mark II, de 21,1 megapíxeles, con un objetivo fijo de 50 mm de la misma marca y un trípode Manfrotto 290 Xtra.

Con el objetivo de sacarle el máximo rendimiento a la cámara fotográfica, se procedió a trabajar en formato manual configurando diversos parámetros. En primer lugar, se estableció el disparo en formato RAW, ya que almacena toda la información en bruto sin compresiones. En segundo lugar, se seleccionó el espacio de color más adecuado. Muchas cámaras vienen configuradas por defecto con el espacio sRGB. Dicho espacio está limitado a un 35% del modelo CIE y presenta una gran carencia de representación de los colores verdes. Para dar respuesta a esta ausencia, Adobe, creó un espacio mucho más rico en su color, como puede ser el RGB de 1998 (Sánchez & Castelo, 2017). Con ello, se logró ampliar la gama de verdes a un 45% del modelo CIE. Por tanto, dada la gran importancia de lograr una rigurosa calidad colorimétrica se eligió el espacio de color Adobe RGB. Respecto a la velocidad de obturación, se aplicaron siempre los valores más altos que el entorno lumínico permitió, generalmente 1/25. En cuanto al diafragma, siempre se seleccionó una focal media f/8.0, ya que con valores superiores o inferiores se generan aberraciones, distorsiones, difracciones o pérdida de nitidez. Por último, en cuanto al ISO se aplicó los valores más bajos ISO 100 para evitar alterar la imagen con diversos ruidos.

Los resultados de un modelo que asegure la máxima calidad y fidelidad colorimétrica no solamente dependen de la cámara y de su correcta configuración, sino que influyen diferentes aspectos, tales como la iluminación, la gestión del color y el proceso de revelado digital.

El entorno lumínico es uno de los factores más importantes. Por esta razón, se recurrió a fuentes de iluminación artificial que no emitiesen calor y que proporcionasen un CRI alto, así

como una regulación en la temperatura de color. Para alumbrar la escena fotográfica se emplearon dos tipos de fuentes de iluminación que permitieron la obtención de una mayor información de cara al estudio y diagnóstico de los modelos. La primera empleada fue mediante la luz visible. Para ello, se utilizaron luces LED de tipo CTS Art Lux 10L. Esta fuente de luz presenta LEDs High CRI de luz natural, con un CRI de 95, una temperatura de color de 5000°K, y un flujo lumínico de 2700 lúmenes, entre otras características, lo que la convierte en una luz muy apropiada para la correcta iluminación y reproducción del color de los artefactos anatómicos. Ello ha ofrecido aproximadamente en el punto exacto de la obra 3200 lux.

La segunda fuente de iluminación fue mediante la fluorescencia visible inducida por radiación UV. Las imágenes UV proporcionan información muy importante acerca de la creación del objeto, su historia, su envejecimiento y transformaciones de los materiales a lo largo del tiempo (Picollo et al., 2020, p.11). Para registrar correctamente los modelos, se precisa de un entorno oscuro cuyas ondas UVA y UVB oscilan entre los 280-400 nm del espectro electromagnético. Por tanto, se utilizaron dos lámparas fluorescentes de UV, modelo CTS ART LUX 40, ofreciendo aproximadamente 160 lux en el punto exacto de la obra. Teniendo en cuenta estas características lumínicas se establecieron los siguientes parámetros: 100 ISO, diafragma f/8 y obturador 1 s (Sterp Moga et al., 2020).

Con el fin de alumbrar de manera homogénea los artefactos y reducir al máximo posible los brillos, se recurrió a dos métodos de captura. La primera consistió en emplear un filtro polarizador (B+W F-PRO Polarizador) mediante luz visible para evitar registrar los brillos presentes en los modelos. La segunda, con el fin de prescindir de los filtros polarizadores, consistió en una caja de luz tipo Neewer con unas dimensiones de 80x80x80 cm que posibilitó matizar los brillos generados por la luz del entorno y los focos. Además, se colocaron sobre los focos de luz filtros compuestos por un material Tyvek®1442R, todo ello para generar una luz más difusa y reducir, con ello, lo máximo posible los brillos de los modelos.

Para iluminar de modo adecuado, se colocó un mínimo de dos focos a cada lado formando un ángulo de entre 45º y 90º respecto a la posición del objeto.

Por otra parte, durante la toma fotográfica se procedió a medir la cantidad de luxes que presenta el entorno lumínico en la ubicación exacta de cada artefacto, mediante un fotómetro Sekonic L-308S. Este factor es importante cuando se persigue condiciones óptimas de luxes con el fin de lograr unos resultados de calidad y afines a la obra real. Las unidades obtenidas en EV (*Exposure Value*, Valor de Exposición) con un valor establecido de ISO 100, según la tabla de valores comprendidos entre -4 a 16 EV, se convirtieron en luxes mediante la siguiente fórmula: $lux = 2^{EV} \times 2.5$.

Finalmente, junto a la obra se colocaron diferentes barras de escalas. Se recurrió a los modelos desarrollados por CHI (*Cultural Heritage Imaging*). Respecto al número de escalas, se emplearon un mínimo de cuatro, tal como recomiendan los fabricantes (Cultural Heritage Imaging, 2015).

3.2.3. Estrategias de captura

Para el levantamiento fotogramétrico, se emplearon dos estrategias de captura dependiendo de las dimensiones de los modelos y de su estado de conservación. La primera consistió en girar alrededor de la obra con la cámara realizando diferentes anillos a diversas alturas. Esta técnica se

empleó, sobre todo, en los modelos de mediano y gran formato. La segunda estrategia consistió en girar la obra mediante una plataforma giratoria ubicada en una caja de luz con un entorno de iluminación controlado. Esta táctica se aplicó en los modelos de pequeño tamaño y fragmentos muy reducidos.

En ambas estrategias, durante la captura fotográfica se efectuaron entre 24-36 fotografías por anillo, con un total de entre 7-12 anillos a diferentes alturas. El número de fotografías y anillos dependió de la complejidad del modelo. En este punto, se tuvo en cuenta la *ratio base / altura = 10%-20%.* De esta manera, se logró estereopares con una distancia proporcional entre las tomas fotográficas y el objeto, lo que proporcionó un área de solape en las fotografías >70%.

Las capturas fotográficas se llevaron a cabo empleando dobles anillos. En primer lugar, se registró el objeto completo con las escalas y, posteriormente, se realizaron fotografías de detalle en aquellas obras donde se consideró preciso hacerlo.

Otro factor determinante que se tuvo muy en cuenta se refiere al encuadre de la fotografía. Durante toda la toma se registró constantemente la obra junto con las escalas encuadradas lo máximo posible. De este modo, se aprovechó todo el espacio del sensor y se capturó únicamente la información útil. Sí, por el contrario, las fotografías comprendieran gran parte del entorno, se perdería mucha información y detalle en el modelo a digitalizar. Un posible inconveniente en cuanto al uso de escalas es que, en ocasiones, ocupan un espacio valioso en la imagen y, por tanto, se reduce ligeramente la resolución de la obra. No obstante, como ya se ha comentado, fue muy útil tomar fotografías generales de la obra junto con las barras de escalas y, a continuación, otras fotografías sin ellas con más detalle (Historic England, 2017a, p.49).

3.2.4. Tratamiento de la imagen: gestión del color y revelado digital

La representación del color es una tarea muy importante para la documentación de este legado patrimonial, ya que proporciona una información muy útil que contribuye a mejorar la comprensión de la escena y, por ende, el estudio de las obras a conservar (Ruiz & Pereira, 2014, p.338).

Toda documentación digital generada está expuesta a una degradación del color original de la pieza, a deformaciones de las imágenes, ruido, etc. El color que percibimos se encuentra condicionado por la luz del entorno que incide sobre un objeto y se puede representar numéricamente mediante la disciplina de la colorimetría (Pereira, 2013, p.21).

Se mencionó en apartados anteriores la importancia de iluminar correctamente un objeto para reducir los brillos y lograr una fidelidad precisa. En los museos universitarios, por ejemplo, las distintas luces, naturales y artificiales, repercuten negativamente en la reproducción del color debido a las diferentes temperaturas de color y sus respectivos CRI. Esto genera múltiples brillos, luminancia, luminosidad, tonos y saturaciones, que causan modificaciones en los colores y los aleja de los existentes en el objeto real. Para lograr una perfecta iluminación será necesario conseguir que las diferentes luces coincidan en los CCT (*Correlated Color Temperature*, Temperatura de Color Correlacionada) (Pereira, 2013, pp.42-43). Estos parámetros generan un espacio de color representado matemáticamente en tres dimensiones. Un modelo de color que se empleó es el CIE LAB, constituido por un triángulo con un determinado espacio, también llamado Gamut. El Gamut sirve para gestionar los perfiles de color. Es un espacio intermedio que se genera

entre el espacio de entrada y el de salida. Mediante la configuración de la cámara se crea una relación entre el RGB del dispositivo y los valores establecidos por CIE.

Cada dispositivo interpreta el color de una manera, y para conocer con exactitud la medición en un equipo, es necesario un perfil de cámara. De este modo, se representa un rango específico de un determinado aparato. El perfil ICC contiene el Gamut que abarca cada dispositivo, la reproducción tonal y el rango dinámico. Por ello, se recurrió a un perfil ICC. Dicho perfil proporciona información sobre los valores de RGB que tiene cada píxel en función del color de la escena. La asignación de los perfiles de color no cambia los valores RGB de los píxeles, sino que describe el modelo RGB en el espacio correspondiente del perfil ICC. Por tanto, tras asignarle el perfil de color, este implica un cambio de apariencia en la imagen, pero sin variar los colores RGB de los píxeles (Pereira, 2013, p.143).

Para resolver estas variaciones cromáticas y devolver a la obra los colores más afines a ella, se utilizó una tarjeta de precisión X-Rite ColorChecker Passport. Esta se colocó en el entorno lumínico junto al modelo científico a digitalizar. Se tomó únicamente una fotografía, ya que es suficiente para crear el perfil de cámara. Las imágenes restantes se capturaron sin la tarjeta de color.

Una vez obtenida la fotografía con la tarjeta de color en formato RAW, se insertó en el programa informático Adobe Camera Raw 10.5 de Photoshop y se guardó en formato TIFF. El proceso fue necesario puesto que el programa informático ColorChecker Passport solamente reconoce el mencionado formato para generar perfiles ICC. El siguiente paso consistió en insertar la imagen TIFF en ColorChecker Passport en la opción ICC-TIFF para generar automáticamente el perfil de cámara. En este punto, el programa informático corrige las dominantes de color en el transcurso del proceso de revelado RAW, de modo que se logra un equilibro entre los canales de color.

Con el perfil de cámara creado, las imágenes en formato RAW se insertaron en Adobe Camera Raw 10.5 de Photoshop. Con todas ellas seleccionadas en la pestaña de perfiles, se procedió a aplicar el perfil de cámara generado. A continuación, se estableció el balance de blancos mediante la herramienta cuentagotas, pinchando sobre el color gris neutro de 18% de la tarjeta de color, recomendado por el fabricante de la ColorChecker Passport.

Respecto al espacio de color para exportar las imágenes, se empleó el ProPhotoRGB, ya que el Gamut que alcanza es del 90% representado al modelo de referencia CIE LAB. En cuanto al formato de la imagen, se exportó en TIFF para evitar cualquier compresión de los datos. Esto fue necesario con el fin de guardar toda la información sin generar alteraciones en la reproducción del color. De otro modo, por ejemplo, con el formato JPEG sería imposible, ya que la imagen se comprime modificando los parámetros colorimétricos.

En relación con la gestión del color de las fotografías capturadas con la fluorescencia visible inducida por radiación UV, resultó muy complicado llevarla a cabo debido a la falta de un estándar de referencia oficial (Cosentino, 2015, pp.53-62). Pese a que existen unas tarjetas de gestión de color tipo Marcador-UV™, al no disponer de ella, las imágenes únicamente se ajustaron mediante diferentes parámetros. Para ello, dentro de Adobe Camera Raw 10.5 de Photoshop en la ventana *curvas de tono* en la pestaña de *punto*, se aplicó en la *curva* un contraste medio. Posteriormente,

en la pestaña *paramétrica* se establecieron los siguientes datos (Iluminación + 20, claros +20, oscuro +40 y sombras +20), con el fin de sacar la máxima información a los modelos anatómicos.

3.2.5. Procesado de los modelos fotogramétricos

Para la obtención de los modelos fotogramétricos, se recurrió al programa informático Agisoft Metashape® Professional. Pese a que existen en el mercado actual diferentes programas informáticos, donde cada uno presenta diversas ventajas e inconvenientes, su elección se fundamenta en el uso de mapas de profundidad, ya que ofrece una mayor calidad en la malla. Estos mapas revelan en el objeto las distancias cercanas con un color claro y las zonas más lejanas con un color oscuro. El volumen representado en una escala de grises analiza y calcula mejor el volumen de la obra y, con ello, genera una malla de alta precisión. Asimismo, la obtención de la textura de color ofrece un alto grado de realismo.

Por tanto, las capturas fotográficas fueron ensambladas mediante Agisoft Metashape® Professional, que permite corregir las deformaciones de la perspectiva y de la óptica del objetivo utilizado, restablecer la posición y la orientación de cada imagen y ubica en el espacio los puntos equivalentes detectados en las diferentes imágenes hasta llegar a configurar la *nube de puntos dispersa*.

Antes de comenzar con las operaciones pertinentes de cada fase de trabajo para la obtención del modelo fotogramétrico, fue imprescindible revisar la calidad de las fotografías mediante la herramienta *estimar calidad de imagen*. Este proceso fue importante para descartar todas aquellas fotografías cuya calidad está por debajo del 80% con el fin de obtener la mejor precisión del modelo virtual respecto a la obra real. El valor de la calidad representada por el programa se define entre 0.1-1, siendo los valores 0.5 y 0.6 los más óptimos. Por debajo de 0.5 y por encima del 0.7, las fotografías muestran errores. Estos errores alterarán la calidad del modelo final. Por tanto, se trabajó únicamente con las imágenes comprendidas entre los valores 0.5-0.65. En el caso de que la mayoría de las imágenes superaran los umbrales de calidad, será necesario repetirlas para asegurar una buena calidad.

Previamente a la elaboración del modelo fotogramétrico, en aquellos casos donde la estrategia de captura consistió en girar el modelo mediante la plataforma giratoria, fue necesario realizar en cada una de las imágenes una máscara. Las máscaras son indispensables cuando la imagen presenta el mismo fondo, pero el objeto cambió de posición. Por tanto, se eliminó todo el entorno de las fotografías, a excepción de un par de anillos que contenían, aparte del objeto, las escalas. Con dos anillos fue suficiente para poder obtener las escalas necesarias y escalar los modelos. Con el propósito de crear las máscaras, se recurrió a diferentes herramientas que presenta el programa informático, como *tijeras* o *pincel inteligentes*, y la *varita mágica*. Esta última es una de las más eficaces con fondos bastante uniformes si se aplica con una tolerancia baja. En algunas zonas donde la *varita mágica* no actuó con precisión se utilizó la *tijera inteligente*, ya que se ajusta perfectamente a los contornos de los modelos.

Una vez efectuadas las máscaras, se procedió a alinear con la máxima precisión utilizando la función *orientar fotos*, ubicada dentro de la pestaña *flujo de trabajo*. En esta fase, fue muy importante activar la opción *restricción de máscaras* perteneciente a las opciones avanzadas, si se emplearon estas, seleccionando la opción *punto de paso*, ya que de lo contrario el programa

informático no las reconoce. Asimismo, en la opción *pre-procesar* se eligió el modo g*enérico*, puesto que mediante este algoritmo el programa selecciona cada imagen comparándolas entre ellas. El *umbral de claves* y *enlaces por foto* se dejaron por defecto, para no alterar el procedimiento, por el hecho de que podría acarrear diferentes imperfecciones en los resultados del modelo final.

Tras finalizar el proceso, se logró una *nube de puntos dispersa* que dio, en primer lugar, una aproximación a la volumetría del objeto y, en segundo lugar, la estimación de la posición de cada una de las cámaras desde la que se realizaron las capturas. Durante el proceso de alineado intervino la técnica SfM (*Structure from Motion,* Estructura a Partir del Movimiento), analizando la posición y orientación de la cámara de manera automática (Westoby et al., 2012, p.301), empleando algoritmos como *Bundler* (SIFT/VLFEAT). Dichos algoritmos tienen como objetivo reconocer los puntos comunes de las imágenes y trazar el desplazamiento de estas correspondencias entre cada imagen. Esto permite crear una nube de puntos poco densa del objeto (Baldassarri & Lemmi, 2015, p.15). El algoritmo SfM necesita estimar las orientaciones interiores y exteriores de cada imagen, combinando todas las direcciones relativas de los pares de imágenes en la forma de sus matrices fundamentales (Verhoeven et al., 2012).

Tras obtener la primera orientación, se realizó una limpieza de los puntos que no corresponden al modelo. Para ello, se eligió la herramienta de selección libre. Aunque existen diferentes utensilios, esta es la más práctica para llevar a cabo una buena limpieza en los modelos anatómicos. Por otro lado, también se restringió la caja del espacio de trabajo ajustándose perfectamente al objeto. Así se logró optimizar los tiempos de procesado, ya que el programa informático solamente trabaja en el volumen que se aloja dentro de la caja.

En antiguas versiones del programa y en otros programas informáticos similares, la siguiente fase a desarrollar era la *nube de puntos densa*. En esta fase, se trabajaba mediante la técnica IBM (*Image Based Modeling,* Modelado Basado en Imágenes) buscando correspondencias entre las diferentes imágenes, empleando unos algoritmos (CMVS/PMVS) que analizan un mayor volumen de información en varios bloques (Baldassarri & Lemmi, 2015, p.15). Esta opción resulta interesante cuando el objetivo es realizar estudios comparativos entre diferentes nubes de puntos. Sin embargo, los nuevos algoritmos de trabajo, basados en los mapas de profundidad, permiten evitar este proceso, aunque sigue vigente, logrando la malla directamente desde la *nube de puntos dispersa*. Esto supone un enorme ahorro de tiempo en el procesado. Por tanto, el siguiente paso consistió en obtener la malla. Para ello, en la pestaña *flujo de trabajo* se utilizó la función *crear malla*. En el tipo de superficie, se aplicó el modo *arbitrario* y mediante la *opción origen de datos,* se establecieron los mapas de profundidad. Respecto al modo avanzado, se desactivó la interpolación para que el programa no rellene los huecos de la maya. Con ello, se evitó que ciertas zonas sé formen de una forma arbitraria.

Una de las herramientas novedosas que presenta el programa informático tras obtener la malla mediante los mapas de profundidad, es el *nivel de confianza del modelo* disponible en los diferentes modos de visión. Esta opción muestra la fidelidad de los diversos puntos en común que se calcularon para construir el volumen. Se representa en una escala de colores comprendidos entre el rojo (baja calidad) y el azul (alta calidad). Imágenes con calidades inferiores a 0.4 y superiores 0.9 estarán marcadas en rojo, con valores de 0.5 serán en color azul, con 0.6 en verde,

en amarillo corresponderá a 0.7 y un 0.8 en naranja aproximadamente. Por tanto, al seleccionar anteriormente los valores de cada imagen comprendida entre 0.5-0.65, el modelo que se obtiene con la opción *nivel de confianza del modelo*, utilizará los puntos marcados con los colores azules y verdes para una buena calidad.

Uno de los últimos pasos consistió en proyectar las fotografías sobre la superficie de la malla para crear la *textura*. En la pestaña *flujo de trabajo*, en *crear textura*, se seleccionó la opción en tipo de textura *mapa de RGB*, de forma que el programa informático analiza automáticamente las imágenes y elige los píxeles de la imagen central generalmente. Respecto al modo de mezcla, se optó por el *mosaico* por defecto.

Por otro lado, como se ha comentado ya en el apartado de estrategias de captura, para realizar un objeto a escala 1:1 fue necesario emplear unas barras de escalas codificadas de alta precisión. Las barras de escalas empleadas presentan uno de los tres marcadores que el programa informático Agisoft Metashape® Professional soporta. Para la detección de estos, una vez ejecutadas todas las fases de alineación, malla y textura, se procedió a aplicar una localización de los marcadores. Para ello, en la pestaña de *herramientas*, en *marcadores*, se seleccionó la opción *detectar dianas* con un tipo de diana *cruz sin codificar*. Los marcadores circulares codificados y no codificados son de alta precisión y el centro de cada uno de ellos es detectado algorítmicamente por el programa informático. Una vez aplicadas estas opciones, los marcadores aparecen ubicados en los diferentes puntos codificados. En ocasiones, resultó necesario mover o eliminar los marcadores que no presentan puntos en común o proyecciones en cada una de las imágenes. Se precisa obtener un mínimo de tres proyecciones por marcador para asegurar una buena fidelidad. Por defecto, la precisión de medidas de la distancia es de 0.001 m, pero en el caso de las escalas CHI, debido a la alta precisión que presentan, se estableció el valor de 0.0001 m.

Una vez localizados y ajustados debidamente los marcadores, en la pestaña de *referencias*, en *marcadores*, disponemos de un error (pix). Las barras de escalas ofrecen una alta precisión, no obstante, en las imágenes que presenten un error por encima de 0.4 píxeles, es conveniente eliminarlos para asegurar la máxima precisión. Por tanto, se mantuvieron solamente aquellos marcadores con un error por debajo de 0.4 píxeles (Cultural Heritage Imaging, 2015).

Establecidos los marcadores, se procedió a aplicar las medidas reales. Para ello, en la pestaña de *referencia*, se seleccionaron dos marcadores reconocidos y calibrados, y se aplicó una *medida de distancia* que figura en la propia escala. Tras finalizar este proceso, simplemente en la pestaña de *referencia* se actualizaron las transformaciones, obteniendo así la escala real.

Finalmente, para el procesado fotogramétrico, se utilizó un ordenador de tipo PC, con procesador Intel® Core™ i7-6700k de 4,2 GHz y 64 GB de RAM y 8GB de memoria perteneciente a la tarjeta gráfica NVIDIA GEFORCE GTX 1080.

3.3. Registro de patologías y procesos de conservación-restauración mediante cartografías digitales 3D

Las cartografías de patologías en 3D son una herramienta esencial para comprender el estado de conservación de cada obra y a partir de sus datos plantear las posibles opciones de tratamiento dentro de la toma de decisiones.

En los modelos tridimensionales, las representaciones de las patologías se pueden llevar a cabo de dos maneras principalmente, bien sobre la malla del modelo o bien sobre la textura de color. En el caso de la representación en la malla, el proceso implica una constante observación de un modelo con textura o imágenes de referencia para poder ubicar exactamente las patologías sobre la misma. Sin embargo, con este método de representación se pierde la posición exacta de la alteración, la extensión de la misma y la precisión, lo que dificulta disponer de una vista completa y precisa del estado de conservación del objeto. Con la finalidad de evitar estas limitaciones, las cartografías se elaboraron sobre la textura de color (Sterp Moga, 2019).

Para ello, se empleó el programa informático Adobe Substance 3D Painter, de la empresa Adobe. Su elección se fundamenta, en comparación con otros programas de infografía 3D, por ser uno de los más específicos en texturizado y pintura digital. Ofrece un flujo de trabajo muy sencillo y permite trabajar por capas y bloques, de modo que se puede identificar cada grupo de deterioros o señalar los tratamientos. Es imprescindible proceder de modo ordenado, ya que de ello dependerá la calidad de los estudios y de los análisis posteriores. Otra ventaja por destacar, es que permite trabajar directamente con un renderizado en tiempo real, por lo que se pueden contemplar al instante los resultados del trabajo.

En cuanto a la elección de la paleta de colores a emplear para marcar e identificar las distintas áreas, se optó por que tuviera una clara diferencia en lo que se refiere a las características colorimétricas de la obra, de tal modo que resaltasen sobre la textura de color. Es importante señalar que los valores de cada color no han de cambiar en ningún momento para evitar variaciones, y que estas puedan generar confusiones a la hora de identificar las patologías o los procesos de intervención.

Además, la preparación adecuada del modelo es clave para lograr resultados muy afines a la obra real. Por ello, en el canal de textura se trabajó en modo *basic color*. Para marcar las alteraciones o procesos de intervención sobre la textura del modelo virtual, se seleccionó la herramienta *paint*. Su aplicación se llevó a cabo mediante el visor 2D, en el que se muestra la malla desplegada como resultado del mapeado UV previo, y a través del visor 3D. Por medio del visor 3D, se señalaron prácticamente todas las alteraciones, y con el visor 2D se procedió a marcar cada una de las zonas que presentaban mayor dificultad. Como ejemplo de estos inconvenientes se destacan los huecos o áreas de volumen muy complejas, donde se ha logrado, procediendo de esta manera, una mayor precisión en la representación.

Dentro del espacio de trabajo *pain*t, se utilizó el pincel de *basic soft*. Dicha brocha dispone de diferentes modos de fusión de capa, como son: *normal, multiply, difference, overlay* o *soft light*, entre muchas otras. Estos sirven para especificar la manera en que se mezcla el color de una capa con el de las capas inferiores. Por defecto, la brocha siempre aparece con la opción *normal*, con la que el color aplicado en los píxeles de una capa oculta por completo el color de los píxeles ubicados en capas situadas más abajo, siendo este el modo más adecuado para este tipo de trabajo. Durante la aplicación del color es muy importante que se pueda observar la textura de la obra, con el fin de controlar con la máxima precisión la zona marcada de la alteración. Para ello, fue imprescindible ir alternando la opacidad del color aplicado entre el 30 y el 70% en función de cada caso.

3.4. Análisis dimensional de la manufactura y del seguimiento del estado de conservación

En el mercado actual existen diversos programas informáticos que permiten efectuar análisis volumétricos y cálculos métricos sobre los modelos 3D, si bien para la presente investigación se eligió el propio programa informático de los escáneres Artec Studio Profesional 15 debido a que dispone de herramientas de comparación y medición de alta precisión. Las unidades de medida que refleja el programa son en milímetros.

El análisis morfológico del modelo se llevó a cabo a través de diferentes mediciones y comparaciones. En primer lugar, se ejecutó un alineado preciso mediante el modo manual. Para ello, se establecieron un mínimo de tres puntos en común en cada una de las esculturas seleccionadas. La operación se efectuó con ayuda de la pestaña *alinear* y la herramienta *ajuste óptimo*.

En segundo lugar, una vez colocadas ambas esculturas en la misma ubicación y rotación, a través de la herramienta *X-Ray* disponible en el modo de visualización, se pudo analizar por transparencia los volúmenes de las mismas. Para identificar estos con claridad, se otorgó un color diferente a cada escultura. A continuación, se realizaron numerosas mediciones de distancias equivalentes entre las figuras con el fin de comprobar su coincidencia. En este proceso, se utilizó la herramienta *medida lineal* que está disponible en la pestaña *medidas*. Esta función permite determinar la distancia en línea recta que hay entre dos puntos ubicados manualmente en la zona deseada. Se tomaron medidas generales y de detalles de todas aquellas áreas que presentaban discrepancia entre un modelo y otro.

Para concluir el análisis morfológico, se procedió a analizar las dos superficies superpuestas mediante la herramienta *mapas de distancias*, que se encuentra disponible en la pestaña *medidas*. En este punto, el programa informático realiza los siguientes cálculos: distancia media absoluta, la desviación media absoluta y RMS (*Root Mean Square*, Media Cuadrática), que es la raíz cuadrada de la media aritmética de las distancias al cuadrado. Tras finalizar el cálculo, se manipuló un parámetro para obtener una información más precisa, en concreto, la *escala de error* (mm). Por defecto, al terminar el cálculo, este parámetro aparece al máximo con el mejor resultado. No obstante, se fue disminuyendo paulatinamente hasta 0.001 mm para ver las diferentes alturas de error durante el proceso de cálculo y comparación. En este punto, la escala de colores fue fundamental para obtener datos concluyentes.

Los colores del mapa están comprendidos entre el rojo, que representa una distancia positiva, y el azul, que corresponde a una distancia negativa. El color verde señala la separación entre la superficie cercana a cero y el color naranja indica la distancia que está por encima o por debajo de los valores límites de la escala. Con ayuda de esta herramienta milimétrica de alta precisión, se consiguió obtener los errores de desviación que presentaba un modelo frente a otro.

Para realizar un seguimiento del estado de conservación de la obra, se procedió a medir las alteraciones que afectan a la estabilidad estructural del conjunto, como son las fracturas, grietas y fisuras. Aquí se utilizaron las herramientas *medida geodésica* y la *medida lineal*, disponible en la pestaña de *medidas*. Las mediciones geodésicas consisten en calcular la distancia más corta entre dos o más puntos sobre la superficie del modelo escaneado. Se adaptan a la malla marcando su recorrido encima de las aristas situadas entre los vértices señalados. Esta opción permite una

adaptación perfecta sobre la superficie del modelo. A la hora de establecer los puntos necesarios para concluir la medida, resultó imprescindible reducir el número de polígonos de la malla, ya que, a partir de 15 millones de polígonos, el programa informático colapsaba durante los cálculos de mediciones. Con el fin de remediar este percance, se redujo la malla sin una pérdida evidente de calidad. Para ello, en la pestaña *herramientas* en *post-procesado,* mediante la opción *simplificación de malla rápida,* se logró desarrollar la operación. A la hora de señalar las mediciones fue muy útil trabajar en modo visión de malla *alámbrica más sólido*. Con ello, se pudo aplicar perfectamente la trayectoria de las mediciones geodésicas de cada alteración con precisión al lograr contemplar el volumen sólido y la malla con su trayectoria. Por último, se midió la separación de las fracturas y grietas mediante mediciones lineales tomadas en varios puntos.

3.5. Restauración virtual

Con el objetivo de analizar el alcance de determinados tratamientos de conservación-restauración sobre el aspecto final de los modelos artificiales didácticos seleccionados en este trabajo, se recurrió a la restauración virtual como herramienta de previsualización de los resultados. La disciplina de la restauración virtual presenta una enorme ventaja, ya que permite analizar la viabilidad y eficacia de diferentes tratamientos sin tocar o manipular directamente la pieza. Si bien son numerosas las aplicaciones desarrolladas hasta el momento sobre una gran cantidad de bienes culturales; sin embargo, estas herramientas requieren de estudios más detallados y rigurosos en lo referente al potencial que pueden tener en el modelo de toma de decisiones de cara a una intervención.

Se han utilizado los programas informáticos Adobe Substance 3D Painter y Blender. La combinación de ambos se fundamenta en las características y herramientas específicas que presentan para los tratamientos seleccionados. Como se ha comentado con anterioridad, Substance Painter es en la actualidad la herramienta más potente que existe enfocada a la pintura digital y está especializada en texturizado, por lo que es muy apropiada para proponer una limpieza virtual o llevar a cabo el tratamiento de reintegración cromática de lagunas. A pesar de que Blender también presenta ciertas herramientas de pintura y texturizado digital, estas son más limitadas, al tratarse de un programa informático enfocado más al modelado digital. De ahí que sea más adecuado su empleo cuando de lo que se trate sea resolver posibles tratamientos orientados a la anastilosis virtual o a reintegraciones volumétricas.

3.5.1. Anastilosis virtual

La anastilosis virtual se ha efectuado con el programa informático Blender. En el espacio de trabajo *layout*, una vez importados los modelos, se estableció el punto de pivote de cada uno de ellos en su centro de masas para así poder rotar la pieza sobre este. A continuación, se procedió por medio de diferentes desplazamientos y rotaciones en los ejes X, Y, Z al reposicionamiento de los fragmentos hasta lograr una correcta alineación entre ellos. La máxima precisión se consiguió activando el *snap*, orientado en vértices dado que esta opción permite realizar una perfecta unión entre las dos superficies de cada fragmento a unir.

3.5.2. Limpieza virtual

La limpieza es uno de los tratamientos de restauración más controvertidos, puesto que es un proceso irreversible y en muchas ocasiones implica decisiones complejas. Con el fin de disponer de un modelo virtual sobre el que plantear posibles soluciones que ayuden en la toma de decisiones, se recurrió al programa informático Adobe Substance 3D Painter.

Se midieron los valores RGB y HSV (*Hue, Saturation, Value*; Tono, Saturación, Valor) sobre la textura de color en modo *base color* mediante la herramienta de cuentagotas. Las zonas seleccionadas fueron áreas de la obra que presentaban una casuística diversa: acumulación de depósitos de suciedad, partículas atmosféricas adheridas a la superficie, degradación de la película filmógena por procesos de foto-oxidación o bien áreas carentes de barniz y de suciedad superficial.

Una vez finalizadas las mediciones, se procedió a realizar una prueba de limpieza sobre el modelo virtual obtenido. En primer lugar, se retiraron las partículas de suciedad superficial, a continuación, se actuó sobre las capas filmógenas oxidadas y, por último, se trabajó en las zonas repintadas. Esta operación se llevó a cabo con la ayuda de pinceles como *paint* y *clone*, que se aplicaron pintando a través de diferentes capas. Mediante el pincel *paint*, se efectuó prácticamente toda la limpieza tanto de la suciedad superficial como de las películas filmógenas. En este pincel se estableció un modo de fusión *overlay*. Con el objetivo de eliminar las áreas complejas de manera puntual, se recurrió a la herramienta *clone*. En la opción de modo de fusión, se seleccionó *passthrough*. Se tomaron como referencias de textura áreas muy cercanas a la zona a clonar. Respecto a los parámetros de opacidad fueron entre 40-60%, según las zonas requeridas.

Durante el proceso de ensayo, se realizó un seguimiento constante de los valores RGB y HSV con el fin de contrastar dichos parámetros con los valores obtenidos inicialmente de otras zonas carentes de suciedad superficial y/o películas filmógenas oxidadas. De esta forma, se obtuvieron los parámetros específicos a aplicar en cada zona determinada sobre los modelos científicos. La limpieza virtual solamente se puede llevar a cabo con este tipo de mediciones cuando la obra presenta áreas sin suciedad superficial o películas filmógenas, con el fin de poder compararlas con las zonas que se vaya a limpiar.

Para asegurar la precisión del proceso de limpieza, se recurrió a los modelos obtenidos con fluorescencia visible inducida por radiación UV, dado que estos posibilitan visualizar la existencia de las películas filmógenas oxidadas con mayor evidencia y pueden servir de orientación al restaurador.

3.5.3. Reintegración volumétrica virtual

Para la generación de volumen en las zonas perdidas del objeto, se utilizaron los espacios de trabajo *modeling* y *sculpting* en el programa informático Blender. La tarea se desarrolló mediante dos técnicas. La primera de ellas consistió en modelar la malla con *quads*; se partió de un único plano y se extruyó y adaptó este a la forma de la laguna a reintegrar. Se recurrió al *project individual elements*, en la herramienta *snap* en caras, con el fin de agilizar el proceso. La máxima precisión de la superficie de contacto del nuevo material con el de la obra, se logró mediante la herramienta *boolean*. Dicha opción permite tres tipos de aplicaciones. La primera es de *sustracción* y consiste en que las partes de un objeto secundario, que está introducido o solapado

con un objeto primario, sustrae la forma que ocupa en el volumen del fragmento inicial. La segunda es de *unión* y posibilita que dos o varios objetos se unan sin perder su volumen original, siendo eliminadas las partes superpuestas de los objetos. Y la tercera, de *intersección*, conserva solo el volumen que se superpone entre dos o más objetos, siendo las partes no superpuestas eliminadas (Fernández Ruiz, 2011, p.10). En este caso se ha recurrido a la opción *sustracción*.

Una vez finalizada la malla, la segunda técnica consistió en modelar los acabados superficiales a través de diferentes brochas de esculpido, tales como *draw*, *smooth* y *grab*s. Durante el proceso, se empleó la herramienta *dyntopo*, con la opción *constant* activada, y el modificador *multiresolution*. Ambas son funciones que permiten aumentar el número de polígonos de la malla y, con ello, conseguir una mayor resolución de esta, proceso imprescindible para reproducir fielmente las irregularidades de la superficie y lograr una gran similitud respecto a la textura original.

Por último, se procedió a calcular el volumen en los elementos modelados para determinar la cantidad de material que se necesitaría durante la intervención a través de un add-on (programa complementario para Blender), denominado *Mesh: 3D Print Toolbox.*

3.5.4. Reintegración cromática virtual

La reintegración cromática es un proceso con el que se concluye el ciclo de la restauración y tiene como objetivo principal recuperar, en la medida de lo posible, las calidades estéticas del objeto y favorecer la legibilidad. En ocasiones, con el fin de evitar posibles pruebas y un exceso de manipulaciones sobre la obra real, resulta de gran ayuda disponer de un modelo virtual sobre el que realizar los tratamientos y determinar tanto el grado de intervención como la técnica de reintegración cromática que mejor se adapte a cada caso concreto.

Para ello, se trabajó en el programa informático Adobe Substance 3D Painter directamente sobre la textura de color fotogramétrica y sobre la textura de los materiales aplicados durante la fase de reintegración volumétrica en los fragmentos faltantes, tales como fracturas, grietas, fisuras o elementos de pequeño tamaño.

La reintegración se llevó a cabo mediante la herramienta *paint*. Se probaron varias formas del trazo con los pinceles de tipo *kyle*, en concreto, se eligieron aquellos del número 28, 30, 53, 57, 58 y 71, con la intención de encontrar la mejor opción entre las técnicas de reintegración correspondientes al puntillismo y a la selección cromática. La aplicación del color se llevó a cabo, en primer lugar, mediante los colores primarios, cian, magenta y amarillo, basados en la síntesis sustractiva similar al modelo CMYK (*Cyan, Magenta, Yellow y Black*, Cian, Magenta, Amarillo y Negro) y, en segundo lugar, los secundarios derivados de los mismos azul, rojo y verde. Se realizaron diversas pruebas en varias maquetas virtuales donde se utilizaron texturas de material que simularán la cera con el fin de hallar el método de aplicación más adecuado. Para que los colores actuasen de manera sustractiva, se seleccionó en cada pincel el modo de fusión *overlay*. En cuanto a la opacidad del pincel, se manipuló de 40 al 90%, según se ha precisado en cada laguna para lograr los resultados deseados.

3.6. Diseño de moldes y estructuras auxiliares mediante el modelado digital

3.6.1. Modelado digital de los moldes

Durante el diseño de cada molde se precisó de un análisis detallado respecto a la construcción y volumen de las piezas, con el fin de que tanto el proceso de desmontaje como la extracción del positivo se llevarán a cabo con la mayor facilidad. Asimismo, se examinó de modo minucioso la ubicación de todas las llaves necesarias para asegurar un encaje perfecto en cada una de las piezas que conforman el molde.

A partir de los modelos escaneados, dentro del programa informático Blender, en el espacio de trabajo *layout* en modo *modeling*, se fue modelando la forma de cada molde partiendo de diferentes cubos. Estos se modificaron en cuanto al número de polígonos según se requirió en cada caso. Mediante los desplazamientos de los vértices en los ejes X, Y, Z se dio forma al prototipado de las piezas. Para el modelado se recurrió a diferentes herramientas como *bevel, loop cut o knife*, que posibilitaron obtener todos los acabados deseados. Con el fin de lograr la máxima precisión fue esencial utilizar el *snap* orientado en vértices, dado que esta opción permite realizar una perfecta unión entre las dos superficies de cada fragmento a unir. En cuanto a la precisión en las piezas que componen los moldes, se empleó la herramienta *boolean* con la opción de *sustracción*. Con ello, se logró plasmar la parte elegida de manera negativa y se obtuvo así el molde de los fragmentos. Con la misma herramienta se crearon las diferentes llaves necesarias para que cada fragmento del modelo encajase perfectamente en su lugar y también se hizo el orificio que servirá a la hora de realizar la colada del material de cera.

Dependiendo de los fragmentos a reproducir, el molde puede ser más sencillo o complejo. En los fragmentos más pequeños, inferiores a 5 cm y con una volumetría sencilla, el molde se dividió en dos piezas. Sin embargo, para aquellas piezas cuyas dimensiones son superiores a los 5 cm, que presentan volumetrías más complejas, los moldes se efectuaron de 9 a 14 piezas.

3.6.2. Modelado digital de las estructuras auxiliares

Las estructuras auxiliares hacen referencia a un soporte especializado para sustentar los fragmentos durante la operación de adhesión. A la hora de diseñarlas se tuvieron en cuenta diversos aspectos. El primero, fue la funcionalidad y compatibilidad con la naturaleza delicada y frágil del material ceroso. El segundo, se refiere al peso de los fragmentos y, por último, el tercero se centra en la disposición de las fracturas y grietas, presentes en la mayoría de las superficies a unir con una posición horizontal y, por tanto, perpendicular a la fuerza de gravedad.

Para dar volumen a las estructuras necesarias, se fue modelando en el programa Blender a partir de diferentes cubos, esferas y cilindros. Se recurrió a las mismas herramientas utilizadas en el apartado anterior, como *bevel, loop cut o knife*. La malla en *quads* de cada elemento geométrico se adaptó a la forma necesaria para su funcionamiento, extruyendo y moviendo los vértices en los tres ejes cartesianos. Aparte de trabajar en el espacio *modeling* prácticamente todas las piezas, también se recurrió al espacio de trabajo *sculpting* para el modelado orgánico en casos concretos. Con ello, se logró adaptar de modo exacto la malla al volumen necesario de cada pieza. De nuevo, la herramienta determinante en esta operación resultó ser *boolean*, pues mediante las opciones de *sustracción*, *unión* e *intersección* se logró un modelado de alta precisión para el diseño de piezas

complejas. Esto permitió un encaje perfecto de cada una de las piezas que conforman la estructura auxiliar.

3.7. Difusión de los modelos anatómicos científicos

3.7.1. Fotorrealismo y renderizado 2D

Los modelos científicos digitalizados han requerido de espacios lumínicos concretos durante la toma de datos con el fin de evitar registrar los numerosos brillos que presentan sus superficies a causa de las películas filmógenas. En las texturas fotogramétricas obtenidas, a pesar de lograr un gran realismo, el modelo no conserva las características físicas de los materiales, en cuanto al índice de reflexión, refracción, rugosidad y transparencia. Dado que se precisa lograr el máximo rigor en el modelo virtual para una correcta documentación, se hace imprescindible poner de relieve la importancia del fotorrealismo y sus bases para alcanzarlo. El fotorrealismo es un medio diferente a la fotografía, que persigue conseguir resultados realistas. Sus principios se basan en el perfecto control del modelado, materiales, iluminación y el renderizado (Cardoso, 2013), siendo los materiales y la iluminación los aspectos que cobran mayor relevancia a la hora de lograr imágenes fotorrealistas (Birn, 2014; Yot, 2020). Es preciso conseguir un equilibrio entre estos dos principios basados en referencias reales del objeto y su entorno a través de la observación in situ.

En el caso de los modelos científicos, para ser más exactos, el fotorrealismo depende del modelo digitalizado (malla y textura colorimétrica), de los materiales aplicados sobre el mismo (texturas artificiales PBR), de la iluminación del entorno (estudio fotográfico) y del renderizado (fotografía virtual). El modelo digitalizado influirá en dos aspectos principalmente. El primero será la calidad de la malla, teniendo en cuenta que, a mayor precisión, mayor grado del realismo volumétrico se obtendrá. Por otro lado, la textura de color dependerá en gran medida del volumen alcanzado y de las condiciones lumínicas aplicadas durante su digitalización. Si obtenemos errores en la malla, estos se verán reflejados en la textura de color. Asimismo, si no hemos aplicado una correcta iluminación durante la captura, obtendremos una textura que se aleja del objeto real y, por tanto, del fotorrealismo. Los materiales constitutivos de cada obra, con sus respectivos índices de refracción, los diferentes matices de los materiales, junto con las huellas del paso del tiempo, requieren de un equilibrio entre las formas, las proporciones, la intensidad, el color, la iluminación, las sombras y los materiales. Todo ello va a garantizar el realismo con la mayor exactitud. La adecuada utilización de cada uno de ellos potencia enormemente los resultados, pero han de ser empleados con cautela para no sobrepasar los valores reales. De entre todos los principios planteados, la ciencia de la luz a la hora de documentar los artefactos científicos es, sin duda, uno de los aspectos más importantes, pues sin ella no podemos ver.

Pese a la rápida y constante evolución de los programas informáticos de renderizado, hoy en día estos todavía no permiten obtener un realismo al 100%, pero sí resultados muy cercanos a la realidad.

Con el fin de lograr los acabados más realistas en función de las propiedades físicas de los materiales originales y de las interacciones con la luz, tratando de simular el comportamiento real, se recurrió a las texturas artificiales PBR. Dichas texturas recogen las imperfecciones de las

superficies de los modelos, calculando la cantidad de luz que se refleja y las sombras. Las texturas PBR que se utilizaron fueron las siguientes: *base color, height, normal, roughness* y *specular*. *Base color* integra la información cromática de todas las imágenes empleadas en la fotogrametría en una única textura. *Height* realiza desplazamientos de los vértices y, con ello, crea sombras más reales. Los parámetros de esta textura se manipularon de modo mínimo, ya que la superficie se ve deformada rápidamente con valores bajos. La textura *normal* produce un efecto de relieve generados por los ejes X, Y y Z con una gran precisión y detalle. En cuanto a *roughness*, refleja la difusión de la luz sobre una superficie, resaltando los detalles más minuciosos como las huellas o el polvo de cada textura. Por último, *specular* regula la cantidad de brillo sobre la superficie haciéndola más o menos especular. En las texturas *normal, roughness* y *specular*, se establecieron parámetros medios, ya que con niveles altos los relieves, detalles y brillos se marcaban en exceso, alejándose de los valores reales del modelo. Las diferentes texturas se trabajaron en el programa informático Adobe Substance 3D Sampler y se ajustaron los parámetros necesarios de cada una según las características de la obra. Finalmente, se exportaron en formato PNG. Cabe resaltar que estas texturas se obtienen mediante diversos algoritmos, que establecen qué zonas van a tener más o menos relieve o cuáles tendrán mayor o menor brillo. Pese a que no logra reflejar con la máxima fidelidad la apariencia física del objeto, estos recursos ofrecen una gran aproximación que puede ser útil para mejorar los resultados de cara a la difusión.

En cuanto a los renderizados en 2D, se obtuvieron a través del programa informático Blender. Para obtener un acabado fotorrealista, en primer lugar, se configuraron los materiales de los modelos, aplicando las diferentes texturas PBR generadas *base color, height, normal, roughness* y *specular* en cada modelo. Para ello, una vez importado el modelo en Blender, dentro del espacio de trabajo *shading*, se procedió a insertar cada una de ellas a través de nodos como *image trexture*. En el caso de *base color, roughness* y *specular* se unieron al nodo *principled BSDF* en sus puntos correspondientes. La imagen *normal* se unió primero al nodo *normal map* y, a continuación, al nodo *principled BSDF* en su correspondiente canal. Por último, *height* se unió mediante un nodo *displacement* y después directamente al nodo de salida del material.

Por otra parte, un parámetro fundamental que se estableció fue el IOR (*Index of Refraction*, Índice de Refracción). Dada la falta de información sobre el valor en las películas de recubrimiento degradadas que presentaban la mayoría de las obras analizadas, se eligió un IOR cercano al de la trementina 1.472 (Pixel and Poly Design y Creative Services, 2021). Se tomó como referente este parámetro, ya que su aplicación en una obra produce acabados similares.

Una vez configurados los materiales, se creó un estudio fotográfico virtual, compuesto por un fondo, diversas fuentes de luz y la cámara fotográfica virtual. El fondo se diseñó con una forma curva aplicándole un material de color gris al 70%. Los valores de los canales *specular* y *toughness* del material se redujeron a cero para que no influyeran los reflejos de la luz sobre el objeto. Respecto a las fuentes de iluminación, se recurrió a dos tipos de focos estilo *área y spot*. La elección del tipo *área* se fundamenta en que, al ser una luz emitida por una superficie cuadrada, produce sombras muy suaves en los bordes de los modelos cuando su área es amplia. Respecto al tipo *spot*, aunque es muy similar al tipo anterior permite un mayor control del área de penumbra. Ambas proporcionan mayor credibilidad y realismo a los renders. Se emplearon cinco luces tipo *área* ubicadas, una en la parte frontal con una potencia de 400W, y dos en los laterales a 45º con una potencia de 100W. Estas tres fuentes disponen de un formato cuadrado, mientras que el cuarto

foco ubicado en la parte frontal en picado con un ángulo de 40º cuya potencia fue de 200W es rectangular. El último foco también presenta una forma rectangular y se utilizó de forma puntual en la parte posterior con un ángulo de 30º a una potencia de 300W. A todas ellas, se les estableció una dirección de enfoque en el punto central de la obra a una distancia de 3.5 metros. Además, se emplearon dos fuentes de luz tipo *spot* con una potencia de 150W en el caso de la primera y 300W en el caso de la segunda. Estas se ubicaron a una distancia de un metro respecto al modelo y se fueron manipulando por el espacio según los detalles y acabados que se quiso mostrar. En cuanto a la temperatura de color establecida en cada una de las lámparas, esta fue de 6000ºK con el fin de lograr la mejor calidad y precisión en la representación del color.

Respecto a la cámara fotográfica virtual, se utilizó una configuración similar a una cámara real. Se fijó en el panel de *lente* un tipo de visión *perspectiva* y una distancia focal de 50 mm. En la *cámara* se estableció una posición del sensor horizontal *full frame* 35mm. Un último parámetro que se manipuló fue la PDC según en base a los resultados necesarios. Se colocaron varias cámaras en diferentes posiciones según el interés en cada modelo y se manejó la apertura de la cámara, junto con la distancia de enfoque hasta lograr los resultados deseados.

Por último, tras configurar todos los materiales, luces y parámetros de la cámara, se realizaron los renders. Para ello, se seleccionó el motor *cycles* y en las características del *render* se estableció el valor de *samples en 128* y se eligió una resolución de 8192 x 8192 píxeles en formato TIFF. Asimismo, para reducir el ruido de la imagen se activó la opción *denoising*.

3.7.2. Retopología y generación de mapas de textura en los modelos 3D

Los modelos obtenidos mediante la fotogrametría o el escaneado presentan mallas muy densas y complejas. Son mallas de triángulos que ofrecen mayor calidad debido a la versatilidad de los tres vértices de cada cara en comparación con las mallas en *quads* de cuatro vértices. Dada la complejidad geométrica de las mallas triangulares, al intentar optimizarlas, el proceso resultó complejo, ya que durante el mapeado UV no se pudieron seleccionar grupos de aristas más o menos rectas, de manera que el proceso del corte de la malla fuera relativamente rápido y fácil. Por ese motivo, se realizó una retopología del modelo utilizando *quads*.

El sistema de *quads* posee una notable ventaja en cuanto a la distribución de los polígonos pues los dispone de forma más ordenada y siguiendo las direcciones principales de los relieves y oquedades del objeto. De este modo, en regiones con una geometría intrincada, permite reducir el número de polígonos de forma más eficaz. Además, facilita el proceso del mapeado UV.

A tal efecto, en primer lugar, se realizó una retopología automática de la malla mediante el programa informático ZBrush. Si bien existen varios programas informáticos que permiten esta opción, la herramienta *Zremesher* disponible en el panel de control *geometría* de ZBrush, destaca enormemente por su potencial y calidad en este proceso. Dentro de la herramienta mencionada, se aplicó una carga poligonal de 20 millones. En cuanto al tamaño y la fuerza de la curva, se dejaron por defecto en 50. Dependiendo de las características y volúmenes del modelo, se debe tener en cuenta que, durante la retopología, la malla no tiene que perder mucha calidad en la forma y detalles superficiales, ya que en fases posteriores del trabajo los resultados se verán alterados. Por ello, hay que tener un equilibrio entre la reducción de polígonos y la calidad de los detalles del modelo.

Al modificar la malla, la textura de color ya no concuerda sobre ella. Para solventar este problema, se llevó a cabo la *generación de mapas de textura*. Con el objetivo de que la nueva malla herede la textura original, se recurrió al programa informático Blender. El proceso consistió en superponer los dos modelos, el original con la malla formada por triángulos y la textura de color, y el nuevo modelo con la malla de *quads,* hasta coincidir perfectamente uno sobre el otro. Este proceso es automático si no se han manipulado las coordenadas del modelo exportado. Si se han modificado es importante recurrir a las funciones *copy location y copy scale* para ajustar la posición y escala exacta del objeto principal. Este factor es determinante para que la nueva textura se proyecte con precisión. Cualquier imperfección dimensional en la nueva malla respecto al modelo original afectará a la proyección de la textura desde un modelo al otro. El siguiente paso consistió en crear una nueva textura de imagen para el modelo de *quads* en el espacio de *UV editing*. Se realizaron varios cortes en la malla con la herramienta *mark seam* para elaborar el mapeado UV. Posteriormente, y con la finalidad de desplegar la malla con los cortes realizados se aplicó un *unwrap*. Para que la textura original se plasmase sobre la nueva creada, se tuvo que conectar esta última en el espacio *shading* mediante un nodo *image texture* del propio material *principled BSDF* de la malla en *quads*. A continuación, el siguiente paso consistió en ejecutar la *generación de mapas de textura*. Para ello, se seleccionaron los dos modelos, primero el original con la malla formada por triángulos y la textura de color, y después el segundo con la malla de *quads*. Con el motor de renderizado en opción *cycles,* en la pestaña de *bake,* se optó por el modo *diffuse* y con los modelos previamente seleccionados, se procedió a *mapear* la textura original sobre la nueva malla de *quads*.

Por último, con el fin de lograr el máximo realismo posible en el modelo 3D para difundirlo mediante plataformas web, se aplicaron las texturas PBR, *height, normal, roughness* y *specular*.

3.8. Caracterización de materiales de impresión 3D para la fabricación de moldes y obtención de positivos

En el marco del estudio abordado en la tesis doctoral, según los objetivos planteados para lograr la máxima precisión, calidad y fidelidad en la obtención de moldes y positivos en cera, se procedió a caracterizar diversos materiales de impresión a través de las técnicas FDM y LFS, así como la obtención de figuras por mecanizado CNC. La finalidad era obtener partes faltantes de una reintegración volumétrica o crear facsímiles idénticos al artefacto científico con los que ensayar diversos tratamientos que sirvieran de orientación para la posterior intervención sobre la obra real.

3.8.1. Características de las impresoras 3D aditivas y su empleo

3.8.1.1. Impresión 3D FDM

La impresora FDM escogida fue Ultimaker S5, de la empresa Ultimaker (figura 56). La utilización de dicha máquina se fundamenta, en primer lugar, en su gran precisión, con una resolución de capa de hasta 20 µm (0.02 mm) en el eje Z y de 6,9 µm (0,0069 mm) en los ejes X-Y, lo que permite alcanzar una altísima precisión en relación con el modelo original a reproducir. Además, cuenta con una velocidad de impresión > 24 mm3/s. El diámetro de cada filamento es de 2,85 mm y el del *nozzle,* boquilla extrusora, utilizado es de 0,4 mm, de modo que se puede

aplicar una temperatura de entre 180-280ºC. Respecto a la placa de impresión, esta es de cristal calefactado, con una temperatura comprendida entre los 20ºC y los 140ºC, lo que proporciona un gran abanico de posibilidades para trabajar con distintos materiales, según se precise para cada caso.

En segundo lugar, ofrece una impresión de extrusión doble con un mecanismo automático tipo *bowden*. El sistema consiste en presionar un filamento termoplástico a través del alimentador hasta el *hotend*, fusor del extrusor mediante un tubo. De esta manera permite depositar el hilo sobre la plataforma de impresión en sucesivas capas mediante los tres ejes cartesianos. El sistema *bowden* reduce de modo considerable las inercias de los movimientos y logra altas calidades en la fusión de cada capa. El empleo de doble cabezal facilita la impresión de zonas complejas al ser capaces de imprimir de modo simultáneo con dos materiales. De forma habitual, se utiliza un tipo de filamento resistente para la construcción del objeto, por ejemplo, ABS o PLA, entre más de doscientos tipos de materiales, y otro más frágil para los soportes necesarios en áreas complejas como el PVA (*Polyvinyl Alcohol*, Alcohol de Polivinilo). Este último puede ser eliminado con mucha facilidad mecánicamente o mediante el uso de agua. De lo contrario, con una impresora convencional de un solo extrusor, dichos soportes serían muy complicados de retirar, sin alterar la zona de contacto. La tecnología empleada FFF (*Fused Filament Fabrication*, Fabricación de Filamento Fundido), y el gran volumen de impresión que proporciona 330 x 240 x 300 mm, ofrece múltiples posibilidades de trabajo.

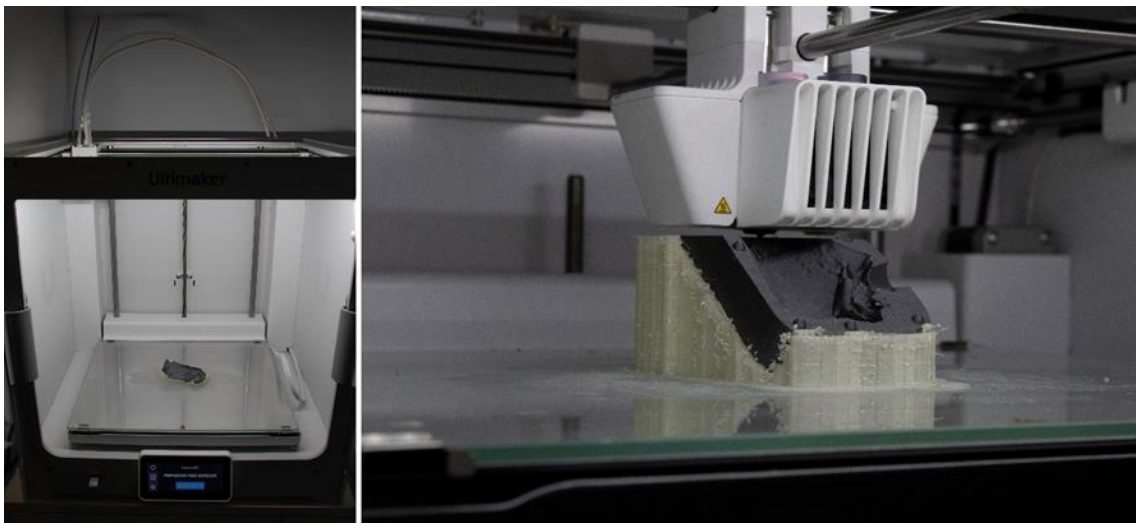


Figura 56. Impresora Ultimaker S5. © Emanuel Sterp Moga.

Aparte de lo ya expuesto, la impresora Ultimaker S5 presenta una serie de características que garantizan su fiabilidad frente a otras, ya que casi todos los procesos de preparación y mantenimiento son automatizados. Entre ellas, se encuentra el sistema de nivelación, un alimentador de material con doble motor, o un novedoso método de ventilación que aseguran la precisión, seguridad y calidad de los resultados. Además de las particularidades comentadas, la carga del material también es automática, pues solamente hay que insertar el filamento en el alimentador y mediante las operaciones de carga, el filamento es conducido al *hotend* hasta completar su extrusión. Todos los procesos se gestionaron de manera muy sencilla desde el *firmware* de la máquina. Estas características fueron determinantes para seleccionar la impresora, puesto que el objetivo planteado es lograr la una alta calidad, precisión y resistencia en las figuras.

Para asegurar siempre unos resultados óptimos fue imprescindible realizar de manera periódica la calibración de la plataforma de impresión, de los desplazamientos XY y del conmutador de elevación. La calibración de dicha plataforma se estimó necesaria para lograr una adecuada adherencia, pues con el paso del tiempo se va separando ligeramente de la punta del *nozzle*, y esto dificulta una buena adhesión en la impresión. Por el contrario, si está muy cerca puede que se obstruya el cabezal y no imprima. La impresora Ultimaker S5 presenta dos opciones de calibración (activa y manual). En este trabajo se utilizó siempre la activa. Respecto a la calibración de los desplazamientos XY, fueron necesarios cada vez que se cambió la composición de los materiales. Para ello, se utilizó una hoja de calibración. Por otro lado, la calibración del conmutador de elevación fue necesaria, ya que se trabajó constantemente con los dos extrusores.

Finalmente, para la adhesión de las figuras en la plataforma de impresión se empleó un pegamento de barra tipo UHU *stic*, recomendado por los fabricantes de la impresora Ultimaker S5.

3.8.1.2. Impresión 3D LFS

Dentro de las técnicas de impresión SLA, se recurrió al método avanzado LFS, en concreto, a la máquina Form 2 de la empresa Formlabs (figura 57). Dicha impresora presenta una precisión de altura mínima de 25 µm (0.025 mm) (dependiendo del material a utilizar) y 145 µm (0.145 mm) en los ejes XY, lo que ofrece una altísima calidad tanto en objetos pequeños como medianos. Cuenta con un volumen máximo de impresión de 145 × 145 × 175 cm^3, que permite obtener piezas con unas dimensiones considerables para este tipo de impresión. Por otro lado, dispone de un láser Diodo-Violeta de 250 mW, encargado de polimerizar el material por capas. Respecto al tamaño del punto láser, es de 140 µm (0.0055 pulgadas), con una longitud de onda de 405 nm. Dado que el haz del láser es dañino para la visión humana, la impresora cuenta con una protección, un cristal naranja, evitando que salgan las ondas ultravioletas.

En cuanto a la operatividad, es una impresora totalmente automatizada, que tiene un cartucho de resina insertado en la máquina y ella misma de manera automática suministra la cantidad necesaria del material en el tanque de impresión. A lo largo del trabajo, gracias a su diseño y calidad, prácticamente no genera ningún fallo ni errores en la impresión. Respecto a la temperatura del tanque, mantiene la resina durante la sesión de trabajo a 30ºC. Estas características la convierten en una máquina profesional enfocada a lograr resultados de altísima calidad y fidelidad y, por ello, se consideró apropiada para su caracterización.

Respecto a la calibración del equipo y con el fin de evitar posibles imprecisiones dimensionales, de manera periódica se ajustó en forma automática mediante la opción Z *fine tuning* y X-Y *fine tuning*.



Figura 57. Impresora Form 2. © Emanuel Sterp Moga.

3.8.2. Características y uso de la máquina sustractiva: Mecanizado CNC

Dentro de las máquinas de fresado CNC, se recurrió a la fresadora de sobremesa MonoFab SRM-20, de la empresa Roland (figura 58). Aunque no es uno de los aparatos que permita mayor volumen de trabajo (Recorrido operativo en ejes: X 203,2 mm, Y 152,4 mm y Z 60,5 mm); sin embargo, se trata de una herramienta que ofrece acabados de alta precisión en una gran gama de materiales (espumas, yeso, madera, papel maché, poliacetato, acrílico, cera, etc.). Quizás su mayor limitación es el espacio de trabajo en el eje Z, si bien para el fin propuesto, enfocado a obtener pequeños volúmenes de las reintegraciones volumétricas, esta máquina cumple las necesidades requeridas.

El aspecto de este dispositivo que más destaca frente a otras máquinas de estas características técnicas está relacionado con el tipo de fresado, ya que cuenta con un motor por impulsos (modelo CC 380), con lo que se garantiza una óptima eficiencia, con unos contornos precisos y de alto detalle. Por otro lado, la velocidad de rotación también es una característica a considerar en esta máquina, ya que alcanza las 7000 rpm (revoluciones por minuto), por lo que es capaz de ofrecer unos acabados extremadamente limpios y precisos, que dependerán del material y la fresa utilizada.

Asimismo, hay que mencionar que la máquina permite alojar sobre su base de trabajo materiales con un peso máximo de 2 kg, lo que favorece la obtención de piezas más grandes y pesadas. Respecto a la operatividad y manejo, es prácticamente automatizada, salvo la colocación de la fresa. Ofrece un trabajo sencillo sin errores o problemas durante la sesión de fresado.

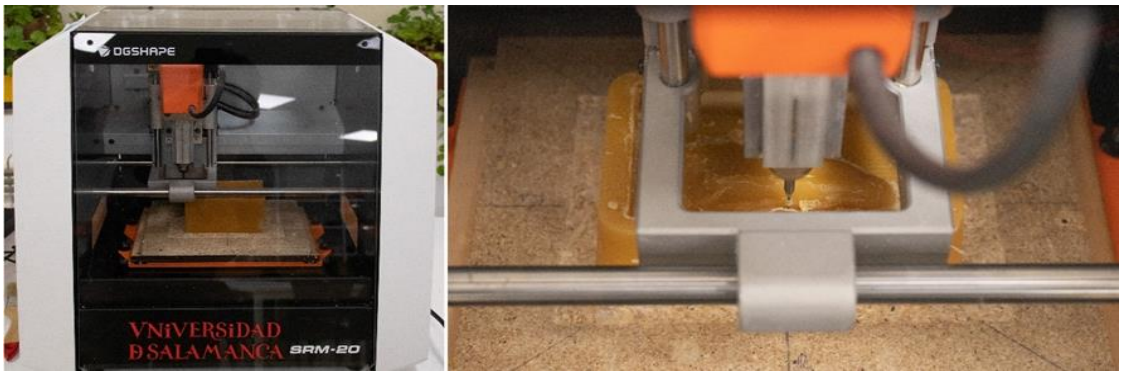


Figura 58. Máquina de fresado MonoFab SRM-20. © Emanuel Sterp Moga.

3.8.3. Configuración de la impresión 3D aditiva: análisis de los materiales y posiciones de fabricación para la obtención de moldes

3.8.3.1. Impresión 3D FDM

Los moldes por imprimir en formato STL (*Standard Triangle Language*, Lenguaje Triangular Estándar) se importaron en el programa informático de libre acceso Ultimaker Cura. Para el ajuste de la impresión se utilizó la versión 4.10.

El programa dispone de numerosas herramientas con el fin de establecer la impresión deseada. En primer lugar, previamente a los ajustes de cada pieza, en la pestaña de configuración de la impresora se seleccionó la máquina Ultimaker S5. A continuación, en la ventana de visualización *preparar*, con el fin de orientar los fragmentos en la posición deseada para sacar el máximo rendimiento y calidad en la impresión, se recurrió a las herramientas de mover y rotar de manera manual disponibles en la pestaña de control.

Posteriormente, en la sección de materiales en cada extrusor se estableció el material deseado. En el primero, se fijó el material para la construcción del objeto y, en el segundo, para los soportes de refuerzo, el PVA. En el caso del ensayo de los moldes, se seleccionaron catorce materiales con el fin de analizar detalladamente las calidades que prestan cada uno de ellos. Entre los más conocidos destaca el SMARTFIL® PLA (a partir de ahora PLA), SMARTFIL® ABS (a partir de ahora ABS) o SMARTFIL® PETG (Polyethylene Terephthalate, Tereftalato de Polietileno) (a partir de ahora PETG). Otros materiales que se consideraron interesantes fueron SMARTFIL® ASA (*Acrylonitrile Styrene Acrylate*, Acrilonitrilo Acrilato de Estireno) (a partir de ahora ASA), INNOVATEFIL® NYLSTRONG (*Polyamide with Fiber Glass*, Poliamida con Fibra de Vidrio) (a partir de ahora NYLSTRONG), SMARTFIL® HIPS (*Polystyrene and Polybutadiene Rubber*, Poliestireno y Caucho de Polibutadieno) (a partir de ahora HIPS), INNOVATEFIL® POLYCARBONATE (*Polycarbonate*, Policarbonato) (a partir de ahora POLYCARBONATE), INNOVATEFIL® PP (*Polypropylene*, Polipropileno) (a partir de ahora PP), SMARTFIL® PLA 3D870 (a partir de ahora PLA 3D870), INNOVATEFIL® PA HT (*Polyamide*, Poliamida) (a partir de ahora PA HT), ULTIMAKER® PLA Tough (a partir de ahora PLA Tough), ULTIMAKER® TPU 95A (*Thermoplastic Polyurethane*, Poliuretano Termoplástico) (a partir de ahora TPU 95A), SMARTFIL® FLEX 93A (*Polyurethane*, Poliuretano) (a partir de ahora FLEX 93A) y ULTIMAKER® PVA (a partir de ahora PVA). Prácticamente, todos los materiales se suministraron por la empresa Smart Materials 3D, salvo el PLA Tough, TPU 95A Y PVA que fueron proporcionados por la empresa Ultimaker.

El siguiente paso consistió en configurar los ajustes de impresión del primer extrusor. Para ello y en todos los casos se estableció un grosor en las paredes de 1.5 con un patrón de relleno tipo *rejilla* y un patrón de adherencia a la plataforma de impresión tipo *balsa*. Todas las demás características que difieren según el material se recogen en la tabla 1. Por último, se activaron las opciones dentro de la pestaña de ajuste de impresión del desplazamiento mediante la habilitación de la *retracción*, la *refrigeración* y la *adherencia a la placa de impresión*. Para esta última opción, se seleccionó en el segundo extrusor un patrón tipo *borde* con el fin de asegurar mejor la adhesión de la pieza. En el material PVA, se estableció una altura de capa de 0.1, una densidad de relleno del 50% con un patrón tipo *triángulos* y un grosor de 1.3 mm en la pared.

Debido a la constante impresión con la doble extrusión, se activó siempre la opción de la *torre auxiliar* para asegurar la máxima precisión de la extrusión de ambos materiales sobre la figura.

Material de impresión	Densidad del material g/cm3	Altura de capa	Velocidad de impresión mm/s	Temperatura de impresión	Temperatura en la plataforma de impresión
ABS	1.04	0.06	50	240ºC	85ºC
PLA Tough	1.22	0.06	50	210ºC	60ºC
PLA	1.24	0.06	50	215ºC	60ºC
INNOVATEL PA HT	1.20	0.06	50	270ºC	90ºC
HIPS	1.05	0.06	50	240ºC	90ºC
PP	0.90	0.1	25	225ºC	80ºC
TPU 95A	1.22	0.1	25	225ºC	60ºC
FLEX 93A	1.21	0.1	25	230ºC	60ºC
PETG	1.27	0.06	50	240ºC	80ºC
PLA 3D870	1.22	0.06	50	220ºC	60ºC
ASA	1.07	0.06	50	250ºC	100ºC
INNOVATEL POLYCARBONATE	1.20	0.06	50	260ºC	100ºC
PVA	1.23	0.06	50	215ºC	60ºC
NYLSTRONG	1.58	0.06	50	260ºC	100ºC

Tabla 1. Materiales y características de impresión 3D. © Emanuel Sterp Moga.

En la ventana de visualización *vista previa* se analizó el proceso de impresión por laminación mediante la herramienta *nivelación*. Una vez finalizada la configuración, con el fin de obtener más seguridad durante las numerosas horas de impresión, estos archivos se guardaron en formato (*.ufp), puesto que almacena todos los parámetros establecidos en el programa. A continuación, se copió en un USB y se procedió a realizar cada impresión con el puerto USB que presenta la máquina, para prescindir del ordenador, ya que cualquier imprevisto de actualización o apagón provocaría la cancelación de la impresión.

Concluida la configuración de la impresión de los moldes, se establecieron diferentes análisis cualitativos. En este sentido, se aplicó un método empírico consistente en la observación directa acerca de diferentes posiciones y ángulos de impresión, así como en la calidad de los acabados.

La calidad de impresión FDM depende principalmente de tres factores. El primero, es la resolución de impresión, cuanto menor sea este, mayor calidad se obtendrá. El segundo, es la orientación. La impresora al trabajar con los tres ejes cartesianos X, Y, Z, siendo el eje X los desplazamientos hacia delante y hacia atrás, el eje Y en dirección a la derecha y a la izquierda, y el eje Z hacia arriba y abajo, según la orientación que elijamos, se obtendrán unos resultados u otros. El último factor que influirá en la calidad de la impresión es el tipo de material, pues no todos ofrecen los mismos acabados y precisión.

Los ensayos de los catorce materiales seleccionados se llevaron a cabo en dos fases. La primera se centró en hallar la mejor orientación y ángulo de impresión. Para ello, se imprimieron seis moldes idénticos en PLA, tres en posición horizontal según su eje principal y con su base orientada en diferentes ángulos a 0º, 45º y 90º respecto a la plataforma de impresión, y tres en vertical con los mismos ángulos (figura 59). Una vez concluido el análisis de la orientación y el ángulo más adecuado, se ensayaron los otros trece materiales en la posición que mejores resultados habían dado en la fase anterior.

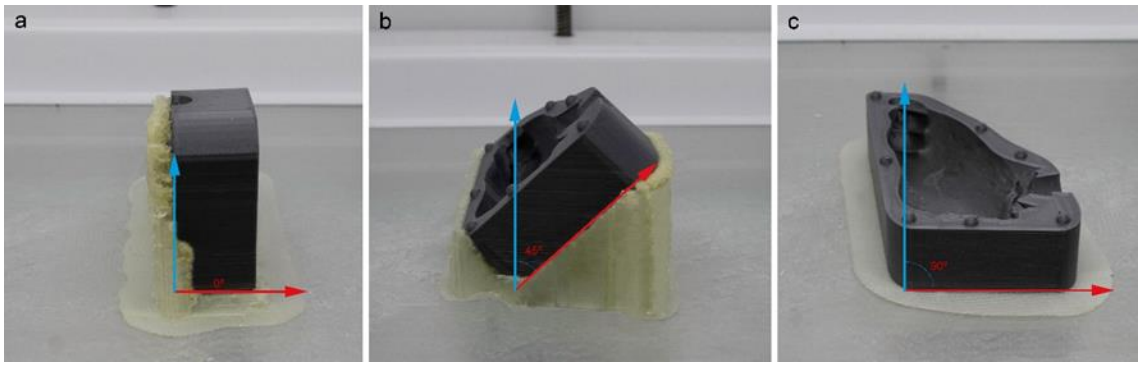


Figura 59. Posición de los moldes en horizontal según su eje principal y con su base en diferentes ángulos respecto a la plataforma de impresión. a) 0º. b) 45º. c) 90º. © Emanuel Sterp Moga.

Tras haber concluido las impresiones, se procedió a analizar la calidad de cada uno de los moldes mediante el microscopio digital tipo Dino-Lite. En algunos materiales, debido a su color blanco y negro, resultó realmente difícil analizar con detalle los resultados, por lo que se aplicó una veladura de un esmalte oscuro en caso de los moldes blancos y rojizo en el de los moldes negros. Se exploraron los detalles de la impresión para analizar errores, impurezas y las líneas del filamento depositadas. Además, se procedió a efectuar el positivo en cera de cada uno de los moldes con el fin de analizar con mayor detalle los acabados superficiales que proporcionaban todos ellos. En este punto, se examinaron diferentes aplicaciones de la cera sobre el molde mediante el pincelado y el vertido. También se realizaron pruebas empleando una capa de vaselina y sin ella, para evaluar la facilidad de extracción del positivo y los detalles de los acabados superficiales que ofrecen todas ellos. En cada uno de los moldes se ejecutaron 5 pruebas para corroborar la eficacia y detalles del positivo. El material ceroso utilizado está compuesto por 6 partes de cera de abejas, 1 parte de manteca de cerdo y 3 partes de trementina de Venecia, tal como es descrito por el primer disector anatómico del gabinete madrileño (Bonells & Lacaba, 1800, p.500). Los positivos obtenidos también se exploraron con el microscopio digital.

3.8.3.2. Impresión 3D LFS

Los moldes para imprimir en formato STL se insertaron en el programa informático PreForm 3.28.0 de la empresa Formlabs, donde se seleccionó el material de resina de entre las múltiples opciones que permite la máquina y el grosor de capa (100, 50, o 25 µm). Esta última dependerá sobre todo de las características de la resina a utilizar.

El potencial del programa informático se notó nada más insertar el modelo a imprimir, pues este programa detecta directamente si el objeto presenta errores en la malla, procediendo a repararla con el fin de que la impresión salga perfecta. Además, establece una primera orientación en la que asegura la mejor calidad de impresión según el volumen y forma de cada figura, resaltando las áreas que se verán ligeramente alteradas. También dispone de un sistema manual para rotar y desplazar el objeto según las necesidades requeridas. Finalizada la orientación, informa con una escala de colores de rojo (no apto) a azul (apto) acerca de la necesidad de colocar soportes.

Posteriormente, se aplicó la opción de soportes con un tipo de base *completa* y una densidad de 1 y 0,70 mm en el tamaño del punto. Los soportes se generaron tanto en el interior del volumen

como en el exterior, con un área de contacto mínima sobre la superficie del objeto. Concluida la configuración, se efectuó la impresión mediante wifi del propio ordenador a la máquina.

Respecto a la calidad de los modelos, al igual que la impresión FDM en LFS, también dependerá de la resolución de impresión, orientación de los objetos y el tipo de material utilizado.

En el caso de esta tecnología de fabricación para analizar la calidad de los modelos, se recurrió de los múltiples materiales fotopolímeros que permite la máquina, a la resina blanca V4. Este tipo de resina solo admite establecer como altura de capa mínima 50 µm. El material fue suministrado por la propia empresa Formlabs.

En cuanto a la orientación de los moldes, se analizaron, como el caso anterior de impresión FDM, tres en posición horizontal con diferentes ángulos a 0º, 45º y 90º con su eje principal respecto a la plataforma de fabricación, y tres con las mismas características en la orientación vertical (figura la de FDM). Al finalizar la impresión, los moldes se separaron de la plataforma de impresión con la ayuda de una espátula y se sumergieron en alcohol isopropílico con el fin de retirar todos los residuos de la resina que aún conservaba el modelo. Posteriormente, se eliminaron los soportes mecánicamente con la ayuda de una pinza.

Cada uno de los moldes se analizaron mediante el microscopio digital tipo Dino-Lite, así como las superficies de los positivos en cera obtenidos. Debido a que la resina es blanca, la visualización en detalle de los acabados resultó muy complicada, por ello, se aplicó una veladura de un esmalte oscuro con el fin de apreciar mejor los resultados. Se experimentaron diferentes aplicaciones de la cera sobre el molde (pincelado y vertido) y también se hicieron test con vaselina para analizar el grado de facilidad de la extracción del positivo y si este material influye en la calidad de los detalles superficiales. Se efectuaron 5 pruebas en cada tipo de molde para comprobar la eficacia de los detalles que se pueden obtener con ellos. Por último, el material utilizado, al igual que en el análisis de los moldes impresos mediante FDM, fue la pasta cérea preparada con los componentes ya indicados (Bonells & Lacaba, 1800, p.500).

3.8.4. Configuración de la máquina sustractiva: análisis del material ceroso y de la posición de fabricación

Las configuraciones y parámetros del desbastado se llevaron a cabo mediante el programa informático Modela Player 4. En cada una de las fases de trabajo (preparación de la superficie, perforación de los agujeros, desbastado y acabado), se procedió a analizar mediante diversas simulaciones que permite el programa informático Modela Player 4 (figura 60 a), en concreto, Virtual Modela, para detectar posibles errores, así como poder ver los resultados y la calidad del acabado (figura 60 b). Aparte del mencionado programa informático, para determinadas operaciones como los ajustes de la posición, establecimiento de partida (punto 0 eje Z), o pausar (imprescindible para limpiar los restos del material) y reanudar, se ejecutaron desde el controlador VPanel de la SRM-20 (figura 60 c), una aplicación independiente del programa informático Modela Player 4.

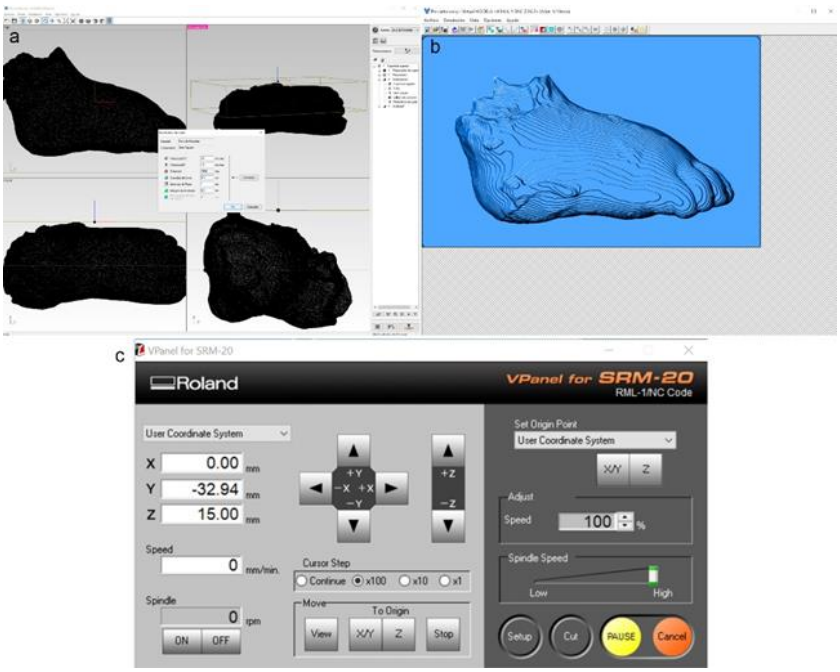


Figura 60. a) Configuración de parámetros en el programa informático Modela Player 4. b) Visualización de la simulación del proceso de desbastado en Virtual Modela. c) Panel de control Vpanel. © Emanuel Sterp Moga.

Con el fin de lograr el volumen completo, es decir, que cada una de las partes de la forma sean fresadas, fue imprescindible realizar el fresado a doble cara. Dado que la técnica para abordar dicho proceso es algo compleja, este sistema requirió de una superficie auxiliar (figura 61 a) con el objetivo de poder ubicar unos pasadores que se alojaran tanto en la superficie (figura 61 b) como en una de las caras del material a fresar (figura 61 c), con la finalidad de tener referencias a la hora de voltearlo y continuar con el fresado por la otra cara (figura 61 d) (Roland. Monofab SRM-20, 2014).

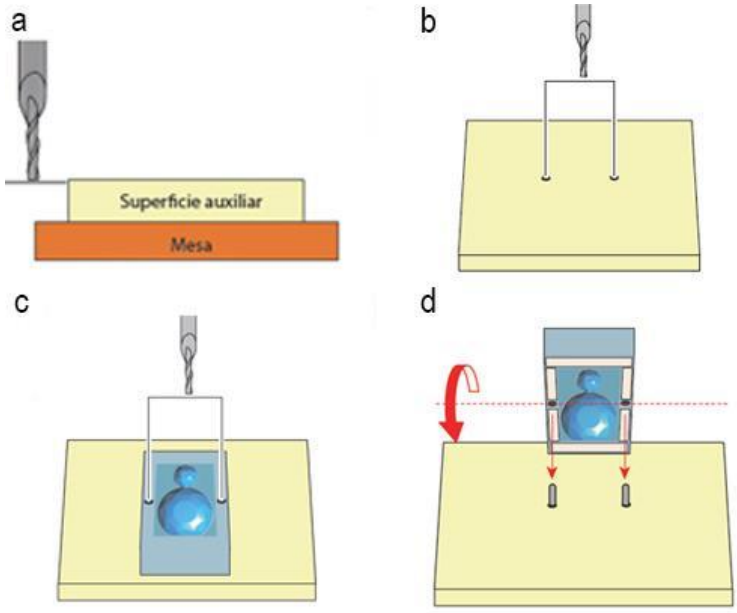


Figura 61. Preparación de la plataforma para el fresado a doble cara. a) Colocación de una superficie auxiliar y nivelación de la misma. b) Realización de agujeros en el material para poder girar el material. c) Realización de agujeros en la plataforma auxiliar y colocación de pasadores para poder votar el material. d) Encaje del bloque de material a fresar en los pasadores de la base auxiliar. © Roland. Monofab SRM-20.

Cada uno de los pasos necesarios para el fresado del material fue establecido por capas. Los parámetros se aplicaron tanto a la superficie superior como a la inferior, separadas ambas por dos carpetas diferentes (figura 62).

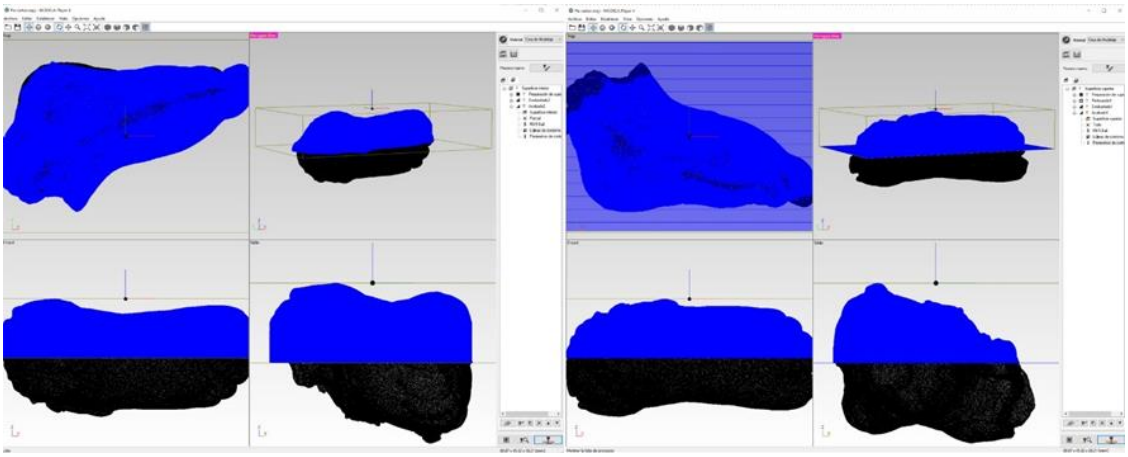


Figura 62. Gestión de las fases de trabajo y configuración del fresado. © Emanuel Sterp Moga.

Comenzando con la configuración, se procedió a orientar el modelo insertado en formato STL. Debido a la limitación de altura del eje Z (60,5 mm) se seleccionó la mejor posición con la ayuda de las herramientas de desplazamiento y rotación a fin de que el objeto encajase a la perfección en la altura del eje Z.

Los parámetros de corte utilizados, tanto en la preparación de la plataforma auxiliar como el desbastado del material, fueron, en cuanto a la velocidad en los ejes X-Y, de 24 mm/sec y, en el eje Z, de 10 mm/sec. La velocidad de rotación fue de 7000 rpm con un intervalo de pase de 1 mm. Respecto al recorrido, se seleccionó el tipo *scan lines*, ya que los movimientos de desbastado son continuos durante todo el recorrido, tanto en el eje X como Y.

Como superficie auxiliar, se adhirió una lámina de madera sobre la mesa de trabajo para poder efectuar los agujeros pertinentes y alojar los dos pasadores. A continuación, se rebajó 1 mm la superficie de la nueva tabla de madera, ya que durante la adhesión siempre se generan pequeñas diferencias de altura por el espesor del adhesivo entre esta y la mesa de trabajo. En cuanto a las dimensiones, se estableció un margen de 3 cm por cada lado respecto a las dimensiones del material a fresar para que encajase sin problemas. A tal fin, se utilizó una fresadora plana de 0.3 mm, y con la misma se realizaron también los dos agujeros ubicados en los laterales superiores e inferiores. Se tomaron las referencias de las coordenadas X-Y de los orificios para poder establecerlas en el bloque del material a fresar y así tener una plena coincidencia en ambas zonas a la hora de girar el bloque para continuar con el fresado de la pieza por la segunda cara.

Nivelada la segunda base de madera con los agujeros, la plataforma quedó lista para colocar el bloque del material a fresar.

En la pestaña de materiales se seleccionó la cera. A continuación, fue necesario establecer el punto 0 en el eje Z, de tal manera que la punta de la fresa toque toda la superficie del bloque de cera por igual. Dado que las superficies del material son irregulares, al extraer la cera del molde, se rebajó 2 mm, tanto por la cara superior como la inferior, con el fin de lograr una superficie totalmente plana. Se utilizó la misma fresa plana de 0.3 mm empleada para nivelar la superficie auxiliar. Obtener planos perfectos es crucial para poder establecer el punto 0 de la fresa, la cual

va a tomar como referencia el desbaste del material. Sin unas superficies perfectamente planas, a la hora de voltear el bloque para seguir con la sustracción de la materia, se producirían desniveles en la pieza y, por tanto, el volumen se vería alterado.

Concluidas las dos superficies planas, se adhirió el bloque de cera a la superficie auxiliar mediante silicona caliente, comprobando la nivelación nuevamente. Acto seguido, se estableció el punto 0 tocando mínimamente con la punta de la fresa la superficie plana en un sitio determinado y se efectuaron los agujeros con las mismas coordenadas en los ejes X-Y establecidos en la superficie auxiliar. Cabe destacar que la perforación de los agujeros en el bloque del material solamente se realizó por la superficie superior para que los orificios coincidiesen a la hora de voltear dicho bloque. Respecto al área de trabajo del fresado, para el desbastado y acabado del volumen, se ajustó la forma rectangular al bloque de cera (10 cm largo x 6 cm ancho) con unas dimensiones de 8 (largo) x 5 (ancho) cm, dimensiones en las cuales el volumen del objeto entra perfectamente. En cuanto a la altura de desbastado en la figura, en el caso de la superficie superior se estableció 1.4 cm y 1.6 cm en la superficie inferior. La fresa utilizada fue plana de 0.3 mm y para el acabado se recurrió a una fresa de 0.05 mm de punta con el fin de lograr el máximo detalle.

En este caso, a diferencia de los ensayos planteados tanto en FDM como LFS, se determinó que era inviable llevar a cabo las mismas muestras en cuanto a la posición y a los ángulos, ya que el fresado a doble cara es ya de por sí un proceso complejo y en otros ángulos, por ejemplo, a 45º, sería realmente difícil. Además, los resultados no apuntaban a unos mejores acabados, sino al contrario. En cuanto a la posibilidad de orientar el modelo a 0º respecto a la plataforma base, el volumen elegido a analizar, dadas sus dimensiones y forma, tampoco resultó viable, puesto que la altura máxima de la máquina no permitiría fresar por completo ese volumen. Sin embargo, en una posición a 90º respecto a la plataforma base, el modelo a reproducir posibilitó su desbastado, al no sobrepasar la altura permitida por la máquina. Además, el propio diseño de la máquina está enfocado a lograr el máximo detalle con el volumen perpendicular a la plataforma base, dado que la orientación de la fresa es vertical.

Los resultados obtenidos se analizaron mediante el microscopio digital Dino-Lite. También se realizó una comparación y medición por superposición a través de *mapas de distancias* con los positivos obtenidos y escaneados a través de los moldes logrados con FDM y LFS, con el fin de hallar diferencias dimensionales y acabados superficiales.

3.9. Ensayos mecánicos de tracción y flexión en materiales termoplásticos para la impresión 3D de estructuras auxiliares

3.9.1. Plan experimental

La impresión 3D es la primera fase donde los diseños virtuales de las estructuras auxiliares pasan a la creación física y tangible. La mayoría de los polímeros utilizados en la impresión FDM son isotrópicos; sin embargo, según la orientación de fabricación establecida del filamento, experimentará diferentes cambios de anisotropía. En un mismo objeto, una determinada dirección de impresión podrá proporcionar una resistencia concreta a la flexión. Sin embargo, si se emplea una orientación diferente, esta alcanzará niveles superiores o inferiores. Este factor es crucial cuando una determinada estructura está sometida a diferentes fuerzas y presiones. Dadas las

necesidades de las estructuras auxiliares, se priorizó determinar los efectos que dictamina la anisotropía en la fabricación. Por ello, con el fin de hallar el comportamiento mecánico de las piezas que conforman las estructuras auxiliares e identificar el material más apropiado, se llevaron a cabo ensayos de tracción y flexión normalizados con diferentes tipos de configuraciones en la impresión. Pese a que los ensayos de tracción son los más utilizados para la caracterización de materiales, se consideró necesario complementar los resultados mediante ensayos de flexión, ya que la configuración de las estructuras auxiliares por sus apoyos y pesos estarán sometidas a procesos de flexión (Sterp Moga et al., 2022b).

3.9.1.1. Diseño de probetas en ensayos de tracción

Las probetas se diseñaron siguiendo las recomendaciones de la norma ISO 527-1:2020 (*International Organization for Standardization*, Organización Internacional de Normalización) (UNE-ISO, 2020a) (figura 63 y tabla 2). En cada tipo de probeta se ensayaron 5 muestras con las mismas características, según estipula la norma UNE 116005:2012 (Una Norma Española [UNE], 2012).

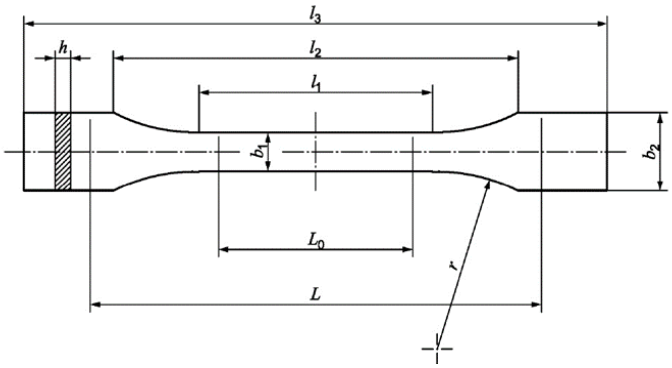


Figura 63. Forma de la probeta de tracción. © UNE-ISO 527-1:2020.

	Tipo de probetas	1A	1B
l_3	Longitud total	170	≥ 150
l_1	Longitud de la parte estrecha de caras paralelas	80 ± 2	60,0 ± 0,5
r	Radio	24 ± 1	60 ± 0,5
l_2	Distancia entre las partes anchas de caras paralelas	109,3 ± 3,2	108 ± 1,6
b_2	Anchura en los extremos	20,0 ± 0,2	
b_1	Anchura de la parte estrecha	10,0 ± 0,2	
h	Espesor recomendado	4,0 ± 0,2	
L_0	Longitud de referencia (recomendada) Longitud de referencia (aceptable si se requiere para el control de calidad o cuando se especifique)	75,0 ± 0,5 50,0 ± 0,5	50,0 ± 0,5
L	Distancia inicial entre las mordazas	115 ± 1	115 ± 1

[a] La longitud total recomendada de 170 mm para el tipo 1[a] concuerda con la Norma ISO 294-1 e ISO 10724-1. Para algunos materiales, puede ser necesario alargar la longitud de los extremos (por ejemplo l_3 = 200 mm) paraevitar la rotura o el deslizamiento en las mordazas de la máquina de ensayo.

[b] $l_2 = l_1 + [4r(b_2 - b_1)^2]^{1/2}$. que resulta de l_1. r. b_1. b_2. pero dentro de las tolerancias indicadas.

Tabla 2. Dimensiones de la probeta de tracción. © UNE-ISO 527-1:2020.

3.9.1.2. Diseño de probetas en ensayos de flexión

El diseño de las probetas se basó en las recomendaciones de la norma ISO 178:2020 (UNE-ISO, 2020b) (figura 64 y tabla 3). Como en el caso anterior, se ensayaron 5 muestras con las mismas características, según estipula la norma (UNE, 2012).

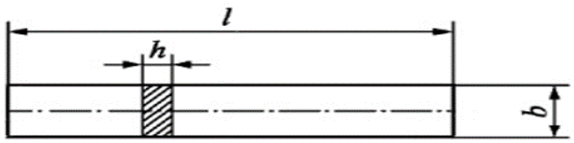


Figura 64. Forma de la probeta de flexión. © UNE-ISO 178:2020.

l	Longitud	80 ± 2
b	Anchura	10 ± 0,2
h	Espesor	4 ± 0,2

Tabla 3. Dimensiones de la probeta de flexión. © UNE-ISO 178:2020.

3.9.1.3. Procedimiento: Materiales y configuración de la impresión 3D en las diferentes probetas

Ambos ensayos (tracción y flexión) se desarrollaron de manera idéntica en dos partes. En una primera parte, con el fin de encontrar las mejores características de la orientación y la densidad de relleno posible para la impresión de las estructuras, se ensayaron 45 probetas de PLA en las que se varió el ángulo a 0° y 90° en la posición horizontal y a 0° en la posición vertical según su eje longitudinal que forma el plano de la muestra con la plataforma de impresión (figura 65). Con cada ángulo se crearon 15 ejemplares (5 con una densidad del 100%, 5 con una densidad del 50% y 5 con una densidad del 10%).

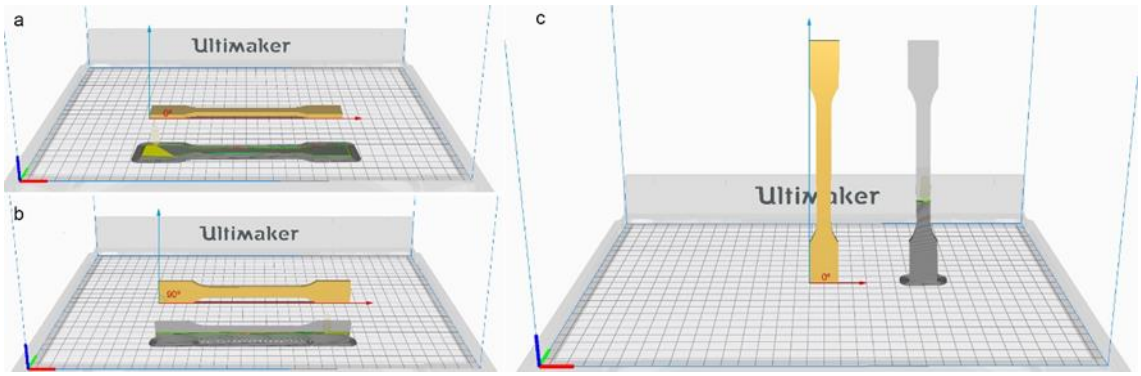


Figura 65. Posiciones de impresión de la probeta. a) Horizontal 0º. b) Horizontal 90º. c) Vertical a 0º. © Emanuel Sterp Moga, Óscar Hernández-Muñoz, Javier del Río Esteban y Alicia Sánchez Ortiz.

La segunda parte consistió en ensayar 55 probetas, 5 correspondientes a los 11 filamentos seleccionados pertenecientes a la familia de los polímeros termoplásticos, con un diámetro de 2.85 mm. Entre los más utilizados en la impresión 3D FDM, se eligieron algunos como PLA, ABS o PETG. Aparte de estos materiales se sometieron a pruebas otros cuyas propiedades mecánicas podrían ser apropiadas para el fin propuesto como ASA, NYLSTRONG, HIPS, POLYCARBONATE, PP, PLA 3D870, INNOVATEFIL® CO-POLYESTER (*Polycarbonate*, Policarbonato) (a partir de ahora CO-POLYESTER), y INNOVATEFIL® PA CF (*Polyamide*

with Carbon Fiber, Poliamida con Fibra de Carbono) (a partir de ahora PA CF). Todos los materiales fueron suministrados por la empresa Smart Materials 3D.

Respecto a las características y configuración de impresión, en todos los casos se aplicó una velocidad de impresión de 50 mm/s, una resolución de 0.1, un espesor en pared de 1.5 con un patrón de relleno tipo *rejilla*, así como un patrón de adherencia a la plataforma de impresión tipo *balsa*. En cuanto a las temperaturas de cada material se puede observar en la tabla 4. La impresora utilizada ha sido Ultimaker S5 (figura 66).

En cuanto a las características de impresión relacionadas con la posición, el ángulo y la densidad de relleno, en esta segunda fase se seleccionaron únicamente los que mejores resultados ofrecieron en la primera parte.

Respecto a las condiciones ambientales, la impresión de las probetas se llevó a cabo bajo unos parámetros de temperatura de 20 a 22ºC, con una humedad relativa de entre 45-60%. En lo concerniente a las condiciones ambientales durante los ensayos, la temperatura osciló de 21 a 23ºC y la humedad relativa entre 40-55%.

Material de impresión	Temperatura de impresión	Temperatura en la plataforma de impresión
ABS Acrilonitrilo butadieno estireno	240ºC	85ºC
PLA Ácido poliláctico	215ºC	60ºC
PETG Tereftalato de polietileno	240ºC	80ºC
ASA Acrilonitrilo Acrilato de Estireno	250ºC	100ºC
NYLSTRONG Poliamida con fibra de vidrio	260ºC	100ºC
HIPS Poliestireno y caucho de polibutadieno	240ºC	90ºC
POLYCARBONATE Policarbonato	260ºC	100ºC
PP Polipropileno	225ºC	80ºC
PLA 3D870 Ácido poliláctico	220ºC	60ºC
CO-POLYESTER Copoliéster	270ºC	100ºC
PA CF Poliamida con fibra de carbono	250ºC	60ºC

Tabla 4. Características de impresión de las diferentes probetas en diversos materiales seleccionados para los ensayos de tracción. © Emanuel Sterp Moga.

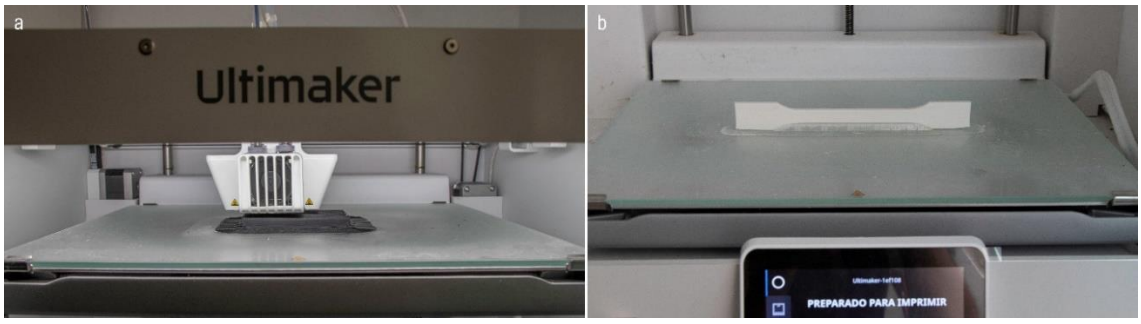


Figura 66. Proceso de impresión de las probetas. a) Probetas de flexión. b) Probeta de tracción. © Emanuel Sterp Moga.

3.9.1.4. Técnicas de caracterización

Durante la caracterización de cada uno de los materiales, se tuvieron en cuenta diversos puntos a analizar, los cuales se muestran a modo de ejemplo en la figura 67. El punto (1) corresponde al *inicio del ensayo* y el punto (2) al *límite de proporcionalidad*. Este punto va a determinar el rango más apropiado para trabajar con las propiedades físicas adecuadas. Entre los puntos (1 y 2), las deformaciones sufridas por el material son elásticas y la relación tensión nominal-deformación nominal es lineal, por tanto, las deformaciones producidas en este rango al aplicar una carga se recuperarán cuando ésta deje de actuar. Dado que en muchos casos es muy difícil determinar el límite de proporcionalidad, ingenierilmente se determina el *límite elástico* a una deformación del 0.2%, punto (3), para caracterizar el valor máximo de tensión que puede soportar el material sin sufrir deformaciones permanentes. A partir del *límite elástico* comienza la zona plástica. Entre los puntos (3 y 4) se encuentra la zona plástica, franja donde el material sufre deformaciones y cambia sus propiedades físicas. El punto (4) corresponde a la *fuerza máxima*, fuerza que nunca se debe alcanzar, pues las propiedades físicas y mecánicas sufren importantes modificaciones. A partir del punto (4) se entra en la zona de estriación y en el punto (5) se produciría la *rotura*. Entender los límites y el punto en el que los materiales impresos empiezan a sufrir deformaciones permanentes, resultará fundamental a la hora de emplearlos durante la creación de las estructuras auxiliares.

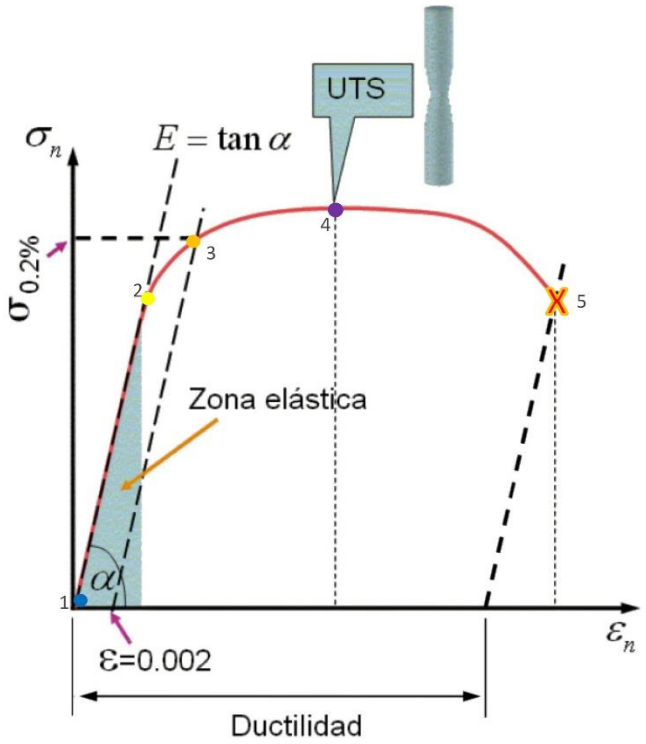


Figura 67. Ejemplo de curva de tracción, relación tensión nominal-deformación nominal caracterizada en diferentes puntos. Punto 1 *inicio del ensayo*, punto 2 *límite de proporcionalidad*, punto 3 *límite elástico*, punto 4 *fuerza máxima* y punto 5 *rotura*. © Francisco Javier del Río Esteban.

Teniendo presente las necesidades de intervención, en cada una de las estructuras auxiliares, se priorizó asegurar una adecuada estabilidad mecánica. Para ello, se estableció trabajar siempre en la zona elástica, sin llegar al *límite elástico*, punto (3). El *límite elástico* es la referencia de la tensión máxima que nunca se debe alcanzar. Entre los puntos (1 y 2) se halla el *módulo de*

elasticidad o también llamado *módulo de Young*, que viene dado por la pendiente de la recta que ajusta el comportamiento elástico del material. Es un factor muy importante sobre el que se van a caracterizar el comportamiento de los materiales, para elegir el más adecuado según las necesidades requeridas. Con el fin de asegurar la mejor estabilidad y seguridad en la creación de las estructuras auxiliares temporales, solamente se trabajó en dicha zona.

3.9.1.4.1. Ensayos de tracción

El ensayo de tracción consiste en aplicar una fuerza axial que provoca un estiramiento en la probeta hasta su fractura. Durante el alargamiento, las fuerzas con direcciones contrarias extienden la probeta produciendo deformaciones convexas. Con ello, se mide la resistencia del material a una determinada fuerza.

Los ensayos mecánicos se llevaron a cabo mediante una máquina de tracción modelo Microtest SCM 3000 95 (figura 68), que dispone de una carga máxima de 10 kN. La configuración y obtención de datos se logró a través del programa informático SCM 3000. El tratamiento de los datos se llevó a cabo mediante el programa informático Origin Pro-2021.

La velocidad de tracción es un factor determinante que va a influir en las propiedades mecánicas de los materiales. A diferentes velocidades, un material con las mismas características ofrecerá resultados diferentes. Por ello, con el fin de estimar la velocidad más adecuada, esta ha de ser superior a la funcionalidad que desempeñarán las estructuras auxiliares durante las respectivas intervenciones en la obra. Teniendo estos aspectos en cuenta, se aplicó una velocidad de tracción de 10 mm/min.



Figura 68. Máquina de tracción Microtest SCM 3000 95. © Emanuel Sterp Moga.

La máquina proporciona la fuerza aplicada sobre la probeta y el desplazamiento de las mordazas resultante. Los datos que se obtuvieron fueron: *fuerza* en kN representa el eje Y, y *desplazamiento* en mm mostrado en el eje X (esfuerzo-alargamiento). A partir de esos valores se determinó la *tensión nominal* MPa eje Y sobre la muestra (fórmula 1) y la *deformación nominal* eje X obtenida (fórmula 2). Además, se calculó el *módulo de elasticidad en tracción* mediante la (fórmula 3). En todos los casos se siguieron las recomendaciones de la norma ISO 527 – 1:2020 (UNE-ISO, 2020a, pp.24-25). Respecto al *límite elástico* al $\sigma_{0.2\%}$ se determinó gráficamente tal y como se muestra en la figura 67. Dichos aspectos fueron necesarios para ratificar la estabilidad de las estructuras durante el proceso de adhesión de los fragmentos.

1) (esfuerzo) Tensión nominal $\sigma_n = \frac{F}{A_0}$

donde

σ_n es el valor del esfuerzo en cuestión, expresado en megapascales (MPa);

F es la fuerza medida implicada, expresada en newtons (N);

A_0 es el área de la sección transversal inicial de la probeta, expresada en milímetros cuadrados (mm^2).

2) Deformación nominal $\varepsilon_n = \frac{\Delta L_0}{L_0}$

donde

ε_n es el valor de la deformación en cuestión, expresado como una relación adimensional, o en porcentaje;

ΔL_0 es la longitud de referencia de la probeta, expresada en milímetros (mm);

L_0 es el incremento de la longitud de la probeta entre las marcas de referencia, expresado en milímetros (mm).

3) Módulo de elasticidad en tracción (módulo de Young) es la pendiente de la zona elástica y que puede determinarse a partir de $E_t = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}$

donde

E_t es el módulo de elasticidad en tracción, expresado en megapascales (MPa);

σ_1 es el esfuerzo, expresado en megapascales (MPa), medido en el valor de deformación ε_1 =0,0005 (0,05%);

σ_2 es el esfuerzo, expresado en megapascales (MPa), medido en el valor de deformación ε_2 =0,0025 (0,25%);

3.9.1.4.2. Ensayos de flexión

El ensayo de flexión, basado en una carga de tres puntos, consiste en ensayar una probeta rectangular que descansa sobre un soporte apoyando 10 mm en cada lado. Entre los dos elementos que sustentan la probeta hay una distancia de 60 mm. Una pieza de carga actúa sobre el punto medio de la probeta, generando una flexión a una velocidad constante hasta que se produce la fractura. De este modo se midió la fuerza aplicada. Se aplicó una velocidad de 10 mm/min.

Los ensayos mecánicos se realizaron mediante una máquina de tracción/compresión Adamel Lhomargy DY30 (figura 69). El aparato presenta una célula de carga máxima de 1 kN que ofrece una gran precisión. La configuración y obtención de los datos se obtuvieron a través del programa informático Autotrac. Los datos y la creación de gráficos se llevaron a cabo mediante el programa informático Origin Pro-2021.



Figura 69. Máquina de flexión Adamel Lhomargy DY30. © Emanuel Sterp Moga.

Respecto a los datos obtenidos de *fuerza* en N eje Y, y *desplazamiento* en mm eje X (esfuerzo-alargamiento), como en el caso anterior en tracción, estos se convirtieron a través de la *deformación de flexión* eje X (fórmula 4) y el *esfuerzo en flexión* eje Y (fórmula 5) siguiendo las fórmulas estipuladas en la norma ISO 178:2020 (UNE-ISO, 2020b, pp.24-25). Con ello, se obtuvo una *tensión* en flexión expresada en MPa, que se registró en el eje Y, y *deformación* en flexión, representa el eje X (tensión-deformación). Aparte de estos dos parámetros, también se calculó *el módulo de flexión* (fórmula 6). Dichos aspectos resultaron imprescindibles para asegurar la máxima seguridad y eficacia en las estructuras.

4) Deformación en flexión $\varepsilon_f = \frac{6sh}{L^2}$

donde

ε_f es el parámetro de deformación en flexión en cuestión, expresado como una relación adimensional o como un porcentaje;

s es la flecha, en milímetros (mm);

h es el espesor, en milímetros (mm), de la probeta;

L es la distancia entre apoyos, en milímetros (mm).

5) Esfuerzo en flexión $\sigma_f = \frac{3FL}{2bh^2}$

donde

σ_f es el parámetro de esfuerzo de flexión en cuestión, en megapascales (MPa);

F es la fuerza aplicada, en newtons (N);

L es la distancia entre apoyos, en milímetros (mm);

b es la anchura, en milímetros (mm), de la probeta;

h es el espesor, en milímetros (mm), de la probeta.

6) Módulo de flexión $E_f = \frac{\sigma_{f2} - \sigma_{f1}}{\varepsilon_{f2} - \varepsilon_{f1}}$

donde

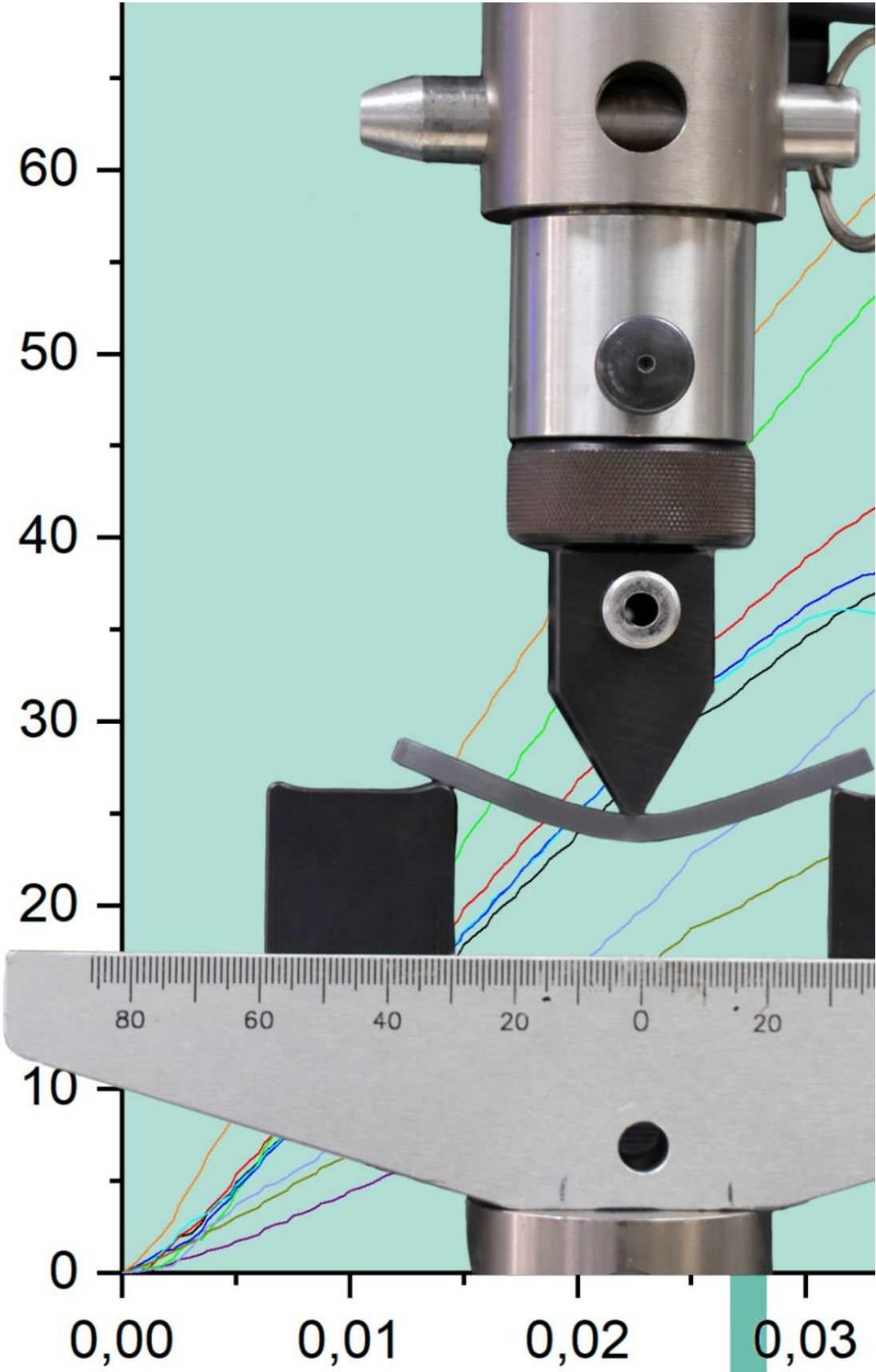
E_f es el módulo de flexión, expresado en megapascales (MPa);

σ_{f1} es el esfuerzo de flexión, expresado en megapascales (MPa), medido para la flecha s_1;

σ_2 es el esfuerzo de flexión, expresado en megapascales (MPa), medido para la flecha s_2.

4.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN



4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A lo largo de este capítulo se exponen y analizan las aplicaciones descritas en el apartado anterior, con el fin de determinar el máximo potencial y rendimiento de cada técnica según los objetivos establecidos. Para ello, se ha recurrido a los modelos anatómicos didácticos siguientes: *Cabeza anatómica* (n.º Ref.: MAJP000378) de la Facultad de Medicina, *Theobroma cacao* (MAF-BRENDEL nº149 / n.º Ref.: UCM 4012655) y *Delphinium consolida* (MAF-BRENDEL nº159 / n.º Ref.: UCM 4012655) de la Colección de Modelos Clásticos y Láminas Murales para la Enseñanza de la Botánica de la Facultad de Farmacia, todas pertenecientes a la Universidad Complutense de Madrid.

4.1. Digitalización 3D mediante escáneres de luz estructurada y procesado de los modelos

Las estrategias de registro, consistentes en girar alrededor del modelo en los casos de los artefactos de mediano y gran formato, así como rotar los objetos de pequeño tamaño mediante una plataforma giratoria, han logrado una altísima calidad en la malla (figura 70). El empleo de marcadores ha sido imprescindible para registrar todo su volumen mediante dicha plataforma. A la hora de intentar registrar geometrías muy pequeñas y, sobre todo, muy planas sin los marcadores, el escáner se perdía con frecuencia debido a la falta de información. Los marcadores han facilitado capturar las piezas pequeñas y complejas, siendo el proceso realmente fácil y preciso. Por otro lado, esta estrategia también ha resultado ser más rápida que la primera, ya que el escáner se ha mantenido prácticamente en el mismo punto y solo se ha ido moviendo la plataforma giratoria.



Figura 70. Proceso de escaneado. a) Estrategia girando alrededor del modelo. b) Estrategia girando el modelo. © Óscar Hernández-Muñoz.

En el caso del registro realizado con los LEDs del escáner apagado en el entorno lumínico generado de 2200 lux, no se han obtenido buenos resultados (figura 71 a), sobre todo si los comparamos con el registro de los LEDs del escáner activado (figura 71 b). Por lo tanto, la estrategia de capturar los modelos con los LEDs del escáner apagado ha quedado totalmente descartada.

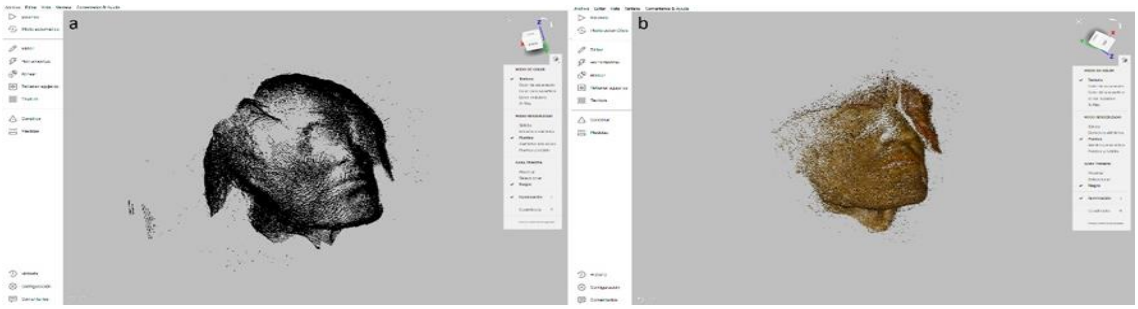


Figura 71. Proceso de escaneado. a) Estrategia de registro sin los LEDs activados del escáner. b) Estrategia de registro con los LEDs activados del escáner. © Emanuel Sterp Moga.

Durante la configuración de registro, la opción *textura + geometría* ha ofrecido una altísima precisión en la malla y en la textura colorimétrica en cuanto a la ubicación.

Otros parámetros como la *profundidad de campo* y la *sensibilidad* han sido factores determinantes en ocasiones concretas. Este factor ha permitido, en algunos modelos fabricados con una volumetría muy compleja, acceder a zonas más comprometidas, pudiendo registrar con detalle cavidades estrechas de hasta 3 cm de profundidad. Por otro lado, la *sensibilidad* ha sido un parámetro que se ha aumentado, sobre todo, en los materiales cerosos, cuyos brillos fueron muy pronunciados a causa de las películas filmógenas, ya que con niveles bajos no se ha logrado capturar dichas superficies.

Respecto a los fps con los que trabajan los escáneres por defecto (Artec Eva entre 7-8, y Artec Space Spider entre 5-7), estos han sido suficientes en todos los casos para registrar los artefactos correctamente.

El procesado de cada uno de los fragmentos que conforman el modelo ha resultado ser un proceso relativamente fácil y rápido. En primer lugar, la herramienta *eliminación de ruido* automática ha ofrecido buenos resultados. Ha eliminado prácticamente todos los elementos ajenos al modelo, pero esta operación no ha solventado con calidad la limpieza, puesto que muchos puntos cercanos al modelo no se han visto eliminados. A pesar de que durante esta operación se ha aumentado el nivel de radio 3D para abarcar una mayor eliminación, se ha considerado como parámetro máximo 0.4, con una resolución de 0.1 mm. Con valores inferiores se eliminan puntos pertenecientes al modelo. Por ello, este valor ha sido suficiente para una limpieza general. La eliminación del ruido se ha terminado con la herramienta manual de *selección de lazo* (figura 72). La limpieza de impurezas ha sido una fase determinante, puesto que la calidad de la malla y la fidelidad de los detalles han dependido de esta fase en gran medida. Si en ciertas zonas hay una determinada concentración de puntos ajenos al modelo, se ha comprobado que a la hora de crear la malla estas partes se ven alteradas, ya que recogen los puntos más cercanos a la obra, generando un volumen irreal (figura 73).

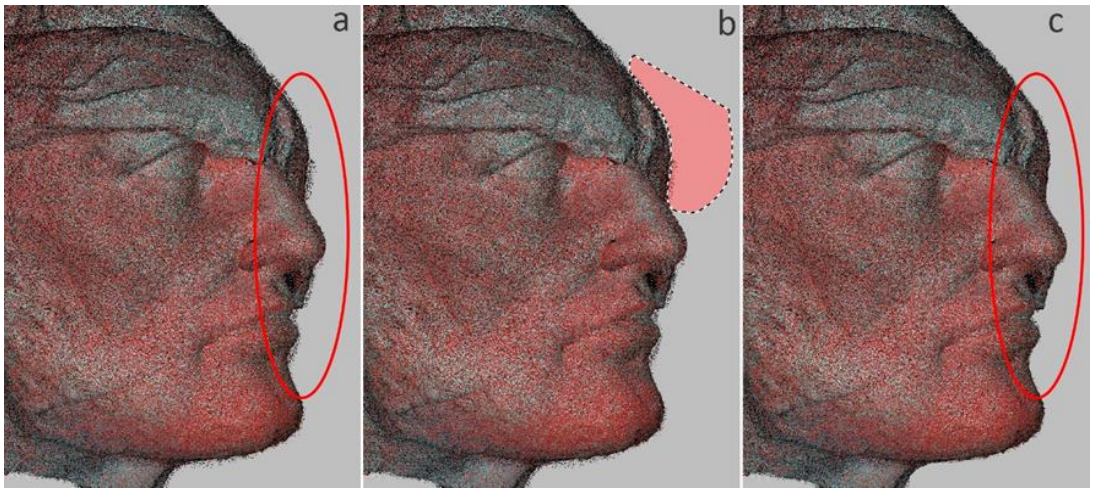


Figura 72. Proceso de limpieza. a) Puntos ajenos al volumen del modelo. b) Proceso de eliminación manual mediante la herramienta de lazo. c) Después de eliminar los puntos ajenos. © Emanuel Sterp Moga.

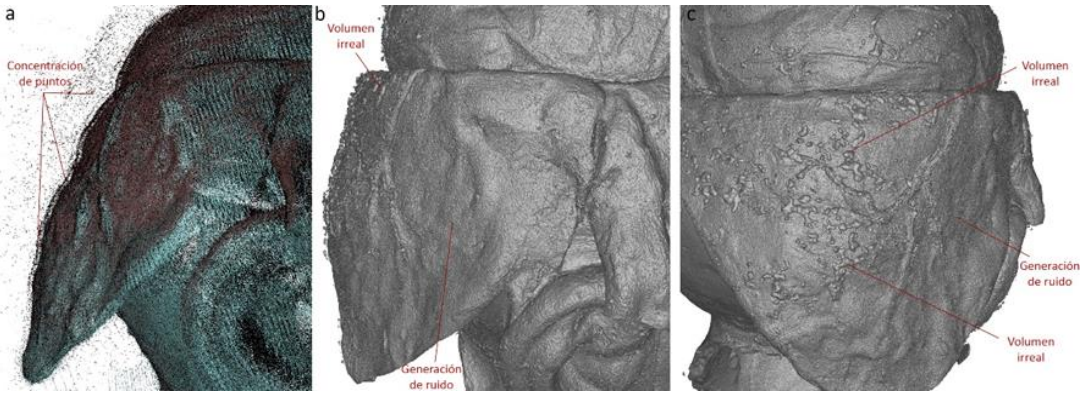


Figura 73. a) Concentración de puntos ajenos a la obra. b y c) Generación de volúmenes irreales y ruidos en el modelo. © Emanuel Sterp Moga.

El análisis detallado de los escaneados que componen cada fragmento ha permitido identificar partes duplicadas con ligeras desviaciones (figura 74 a). Esto es habitual que ocurra cuando se escanea piezas con espesores muy finos o debido a numerosos brillos en la superficie. En estos casos, el escáner pierde la referencia y duplica los escaneados en el mismo fragmento o sesión. El problema se ha solventado gracias al desglose de cada escaneado, al elegir aquellos fotogramas desviados para eliminarlos o moverlos en ocasiones a otro fragmento diferente (figura 74 b y c).

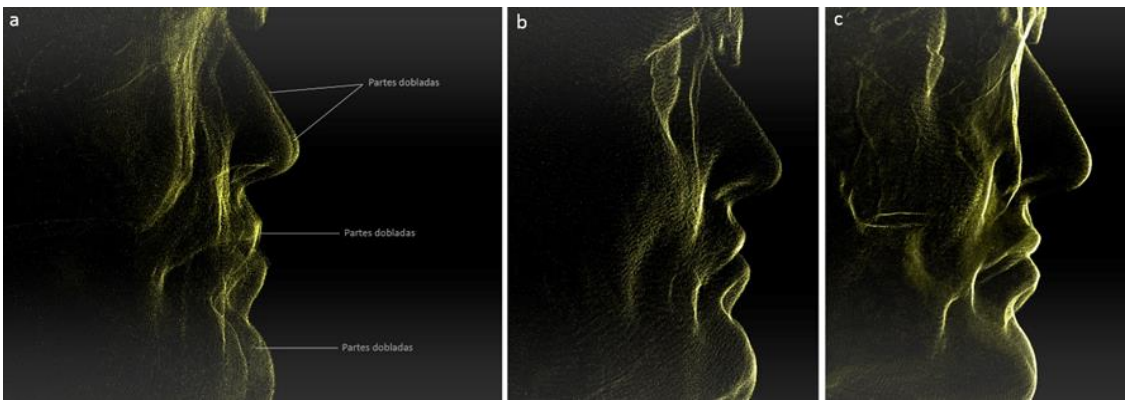


Figura 74. Análisis de partes duplicadas. a) Detección de volúmenes duplicados y superpuestos en un único fragmento. b) Selección de los fotogramas del fragmento desviados para su eliminación. c) Fragmento tras eliminar las partes duplicadas. Visión X-Ray. © Emanuel Sterp Moga.

Una vez que los fragmentos han quedado perfectamente limpios y sin zonas dobladas (figura 75 a), la alineación en modo *ajuste óptimo* ha ofrecido resultados muy precisos. El primer intento se ha llevado a cabo mediante una alineación *ajuste óptimo* en modo automático, pero varios de los fragmentos no han terminado de alinearse de forma correcta. Por tanto, se ha descartado esta opción y se ha recurrido a la alineación manual (figura 75 b). En cada pareja de fragmentos se han establecido entre 4 y 8 puntos en común, asegurando de esta manera una perfecta alineación (figura 75 c).

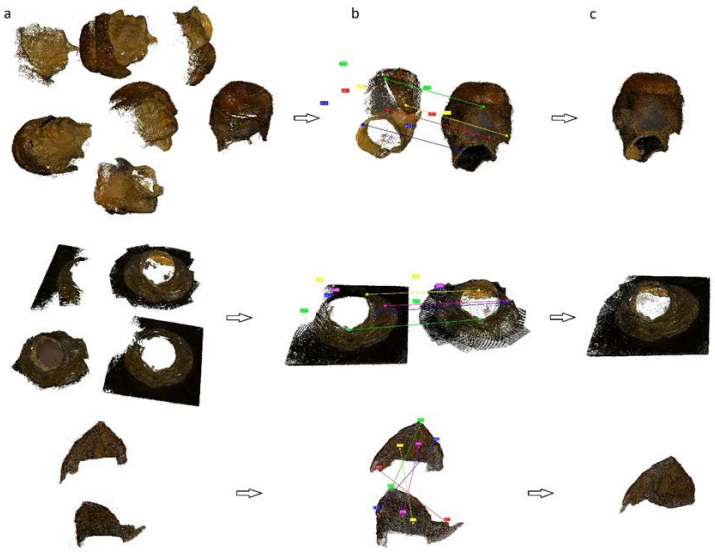


Figura 75. Proceso de alineación. a) Diferentes fragmentos que componen las partes del modelo. b) Alineación manual de cada uno de los fragmentos. c) Obtención de la alineación. © Emanuel Sterp Moga.

En el caso de los fragmentos pequeños, donde se han empleado diferentes marcadores (figura 76 a), a la hora de alinear estas partes ha sido necesario realizar una limpieza eliminando los marcadores digitalizados (figura 76 b, c, d y e). Ha sido muy importante que los diferentes fragmentos tuvieran puntos en común para poder ejecutar la alineación (figura 76 f).

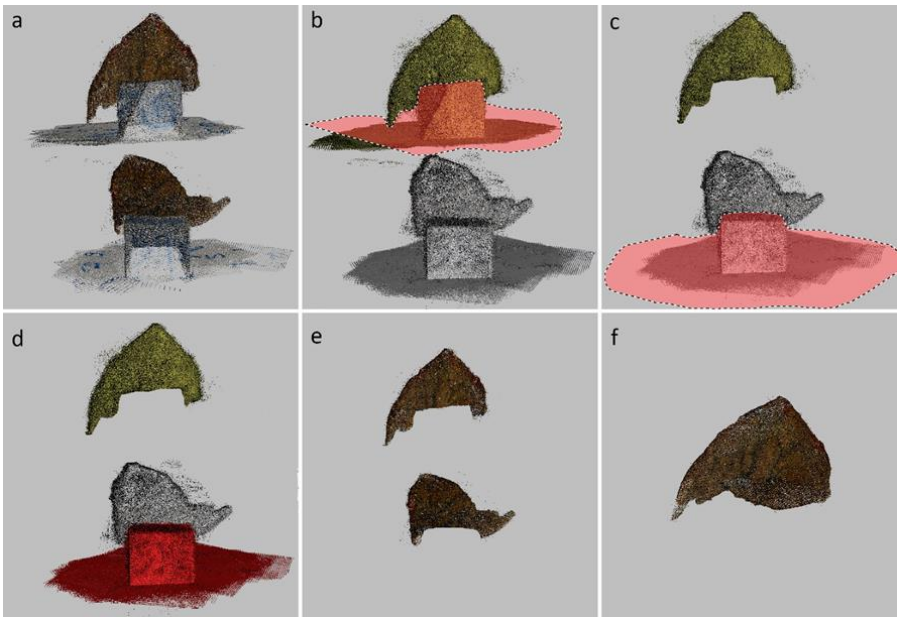


Figura 76. a) Antes de eliminar los marcadores. b, c, d y e) Proceso de eliminación de marcadores. f) Fragmentos alineados sin los marcadores. © Emanuel Sterp Moga.

Uno de los procesos más relevantes para obtener un modelo con la máxima precisión ha sido el *registro global*. Esta opción ha permitido que todos los fragmentos alineados que van a componer el modelo se alineasen con precisión, como si de un único fragmento se tratara. La identificación de las desviaciones y el resultado final se han podido observar con gran detalle gracias a la visión *X-Ray* disponible en los *modos de color* (figuras 77 y 78). La precisión alcanzada también se ha logrado, en parte, gracias a la herramienta seleccionada durante el registro *textura + geometría*.

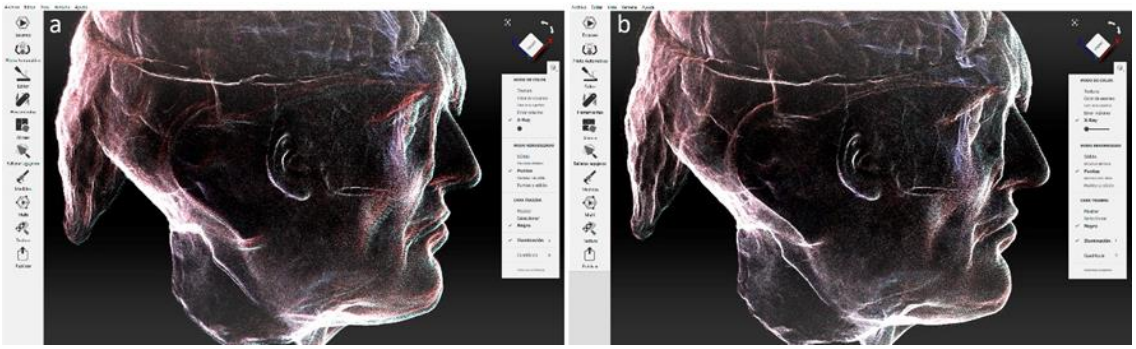


Figura 77. Análisis de desviaciones de los diferentes fragmentos que forman el modelo final. a) Antes de aplicar el registro global. b) Después de aplicar el registro global. Visión X-Ray. © Emanuel Sterp Moga.

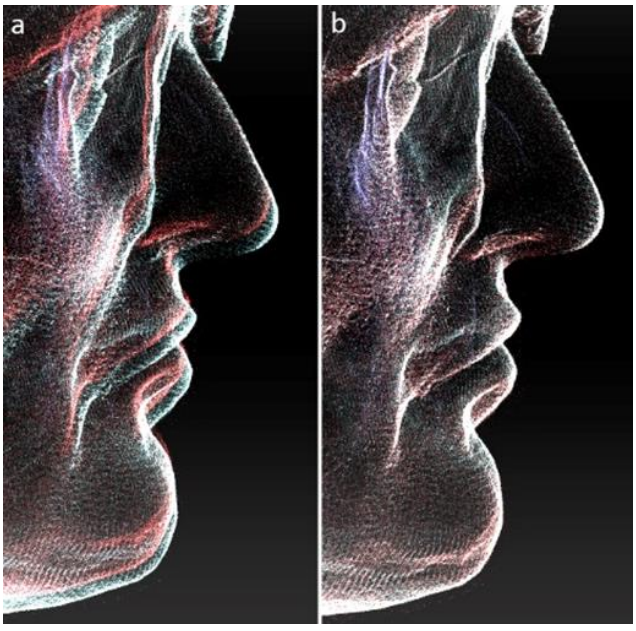


Figura 78. Detalle de las desviaciones de los diferentes fragmentos que forman el modelo final. a) Antes de aplicar el registro global. b) Después de aplicar el registro global. Visión X-Ray. © Emanuel Sterp Moga.

Respecto a la distancia de registro establecida durante la captura del modelo en el color verde (distancia óptima), ésta ha ofrecido una gran precisión en el registro volumétrico. Se ha observado que distancias inadecuadas, muy cercanas o lejanas al objeto, han repercutido negativamente en dos aspectos. La primera ha perjudicado en relación con la calidad y fidelidad del volumen, al generar desviaciones e imperfecciones en la malla. La segunda, ha afectado en la calidad de la textura de color, en zonas en las que se ha acercado mucho, se han creado texturas más claras debido a los LEDs y en aquellas zonas donde se ha alejado más la textura se ha visto más oscura. El resultado final ha sido una textura de colores muy variada con diferentes tonos, los cuales no corresponden al aspecto original.

El análisis del *error máximo* mediante las diversas herramientas de estudio, por un lado, ha revelado la precisión de cada fragmento escaneado después del *registro global* y, por otro, ha servido para poder eliminar aquellos fotogramas que se alejaban de los valores óptimos de calidad.

Durante el escaneado ha sido imprescindible producir áreas de solape entre cada fragmento para poder alinearlos de manera precisa. Una vez alineados los fragmentos y finalizado el *registro global*, teniendo en cuenta los resultados obtenidos del *error máximo*, en aquellas zonas donde se han superpuesto dos o más fragmentos, en la misma zona con valores de *error máximo* superiores a 0.2 (color amarillo, naranja y rojo) (figura 79 a) se han eliminado, y se ha dejado solo el fragmento con los valores óptimos de 0.2 y 0.1 (color verde) (figura 79 b). Con ello, se ha pretendido analizar la calidad posterior que se obtiene en la malla.

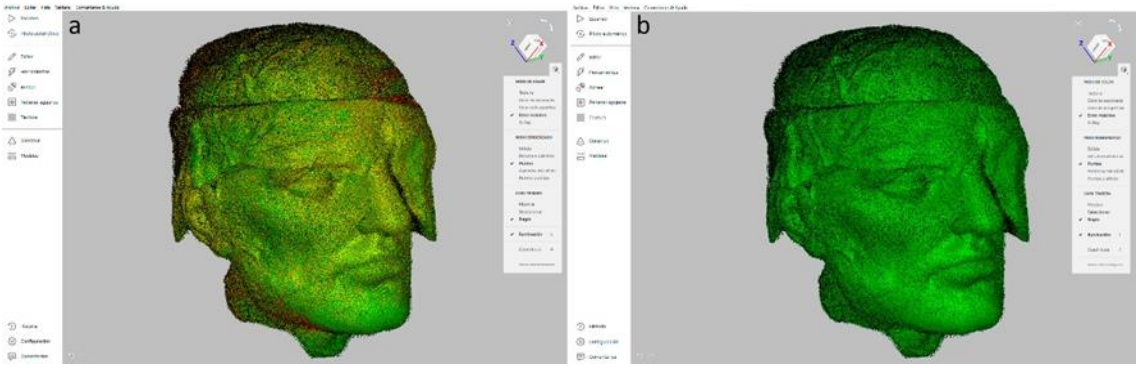


Figura 79. Error máximo. a) Superposición de los diferentes fragmentos con valores superiores a 0.2. b) Eliminación de las superficies repetidas con valores superiores a 0.2. © Emanuel Sterp Moga.

La fusión *dura* ha sido el proceso en el cual todos los fragmentos alineados formando una nube de puntos dispersos en el espacio (figura 80 a) pasan a convertirse en un único modelo poligonal sólido (figura 80 b). Esta es la fase donde se ha obtenido el volumen real de la obra. La resolución de 0.2 mm, lograda mediante los dos escáneres en la cabeza y 0.1 mm en los fragmentos más pequeños por medio del escáner Artec Space Spider solamente, ha ofrecido unos resultados de gran interés.

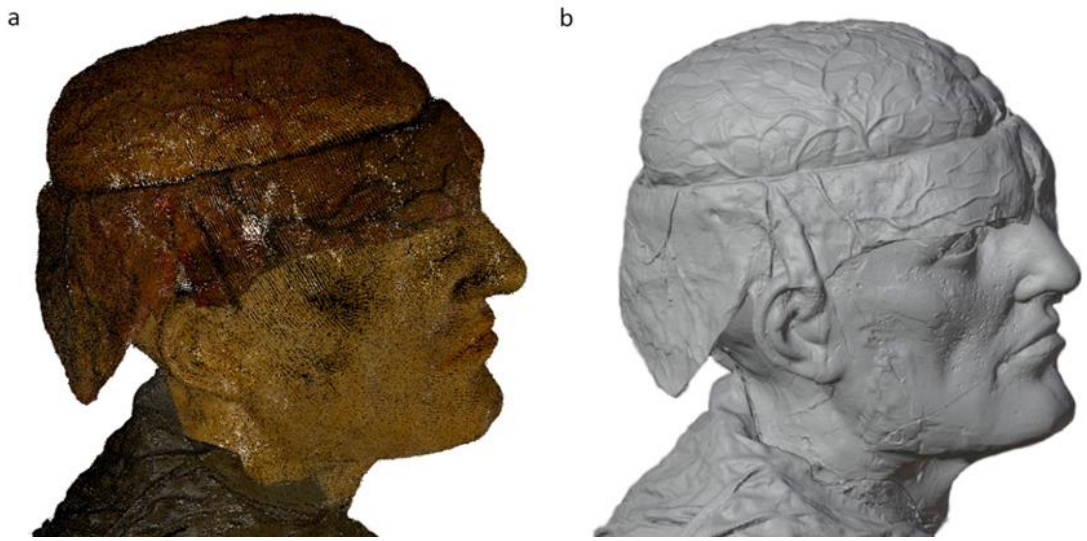


Figura 80. Proceso de obtención del volumen. a) Nube de puntos antes de aplicar la fusión *dura*. b) Malla obtenida tras aplicar la fusión *dura*. © Emanuel Sterp Moga.

Respecto a los ensayos elaborados con el fin de observar la calidad y fidelidad de la malla, han revelado datos muy significativos para tener en cuenta durante el procesado de los modelos. Para ello, como se ha mencionado anteriormente, se ha hecho uso de la comparativa del modelo sin suprimir los puntos superpuestos de varios escaneados en una misma zona y con el modelo eliminado dichas partes (figura 79).

El modelo virtual obtenido de la cabeza anatómica con la superposición de todos los escaneados contaba con 63.587.685 polígonos (figura 81). Se ha observado que el programa calcula un exceso de datos que genera diferentes aristas y vértices solapados entre ellos, sin lograr una malla limpia y uniforme (figura 82 a). Ello proporciona un ruido que modifica los acabados superficiales reales de la obra (figura 83 a). Sin embargo, tras procesar el modelo y haber eliminado todas las partes de cada escaneado que se superponían en una misma zona, se ha generado una malla de 14.065.531 polígonos. Descartar cualquier área superpuesta ha sido crucial para conseguir la máxima precisión (figura 82 b). Al suprimir las zonas con un exceso de información, la malla se ha reducido considerablemente, pero no se ha detectado que pierda calidad en la definición del volumen, sino que logra representar el volumen con mayor grado de fidelidad respecto al modelo original (figura 83 b).

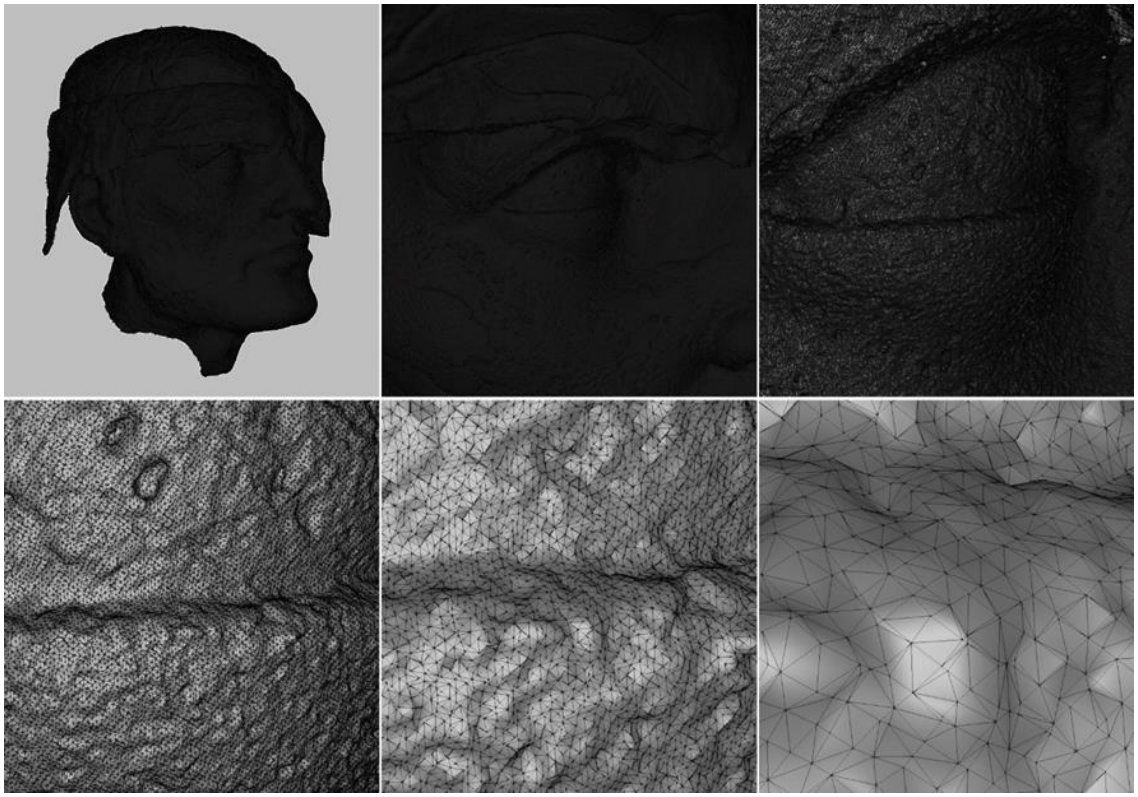


Figura 81. Malla poligonal obtenida en el modelo. © Emanuel Sterp Moga.

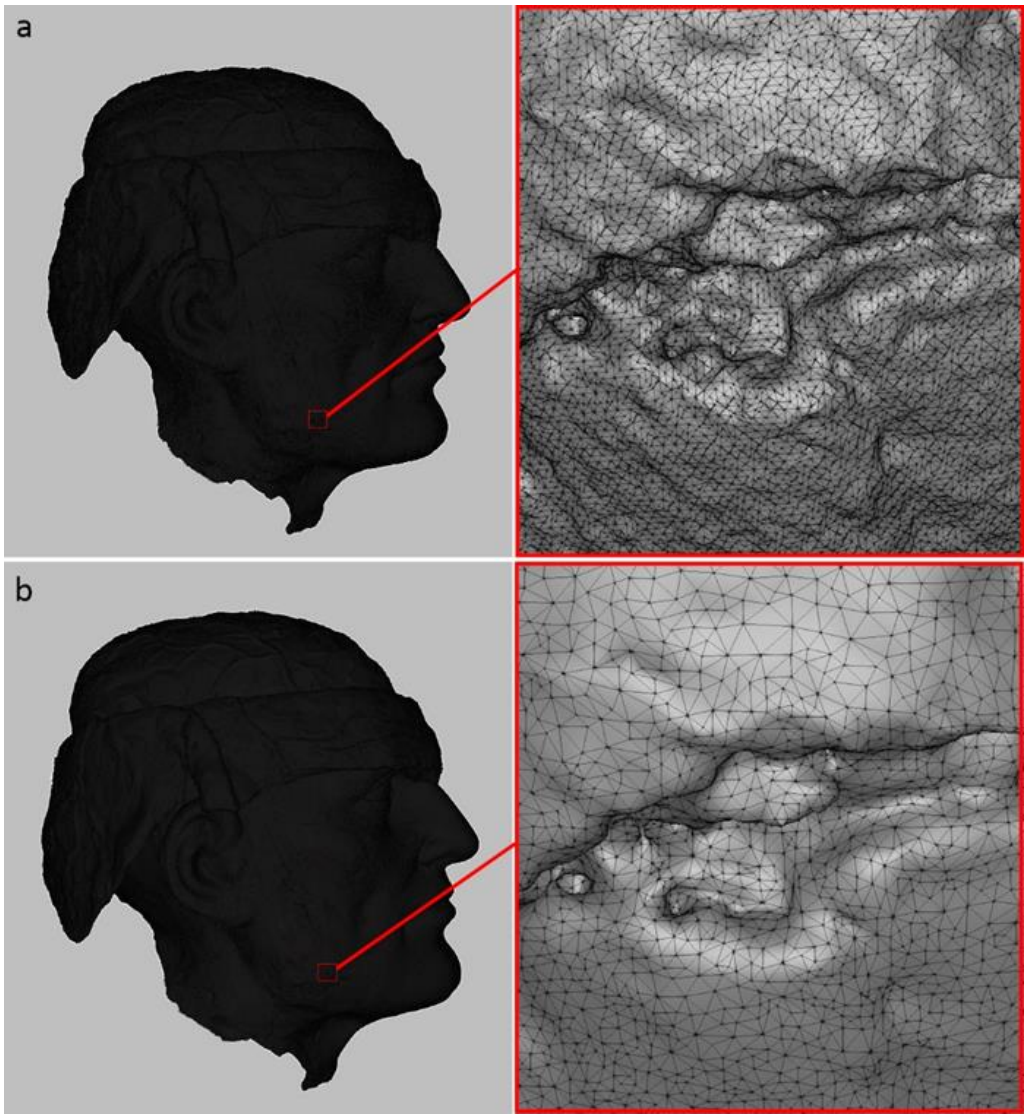


Figura 82. Detalle de la malla. a) Modelo obtenido con 63 millones de polígonos superponiendo varios escaneados en la misma zona. b) Modelo obtenido con 14 millones de polígonos sin superponer escaneados en la misma zona. © Emanuel Sterp Moga.

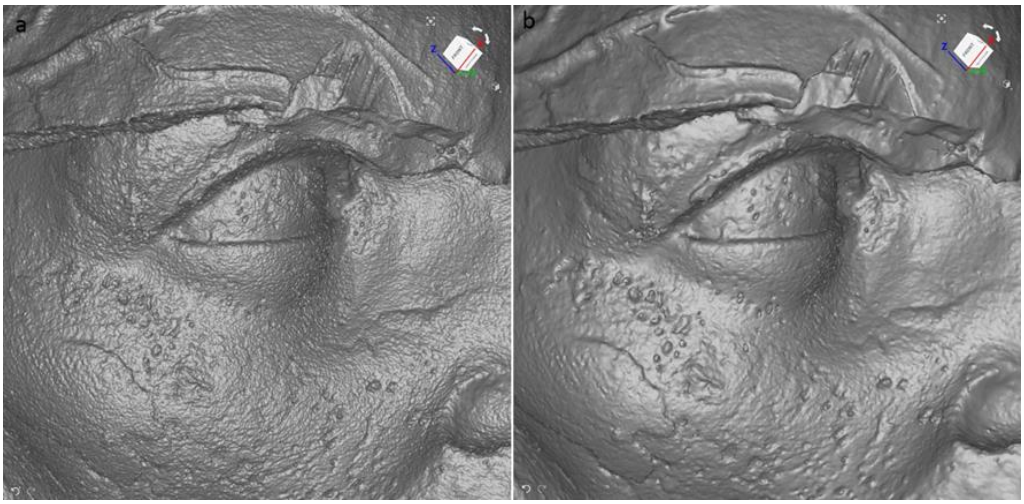


Figura 83. Detalle de los acabados en la malla sólida. a) Modelo obtenido con 63 millones de polígonos superponiendo varios escaneados en la misma zona. b) Modelo obtenido con 14 millones de polígonos sin superponer escaneados en la misma zona. © Emanuel Sterp Moga.

Con el fin de analizar la diferencia de las dos superficies con el máximo rigor, se ha recurrido a los *mapas de distancias*. Se ha observado que a una distancia de entre 0.001-0.400 mm, el ruido obtenido en el modelo de 63 millones de polígonos altera de modo considerable la superficie al alejarse de los acabados reales de la pieza si lo comparamos con el modelo obtenido de 14 millones (figuras 84 y 85 a, b, c, d, e y f). A partir de 0.400 hasta 0.900 mm, el modelo experimenta pocas deformaciones (figuras 84 y 85 g, h, i y j). Por tanto, a la hora de lograr un modelo con la más alta calidad y precisión con el original, durante el transcurso del escaneado, es imprescindible evitar el exceso de información en una misma zona, así como intentar en la medida de lo posible que no se fusionen áreas repetidas durante el procesado.

El modelo virtual finalmente obtenido plasma todos los detalles con la más alta calidad, logrando una malla de cerca de 30 millones de polígonos en su conjunto (tabla 5).

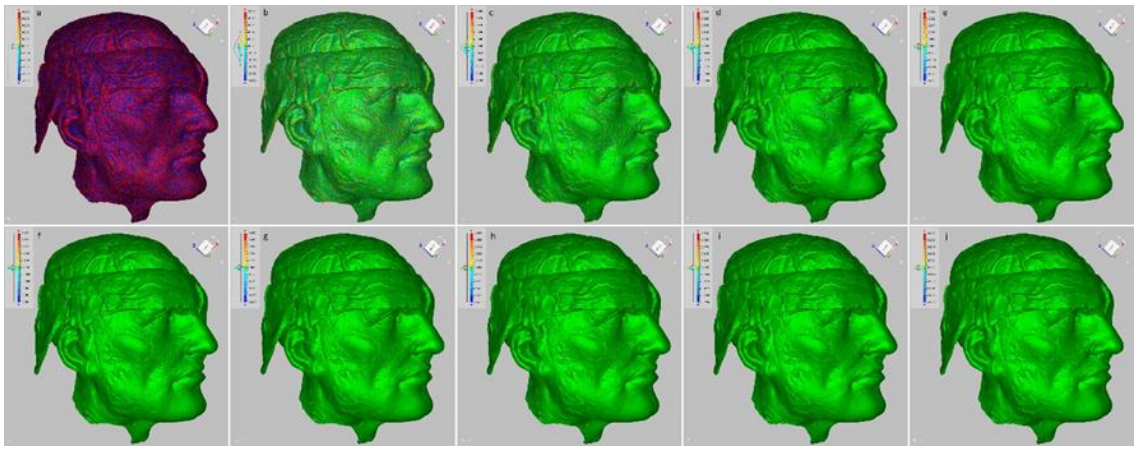


Figura 84. *Mapas de distancias* entre ambos modelos. Escala de error en milímetros. a) 0.001 mm. b) 0.100 mm. c) 0.200 mm. d) 0.300 mm. e) 0.400 mm. f) 0.500 mm. g) 0.600 mm. h) 0.700 mm. i) 0.800 mm. j) 0.900 mm. © Emanuel Sterp Moga.

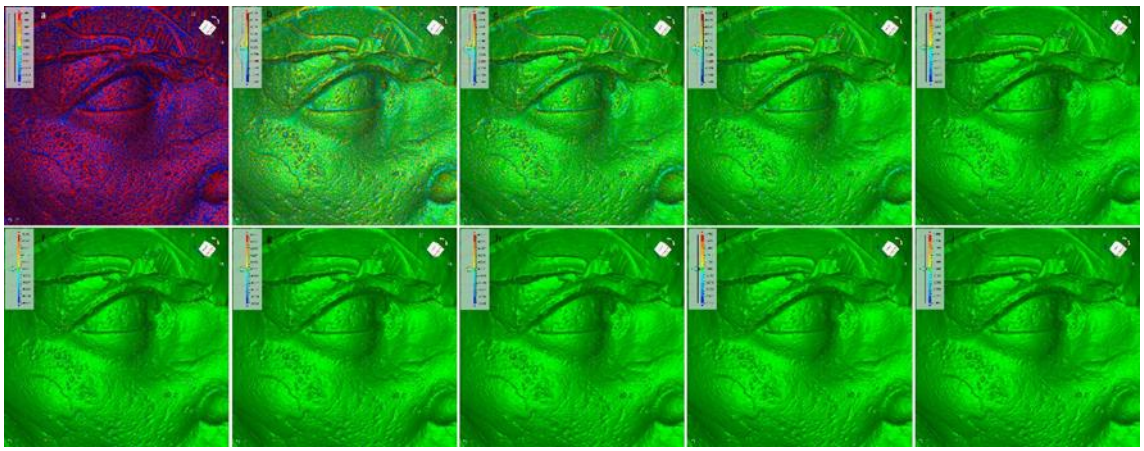


Figura 85. Detalle de los *mapas de distancias* entre ambos modelos. Escala de error en milímetros. a) 0.001 mm. b) 0.100 mm. c) 0.200 mm. d) 0.300 mm. e) 0.400 mm. f) 0.500 mm. g) 0.600 mm. h) 0.700 mm. i) 0.800 mm. j) 0.900 mm. © Emanuel Sterp Moga.

Cabeza anatómica			
Características	Cabeza	Peana	Fragmento
Velocidad de escaneo	5.1-6.5	5.3-6.2	5 -6.1
Registro	Geometría y textura	Geometría y textura	Geometría y textura
Profundidad de campo	500mm	500mm	500mm
Sensibilidad	Alta	Alta	Alta
Escaneos	6	5	4
Error máximo inicial	0.4	0.3	0.3
Error máximo Final	0.2	0.1	0.1
Fotogramas	3.886	2.328	1.120
Fragmentos de textura	330	278	56
Polígonos	14.065.531	10.347.288	5.559.412
Textura	16,384 x 16,384	16,384 x 16,384	16,384 x 16,384
Área de superficie	134209 mm^2 1342 cm^2	169063 mm^2 1690 cm^2	12521 mm^2 125 cm^2

Tabla 5. Parámetros aplicados y resultados obtenidos de la combinación de los escáneres Artec Space Spider y Artec Eva. © Emanuel Sterp Moga.

Respecto a la reproducción volumétrica, se ha logrado registrar el conjunto de los detalles, como por ejemplo pequeños relieves, vasos sanguíneos, orificios de la cera generados por las burbujas que se formaron durante el vertido de la cera en el molde, entre otros (figura 86).

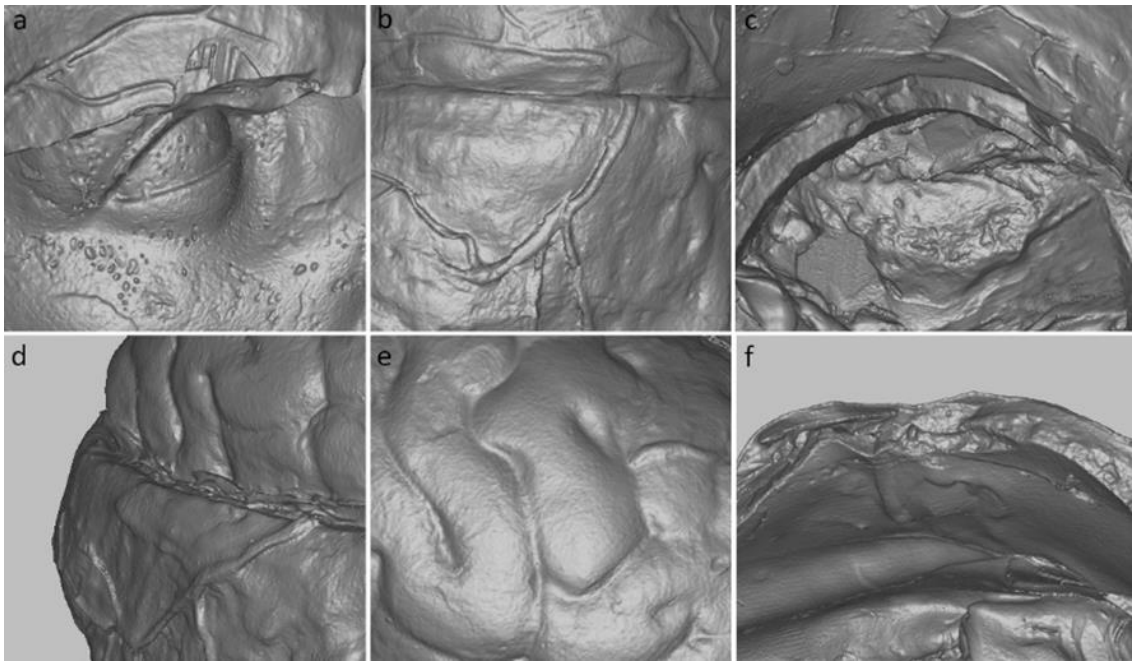


Figura 86. Diferentes detalles obtenidos de la malla. a) Detalle de los huecos de las burbujas que se han generado durante el vertido de la cera en el molde. b) Detalle de los tejidos blandos revertidos de la calota craneal. c) Detalle de la fractura correspondiente a la parte de la cabeza. d) Detalle de las venas. e) Detalle de los surcos del cerebro. f) Detalle de la fractura correspondiente a la parte del cuello. © Emanuel Sterp Moga.

A la hora de registrar la textura de color, el constante destello que producen los LEDs de los escáneres durante el proceso de captura ha hecho que aparezcan brillos generados por las capas filmógenas y se ha producido una textura bastante irregular (figuras 87 a y 88 a). Pese a que la herramienta *reducir el deslumbramiento* ha logrado matizar por completo los primeros resultados (figuras 87 b y 88 b), se ha observado que, durante la aplicación de esta, todas aquellas zonas con brillos (zonas blancas) son matizadas con los tonos que presenta alrededor de los mismos. Esto es debido a que la citada herramienta utiliza diversos algoritmos que copian los tonos más cercanos superponiéndolos sobre la zona de los brillos. De esta manera, se consigue en apariencia

reducir su presencia, pero lo que sucede realmente es una especie de clonación. En estas zonas no se ha reproducido una textura fidedigna del modelo original, ya que carece de la información cromática fiel. Aparte de esto, dada la reducida calidad de la cámara RGB de los equipos, y que no permiten realizar una gestión del color manual, la textura final que se obtiene se aleja de las calidades y características de los materiales reales de los modelos anatómicos científicos.

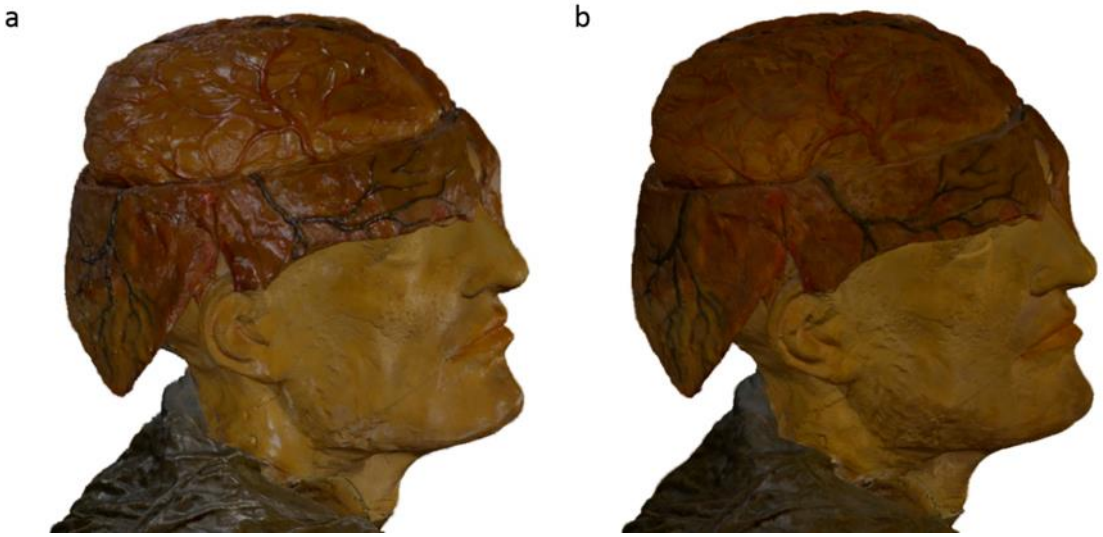


Figura 87. Resultado de la textura colorimétrica. a) Textura colorimétrica con brillos sin aplicar la opción de reducir los deslumbramientos. b) Después de aplicar la reducción de los deslumbramientos. Los brillos generados de los LEDs del escáner se han eliminado por completo. © Emanuel Sterp Moga.

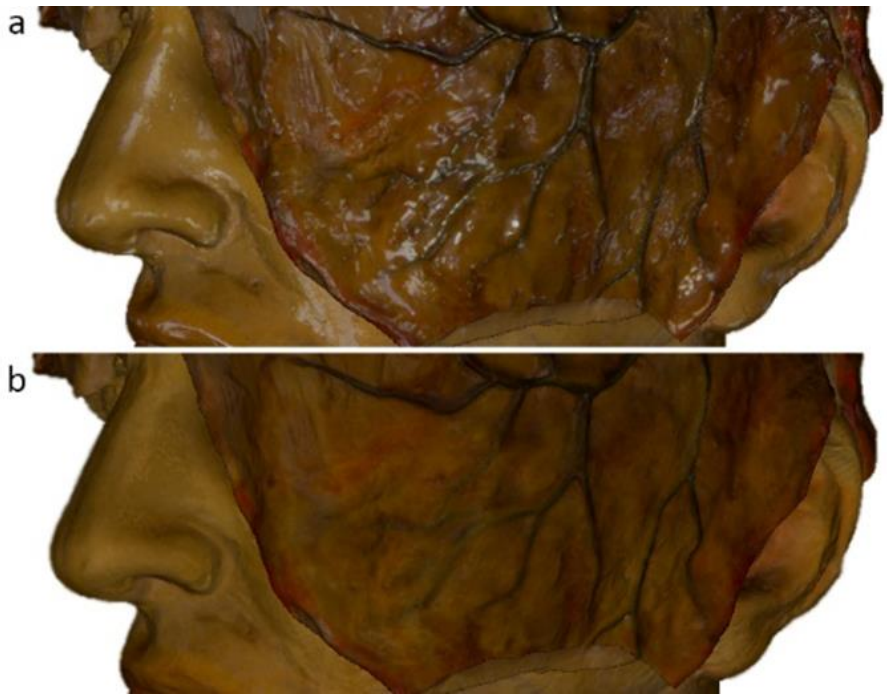


Figura 88. a) Detalles de la textura colorimétrica con brillos sin aplicar la opción de reducir los deslumbramientos. b) Resultado después de aplicar la reducción de los deslumbramientos. © Emanuel Sterp Moga.

Dados los resultados obtenidos en la textura de color, se descarta su uso por completo puesto que no es apto para cumplir con los objetivos propuestos en esta investigación. Por ello, se ha considerado necesario investigar otra técnica de digitalización que asegure una textura cromática de mayor calidad y fidelidad.

A continuación, en la figura 89 se recoge el modelo de protocolo de actuación desarrollado para la digitalización de modelos científicos mediante el escaneado con equipos de luz estructurada.

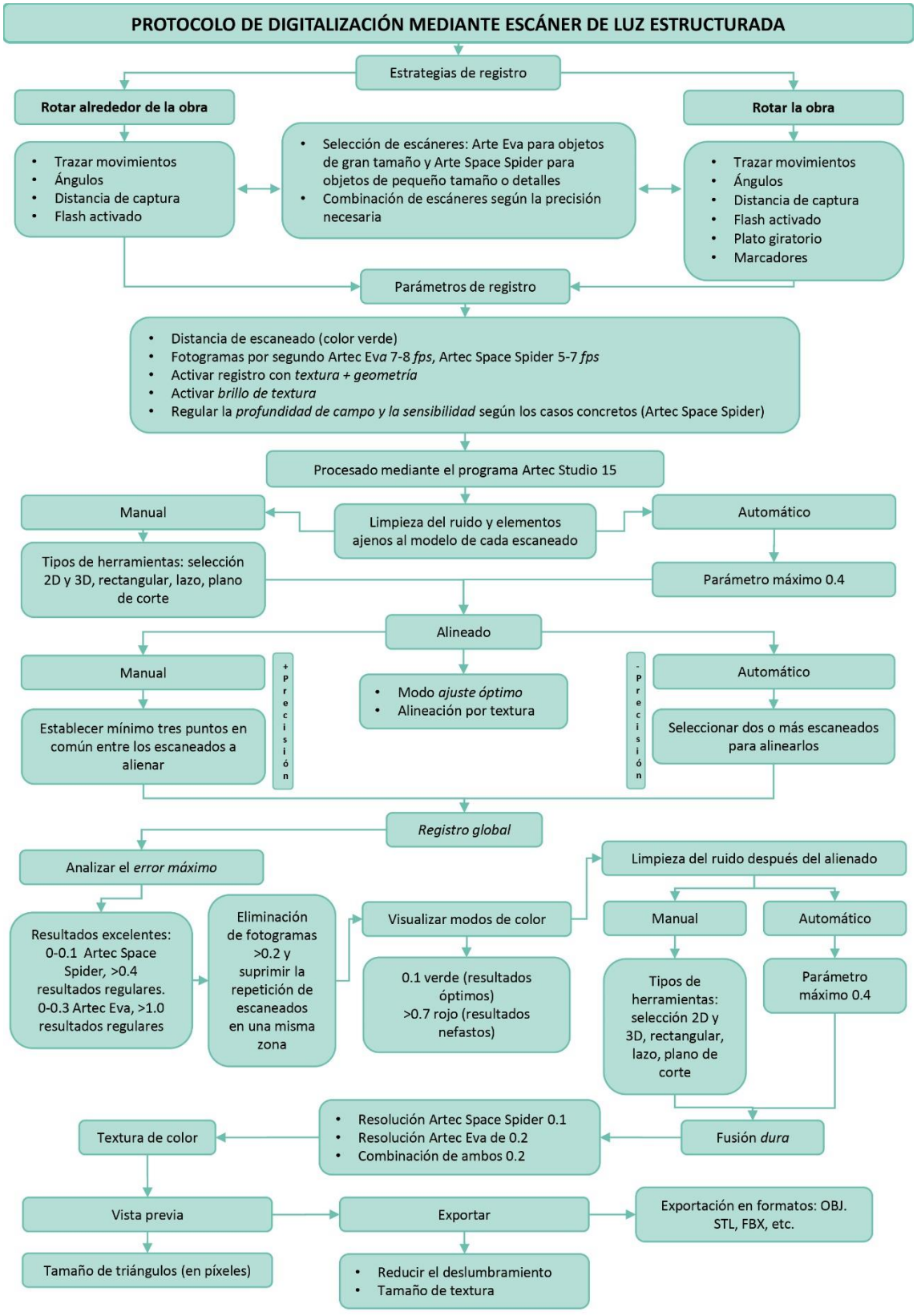


Figura 89. Protocolo de digitalización 3D mediante escáneres de luz estructurada. © Emanuel Sterp Moga.

4.2. Digitalización 3D mediante fotogrametría y procesado de los modelos

La primera estrategia de captura consistente en girar con la cámara alrededor del modelo en la sala del museo ha impedido registrar fielmente el conjunto y detalles de la obra debido a los numerosos brillos que el artefacto reflejaba a causa de las luces artificiales del museo y la luz natural que entraba por las ventanas (figura 90 a y b). Según se ha ido girando alrededor del modelo, la luz iba cambiando y, por tanto, los brillos también. Además, con estos entornos no se ha podido controlar una adecuada gestión del color, ya que se ha capturado la obra desde diversos puntos de vista en la cual el modelo presentaba una iluminación diferente según cada área. Basándonos en las condiciones obtenidas, esta estrategia se ha descartado, puesto que los resultados han repercutido significativamente en la calidad de la digitalización (figura 91).

Respecto a las fotografías obtenidas mediante el filtro polarizador (B+W F-PRO Polarizador), se ha logrado matizar los brillos. Sin embargo, se ha apreciado cierto cambio cromático (figura 90 c y d) que alejan los tonos reales de los diferentes materiales de la obra. Además, al emplear este tipo de recursos, no se puede lograr una gestión del color real. Por otro lado, durante su uso, al intentar matizar algunos brillos de una zona determinada girando el propio filtro, aparecían otros nuevos y no se conseguía matizar por completo. Por todo ello, esta estrategia también se ha descartado.

En cuanto a las pruebas ensayadas con la caja de luz Neewer y los focos LED CTS Art Lux 10L, los brillos existentes se han reducido de modo notable (figura 90 e y f), lo que ha permitido capturar todos los detalles del modelo con una mayor calidad.

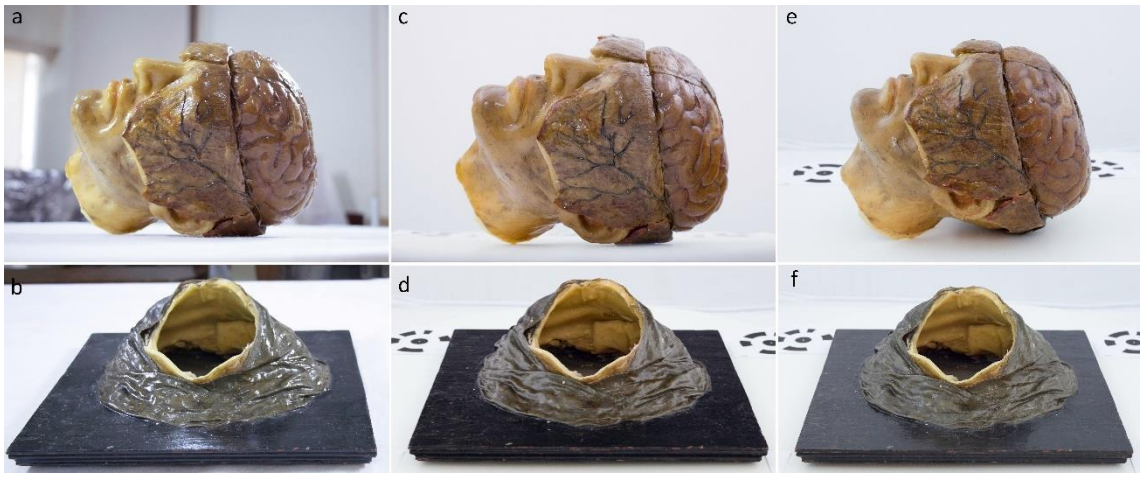


Figura 90. Cabeza anatómica documentada con luz visible. a y b) Toma fotográfica sin filtros polarizadores en el entorno lumínico del museo (luz natural y artificial). c y d) Toma fotográfica con filtro polarizador dentro de la caja de luz. e y f) Toma fotográfica del modelo utilizando la caja de luz y filtros en los focos. © Emanuel Sterp Moga.

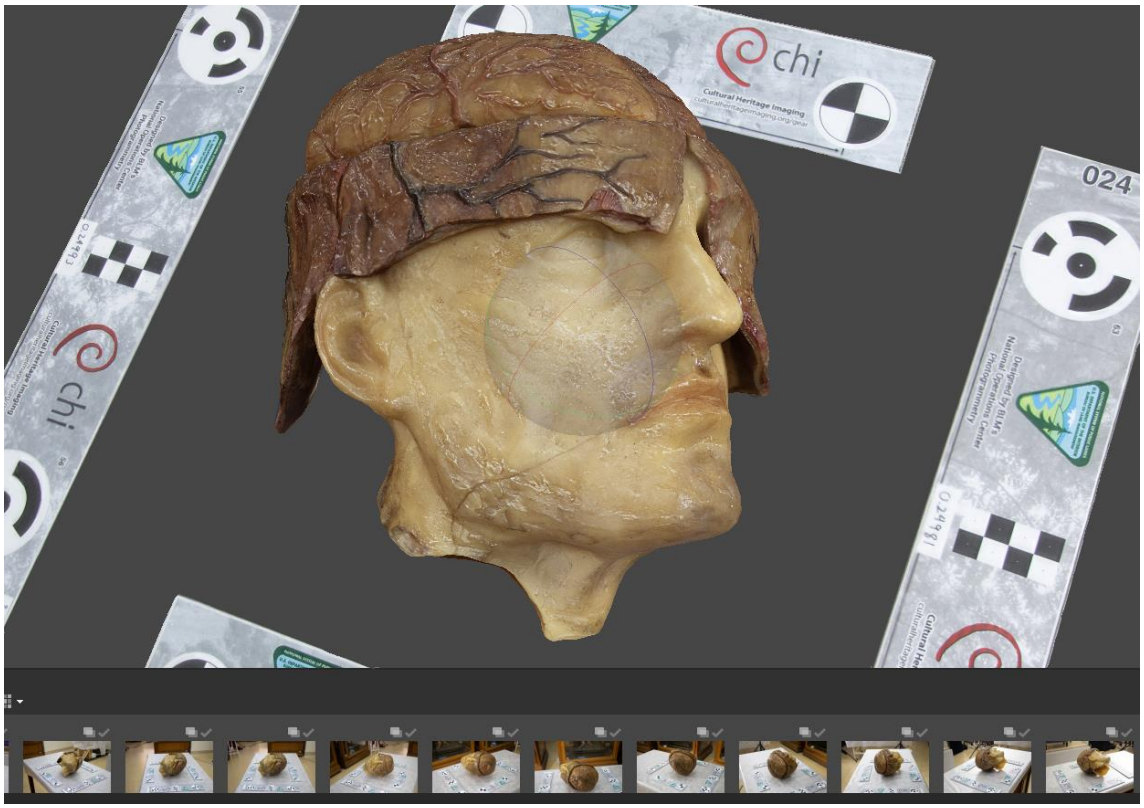


Figura 91. Nivel de registro de los brillos en el modelo 3D. © Emanuel Sterp Moga.

En el caso de las capturas realizadas en el entorno lumínico con fluorescencia visible inducida por radiación UV mediante los focos CTS AET LUX 40, a la hora de registrar el modelo sin la caja de luz, también se han apreciado numerosos brillos (figura 92 a). Al ubicar el modelo dentro de la caja luz, se ha logrado una intensidad y una iluminación más difusa y homogénea y, con ello, se ha logrado una mayor información, ya que los materiales de la obra se han visto más excitados por la radiación UV (figura 92 b).

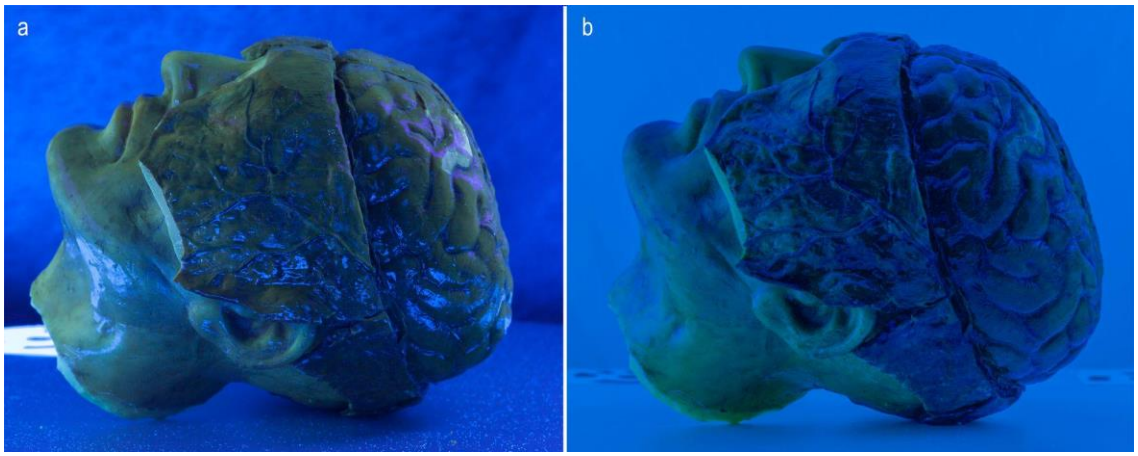


Figura 92. Cabeza anatómica documentada con fluorescencia visible inducida por radiación UV. a) Toma fotográfica en el entorno del museo. b) Toma fotográfica dentro de la caja de luz. © Emanuel Sterp Moga.

La segunda estrategia basada en girar la escultura, situada dentro de la caja de luz Neewer, por medio de una plataforma giratoria, ha ofrecido los mejores resultados en la reducción de los brillos de todas las pruebas realizadas. Los focos se han colocado a 90º respecto a la posición del objeto (figura 93), de modo que durante la captura fotográfica se pudiera disponer de un entorno con la

misma intensidad de luz, y con un adecuado control de los brillos (Sterp Moga et al., 2020). En cada una de las tomas fotográficas se ha medido la cantidad de lux que llegaba a la obra, un factor clave para obtener un buen resultado (figura 94). Los 3200 lux obtenidos en el caso de la luz visible y los 160 lux en el caso de la fluorescencia visible inducida por radiación UV, han ofrecido una intensidad de luz muy favorable para registrar fielmente las características materiales de la obra. Dicha estrategia se muestra efectiva para la digitalización de este tipo de obras.

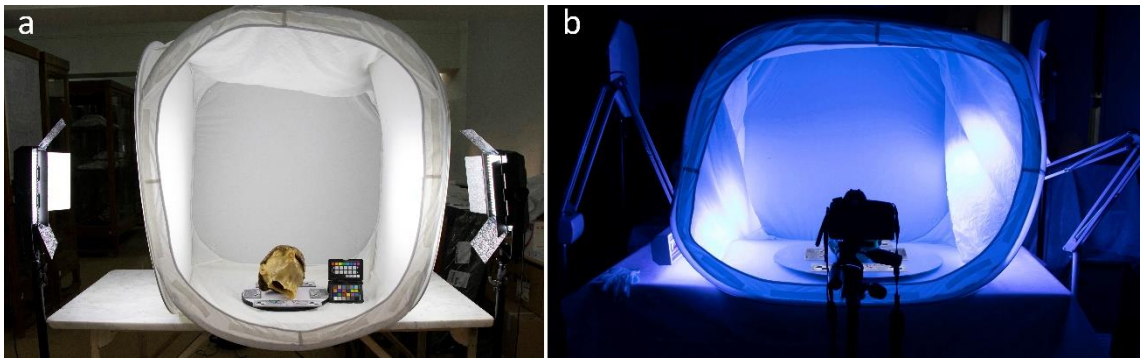


Figura 93. Estrategias de captura fotogramétrica. a) Luz visible. b) Fluorescencia visible inducida por radiación UV. © Emanuel Sterp Moga.

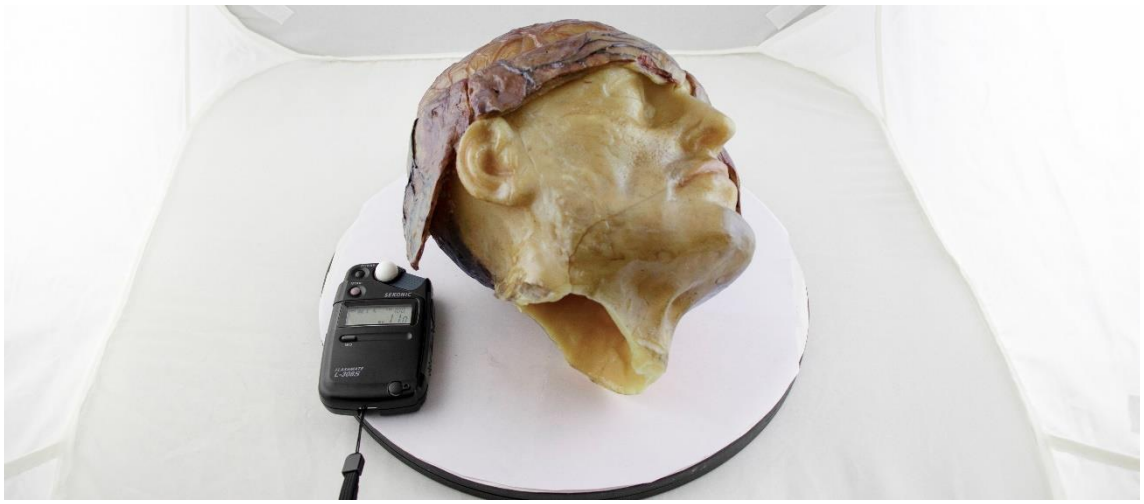


Figura 94. Medición de la cantidad de lux en el entorno de la obra. © Emanuel Sterp Moga.

Los parámetros de captura utilizados en el entorno lumínico controlado, en el caso de la luz visible de 100 ISO, diafragma f/8 y obturador 1/25; y 100 ISO, diafragma f/8 y obturador 1 s en el entorno lumínico con fluorescencia visible inducida por radiación UV, han ofrecido unas imágenes de altísima resolución, precisión y calidad en el registro de la obra.

Por otro lado, la reproducción y gestión del color llevada a cabo mediante la tarjeta X-Rite ColorChecker Passport, ha desempeñado un papel fundamental para obtener una gran fidelidad de las características colorimétricas de la obra real (figura 95 a). Mediante el flujo de trabajo aplicado con el perfil de cámara y la gestión del balance de blancos, se ha logrado la constancia de color (figura 95 b y c). Los resultados se han visto beneficiados por las condiciones lumínicas creadas y específicas para este tipo de artefactos, tal como se ha ido indicando.

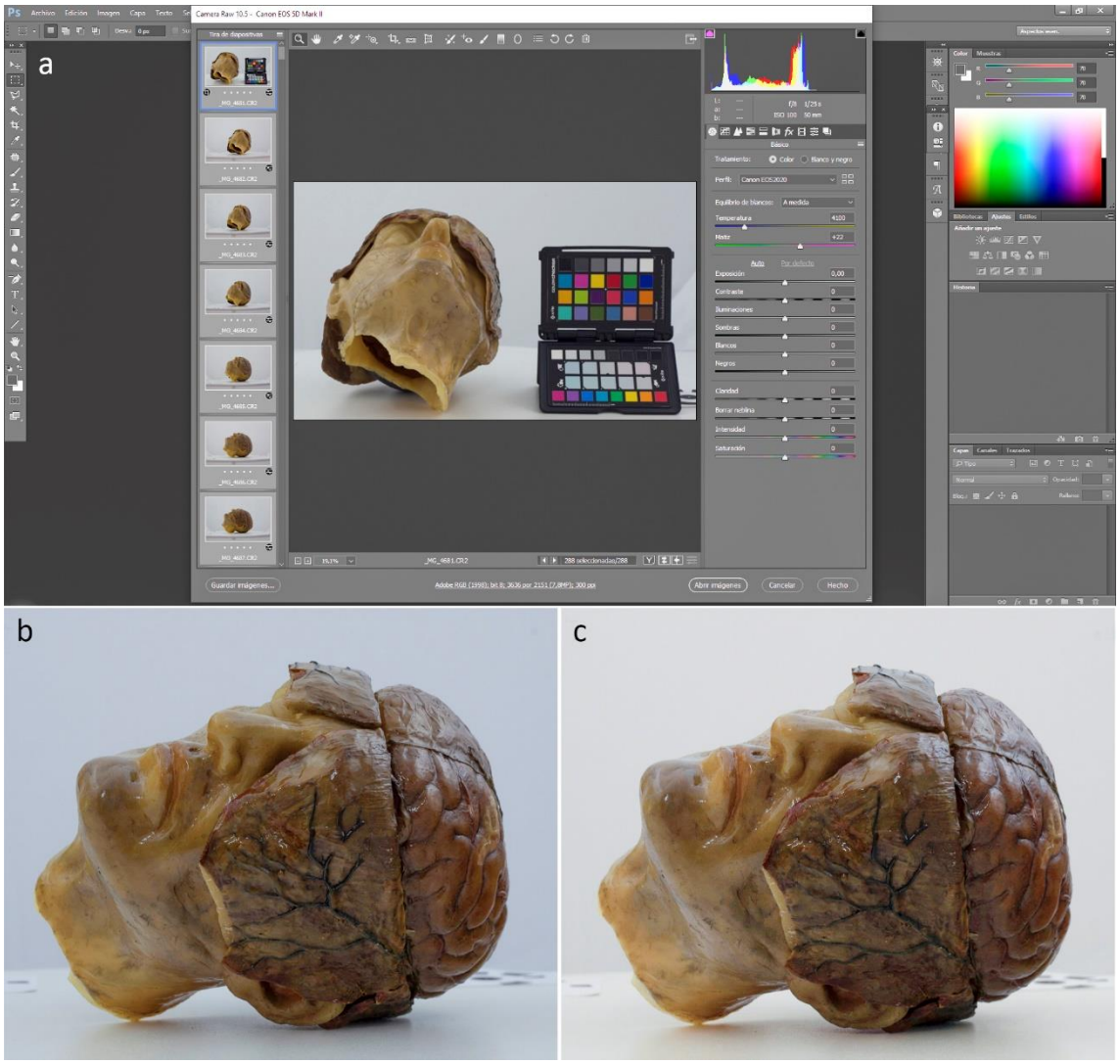


Figura 95. Proceso de revelado digital. a) Aplicación del perfil de cámara y balance de blancos. b) Antes de aplicar la gestión del color y balance de blancos. c) Después de aplicar la gestión del color y balance de blancos. © Emanuel Sterp Moga.

Durante el procesado para la obtención del modelo 3D en el programa informático Agisoft Metashape® Professional, el análisis de la calidad de las imágenes ha revelado a priori una estimación de los resultados a obtener. Las fotografías seleccionadas, cuyas calidades están comprendidas entre 05.-0.65, han ofrecido unos óptimos resultados (figura 96). El proceso de selección y eliminación de los valores que no corresponden a los mencionados, han sido determinantes para asegurar una buena calidad del modelo 3D.

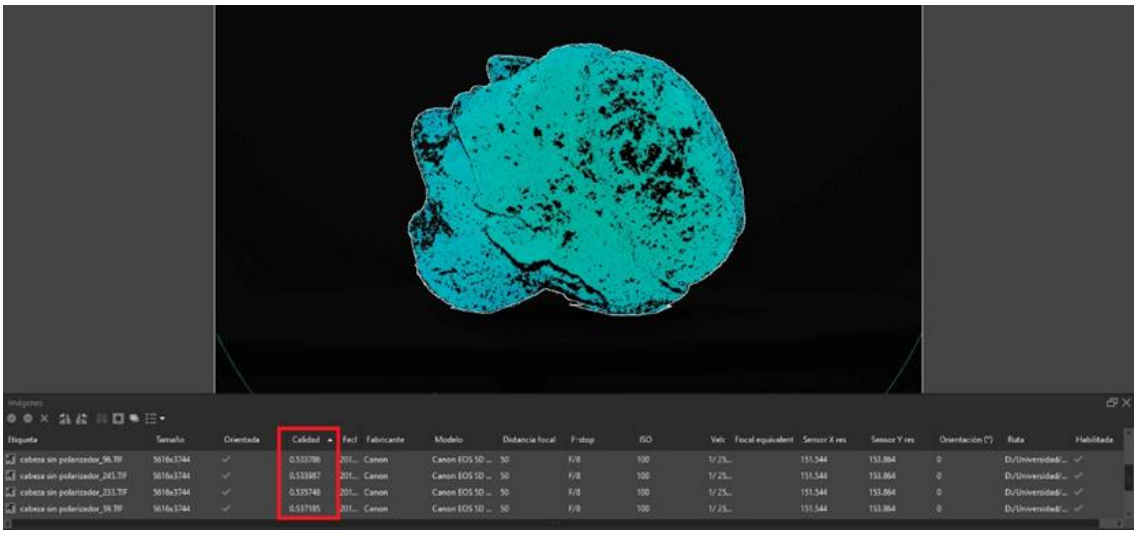


Figura 96. Proceso de selección del valor óptimo de la calidad. © Emanuel Sterp Moga.

Las diferentes fases precisas para obtener el modelo 3D (alineación, malla y textura de color) han permitido lograr unos resultados muy realistas, sobre todo en la textura de color. La orientación de las fotografías ha proporcionado un primer acercamiento al volumen de la obra y la ubicación de cada una de las cámaras alineadas, mostrando los puntos que tienen en común las diferentes imágenes en una misma zona.

Durante el alineado, el uso de máscaras ha facilitado la operación cuando el objeto ha cambiado su posición inicial con el fin de poder registrar el modelo por completo. Además, en el transcurso del proceso ha resultado ser muy útil a la hora de escoger las máscaras con las escalas únicamente de dos anillos de fotografías, mientras que en el resto de las capturas se ha seleccionado exclusivamente el objeto.

En cuanto a la estrategia de captura empleada de los dobles anillos, primero capturando el modelo general y después detalles concretos (figura 97), ha ofrecido mayor definición en los detalles anatómicos ubicados en zonas de poca accesibilidad.

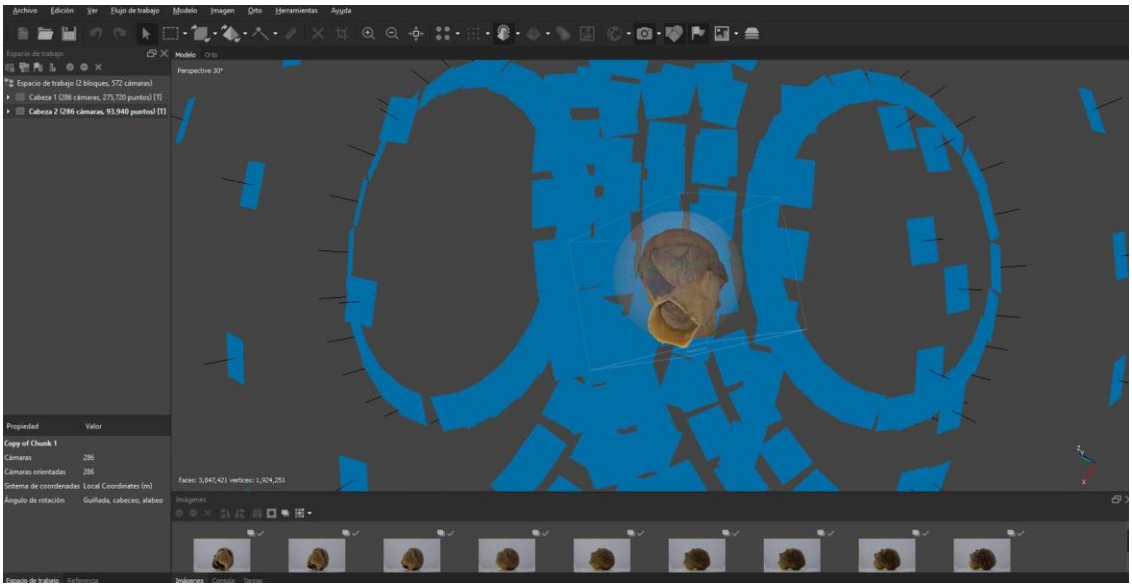


Figura 97. Alineación de las diferentes tomas mediante máscaras. Cabeza posición 1 (Ver modelo 3D). Cabeza posición 2 (Ver modelo 3D). Base posición 1 (Ver modelo 3D). © Emanuel Sterp Moga.

Respecto a la malla obtenida mediante los mapas de profundidad, han ofrecido resultados de gran interés. La malla presenta una buena definición sin apreciar ninguna zona con imperfecciones, sobre todo en zonas de poco acceso. En antiguas versiones inferiores a 1.5 de Agisoft en PhotoScan®, por ejemplo, era necesario crear la *nube de puntos densa* para obtener la malla. Determinadas zonas de poco acceso no se resolvían adecuadamente (figura 98 a) tal como si se ha conseguido en versiones posteriores mediante los mapas de profundidad (figura 98 b). Los algoritmos que utilizan corrigen y matizan los posibles errores por la falta de información, ofreciendo un acabado muy limpio y definido (figura 99). La elevada calidad de la malla obtenida en la fotogrametría es muy importante, puesto que en gran mediad la textura de color que se plasmará sobre ella se verá alterada si la propia malla presenta irregularidades o errores importantes.



Figura 98. Comparación de mallas. a) Malla obtenida con Agisoft PhotoScan® a través de la nube de puntos densa. b) Malla obtenida con Agisoft Metashape® Professional mediante mapas de profundidad. © Emanuel Sterp Moga.

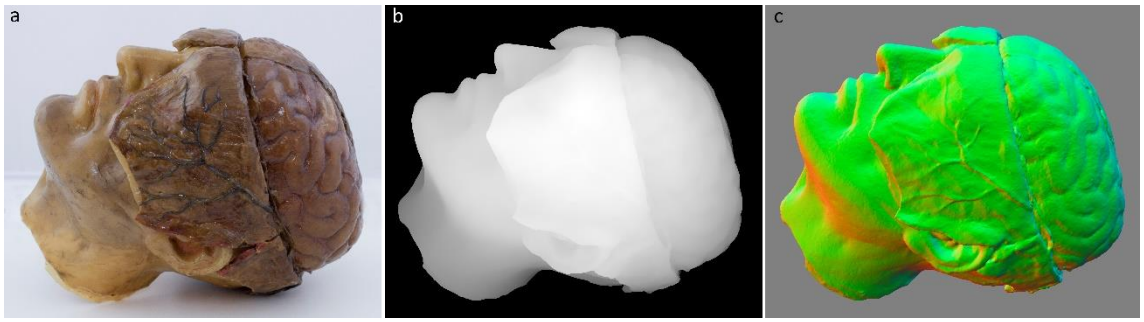


Figura 99. Mapas de profundidad. a) Fotografía del modelo. b y c) Cálculo de la malla mediante mapas de profundidad. © Emanuel Sterp Moga.

La herramienta *nivel de confianza del modelo* disponible después de obtener la malla mediante los mapas de profundidad, ha corroborado la fidelidad del modelo respecto a la calidad de las imágenes. En particular, se ha obtenido un modelo prácticamente en un color azul (fidelidad 100%) y algunas partes en verdes (figura 100). Estos colores hacen referencia a los valores de calidad de las imágenes seleccionadas con anterioridad, comprendidas entre 0.5-0.65.

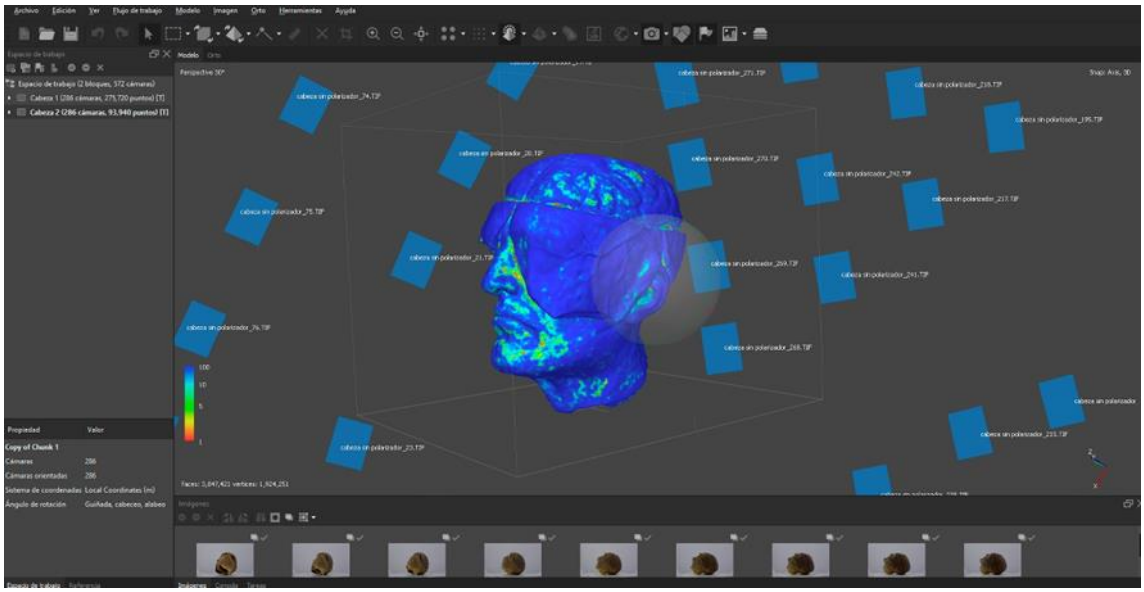


Figura 100. Escalas de colores obtenidas en el nivel de confianza del modelo. © Emanuel Sterp Moga.

El empleo de las barras de escalas durante el registro fotogramétrico ha permitido obtener un modelo a escala real 1:1 con gran precisión. El proceso ha resultado realmente fácil, ya que cada una de las escalas están codificadas (figura 101). Ello ha hecho posible el reconocimiento automático de los puntos claves y la estimación de las distancias.

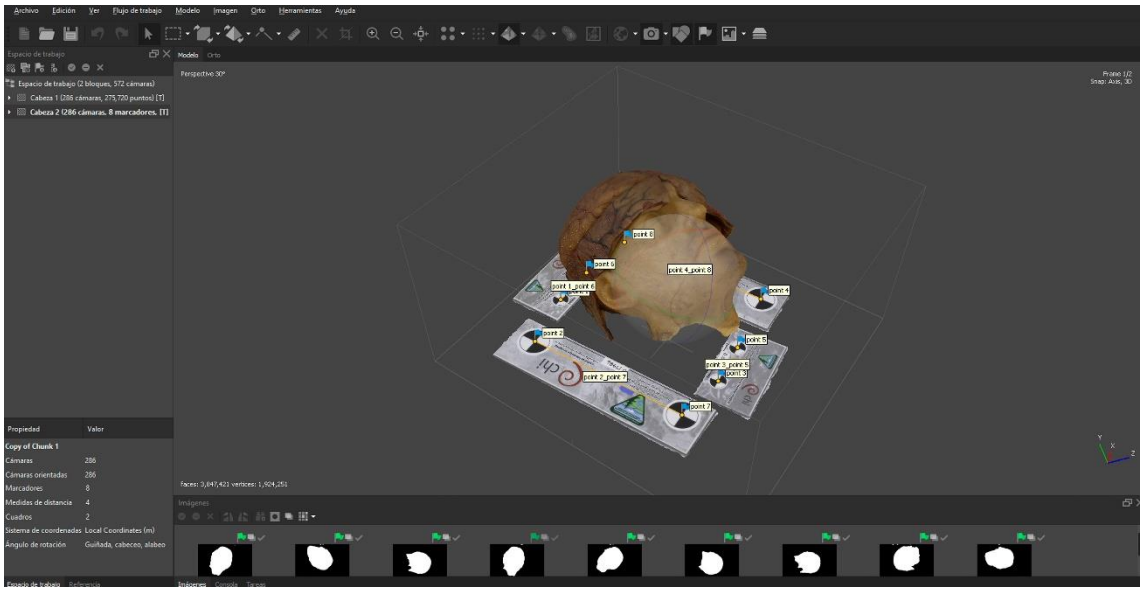


Figura 101. Obtención de la escala 1:1 mediante las escalas de CHI. © Emanuel Sterp Moga.

En cuanto a la última fase del proceso para completar el modelo fotogramétrico, hay que destacar la elevada calidad de la textura de color obtenida. La estrategia de iluminación generada ha facilitado el registro del modelo sin brillos, lo cual ha asegurado una gran precisión en la textura de color.

A pesar de que en la fotogrametría no se ha logrado obtener una malla de alta precisión y resolución, como cabía esperar en comparación con los resultados alcanzados con el escáner (Véase el apartado 4.1. Digitalización 3D mediante escáneres de luz estructurada y procesado de los modelos), se pudo comprobar que con ambas fuentes de iluminación se conseguía una gran calidad en la textura de color (figura 102). Los detalles reproducidos, la fidelidad colorimétrica, junto con la representación del material ceroso, han plasmado detalles anatómicos con el más alto nivel de realismo (figura 103). Esta fase ha sido la más importante y necesaria para lograr una representación fidedigna del modelo original, con el fin de asegurar la precisión de los diferentes análisis y tratamientos virtuales posteriores.

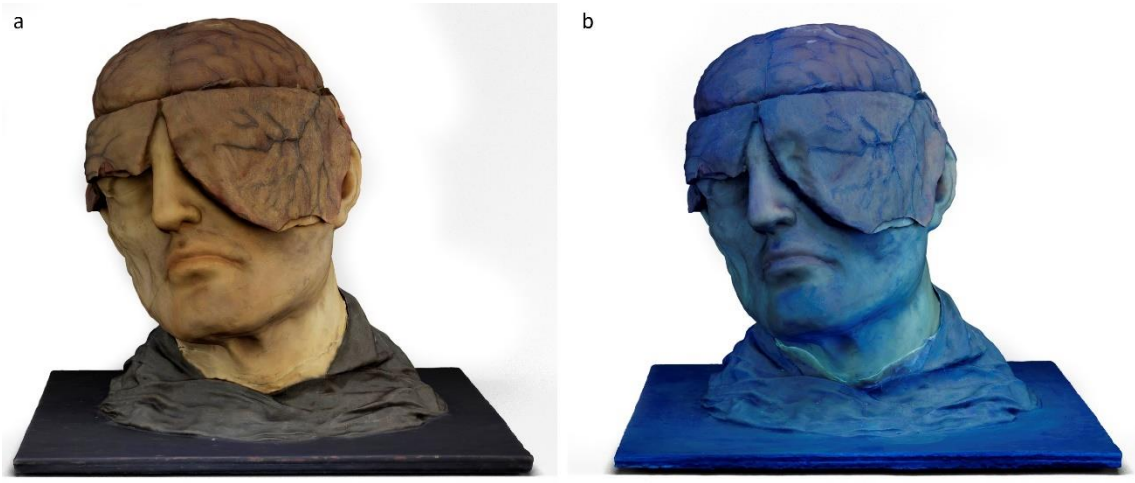


Figura 102. Textura de color fotogramétrica. a) Luz visible. (Ver modelo 3D). b) Fluorescencia visible inducida por radiación UV. (Ver modelo 3D). © Emanuel Sterp Moga.

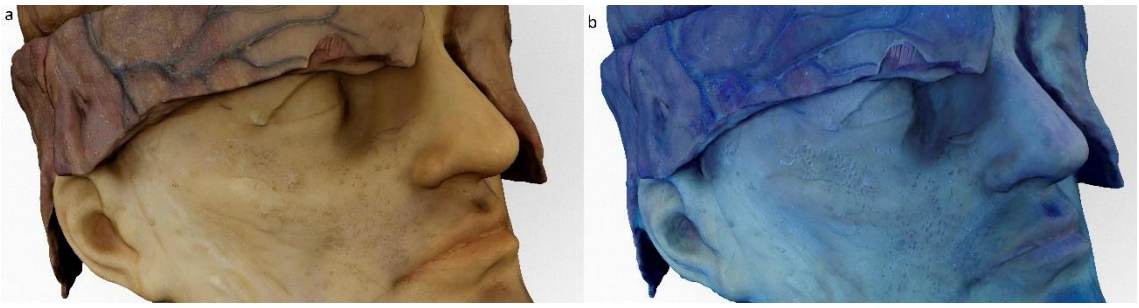


Figura 103. Detalle de la textura de color fotogramétrica. a) Luz visible. b) Fluorescencia visible inducida por radiación UV. © Emanuel Sterp Moga.

En la tabla 6 se recogen los parámetros detallados empleados y características obtenidas en el modelo con luz visible y en la tabla 7 mediante la fluorescencia visible inducida por radiación UV.

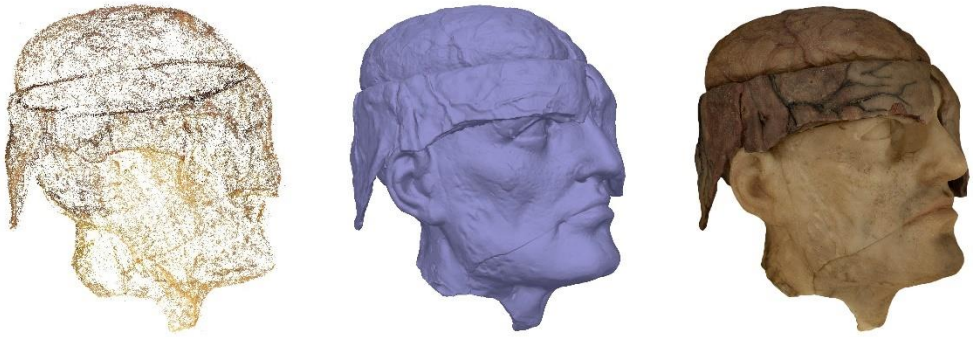
Cabeza anatómica			
Fotogrametría Luz visible Modelo y objetivo: Canon EOS 5D Mark II (50 mm) 			
	Cabeza	Peana	Fragmento
Parámetros	100 ISO, diafragma f/8 y obturador 1/25	100 ISO, diafragma f/8 y obturador 1/25	100 ISO, diafragma f/8 y obturador 1/25
Formato de archivo	TIFF	TIFF	TIFF
Nº fotografías	286	132	193
Error de reproyección	0 pix	0 pix	0 pix
Precisión	Máxima	Máxima	Máxima
Pre-selección	Genérica	Genérica	Genérica
Calidad	Extra alta	Extra alta	Extra alta
Nube de puntos dispersa	93.940 puntos	54.208	77.460
Malla a través de mapas de profundidad	3.847.421 faces	2.725.225 faces	309.072 faces
Textura	8,192 x 8,192	8,192 x 8,192	8,192 x 8,192

Tabla 6. Detalle de los parámetros y características del modelo fotogramétrico registrado con luz visible. © Emanuel Sterp Moga.

Cabeza anatómica			
Fotogrametría Fluorescencia visible inducida por radiación UV Modelo y objetivo: Canon EOS 5D Mark II (50 mm)			
			
	Cabeza	Peana	Fragmento
Parámetros	100 ISO, diafragma f/8 y obturador 1s	100 ISO, diafragma f/8 y obturador 1s	100 ISO, diafragma f/8 y obturador 1s
Formato de archivo	TIFF	TIFF	TIFF
Nº fotografías	164	84	108
Error de reproyección	0 pix	0 pix	0 pix
Precisión	Máxima	Máxima	Máxima
Pre-selección	Genérica	Genérica	Genérica
Calidad	Extra alta	Extra alta	Extra alta
Nube de puntos dispersa	94.380	53.356	62.678
Malla a través de mapas de profundidad	2.000.660 faces	763.868 faces	270.963 faces
Textura	8,192 x 8,192	8,192 x 8,192	8,192 x 8,192

Tabla 7. Detalle de los parámetros y características del modelo fotogramétrico registrado con fluorescencia visible inducida por radiación UV. © Emanuel Sterp Moga.

A continuación, en la figura 104 se recoge el modelo de protocolo de actuación desarrollado para la digitalización de artefactos anatómicos científicos mediante la fotogrametría.

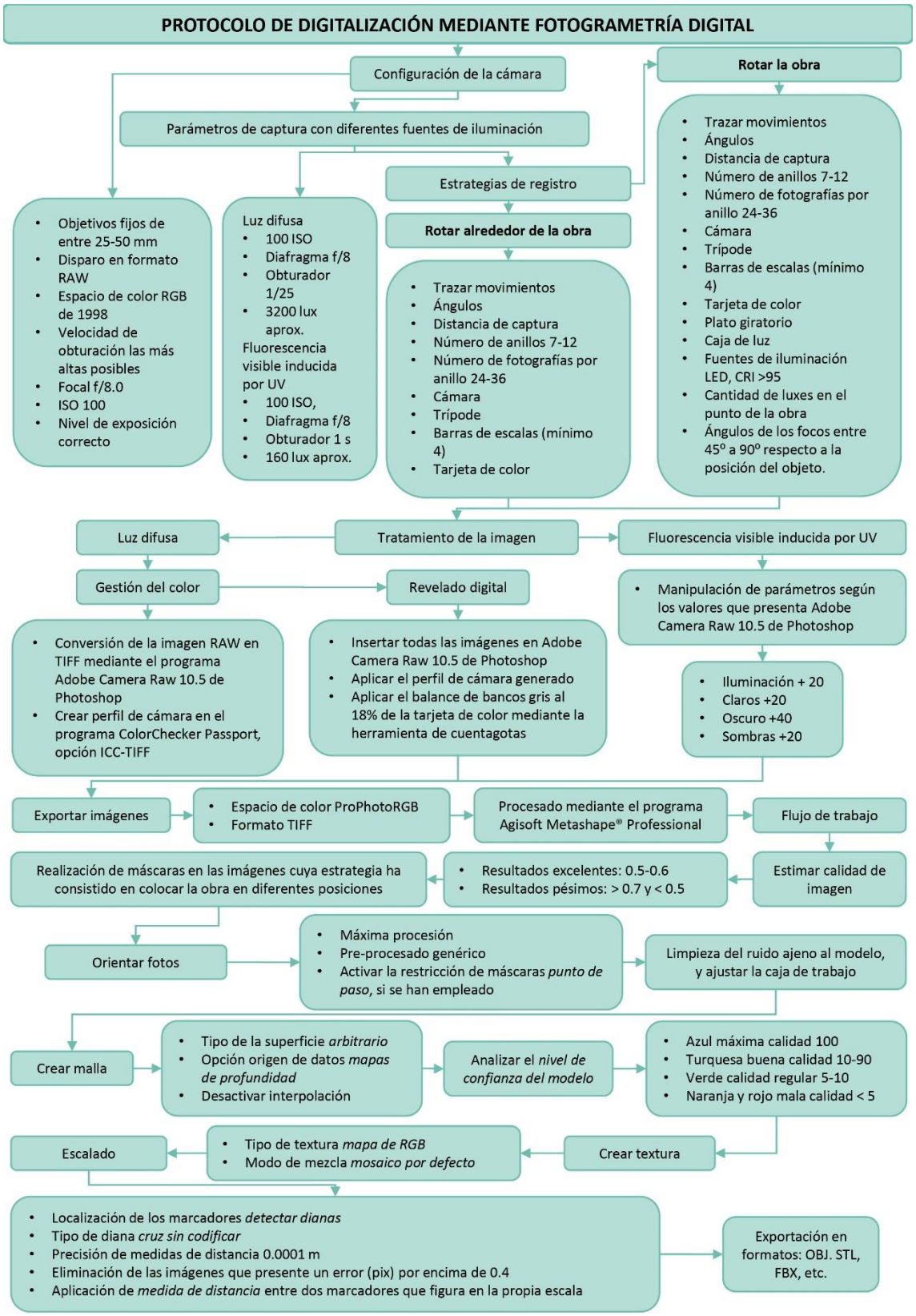


Figura 104. Protocolo de digitalización 3D mediante la fotogrametría. © Emanuel Sterp Moga.

4.3. Análisis comparativo del modelo escaneado con el fotogramétrico

Tras analizar las dos estrategias de digitalización empleadas, en esta investigación se han podido comprobar las diferentes ventajas y desventajas de cada técnica. Asimismo, se ha analizado el potencial que brindan ambos sistemas, sacándole el máximo partido con vistas a diversos tratamientos virtuales y de impresión 3D.

Ha quedado patente la alta resolución que se obtiene en la malla mediante los escáneres de luz estructurada (figura 105 a) si la comparamos con la malla de la fotogrametría (figura 105 b). La elevada calidad en la malla cobra especial interés para realizar el seguimiento del estado de conservación, anastilosis virtual, reintegraciones volumétricas, diseños de moldes o estructuras auxiliares, entre otras aplicaciones. Por otro lado, la fotogrametría ha demostrado ser una técnica pionera para obtener resultados muy realistas en la textura de color (figura 105 d), resultados que los escáneres eran incapaces de lograr (figura 105 c). La obtención de la textura de color fidedigna cobra especial interés para los tratamientos de limpieza virtual, reintegración cromática, elaboración de cartografías de patologías 3D, así como la difusión de modelos optimizados en plataformas web o mediante renderizados.

Se ha comprobado que ninguna de las dos técnicas de digitalización es capaz de lograr la máxima calidad en la malla y en la textura de color. Por este motivo, según la aplicación requerida se ha recurrido a un modelo u otro.

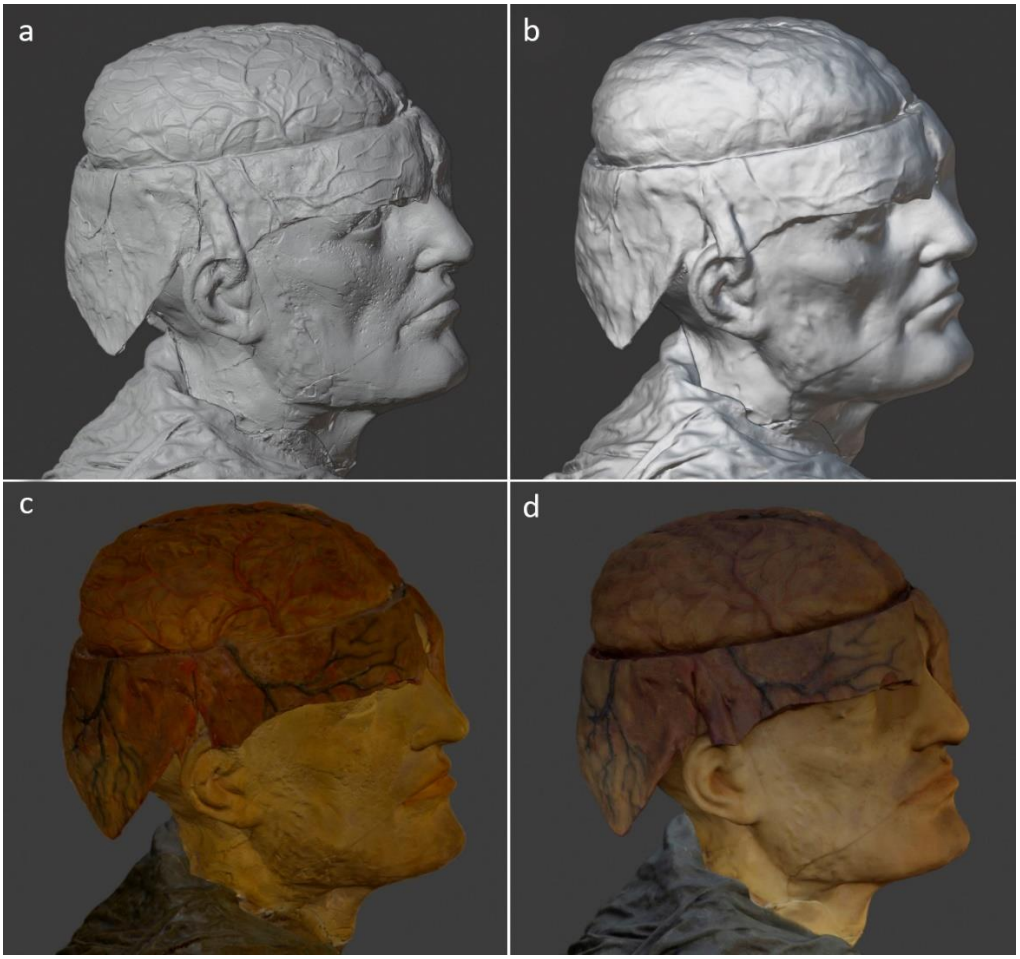


Figura 105. Comparación de la malla y textura de color entre las dos herramientas de digitalización empleadas. a) Malla escáner. b) Malla fotogrametría. c) Textura escáner. d) Textura fotogramétrica. © Emanuel Sterp Moga.

4.4. Registro de patologías y procesos de conservación-restauración mediante cartografías digitales 3D

Las cartografías de patologías desarrolladas en el programa informático Adobe Substance 3D Painter se han agrupado en dos tipologías. La primera comprende las alteraciones de carácter estructural (fisuras, microfisuras, grietas, fracturas, pérdidas volumétricas, abrasión/desgaste, exfoliación y adiciones de adhesivos y pasta de cera). La segunda alude a los daños que afectan a la estética de la obra (depósitos de suciedad o particulado atmosférico, oxidación de la película filmógena, lagunas en la capa filmógena, micro-grietas en la capa filmógena, repintes y daños mecánicos de carácter superficial).

El flujo de trabajo elegido ha facilitado en todo momento la tarea. Se han organizado por grupos de alteraciones o intervenciones y, a su vez, cada una de estas se ha separado en una capa diferente. Durante el desarrollo de las cartografías ha sido muy importante contemplar el modelo virtual 3D desde diferentes puntos de vista, así como comparar cada zona determinada tanto con el modelo de luz visible como con fluorescencia visible inducida por radiación UV (figura 106). El fenómeno de fluorescencia ha permitido observar en diferentes materiales, anomalías complejas sobre la superficie del modelo y marcar con rigurosidad el área que abarcan.

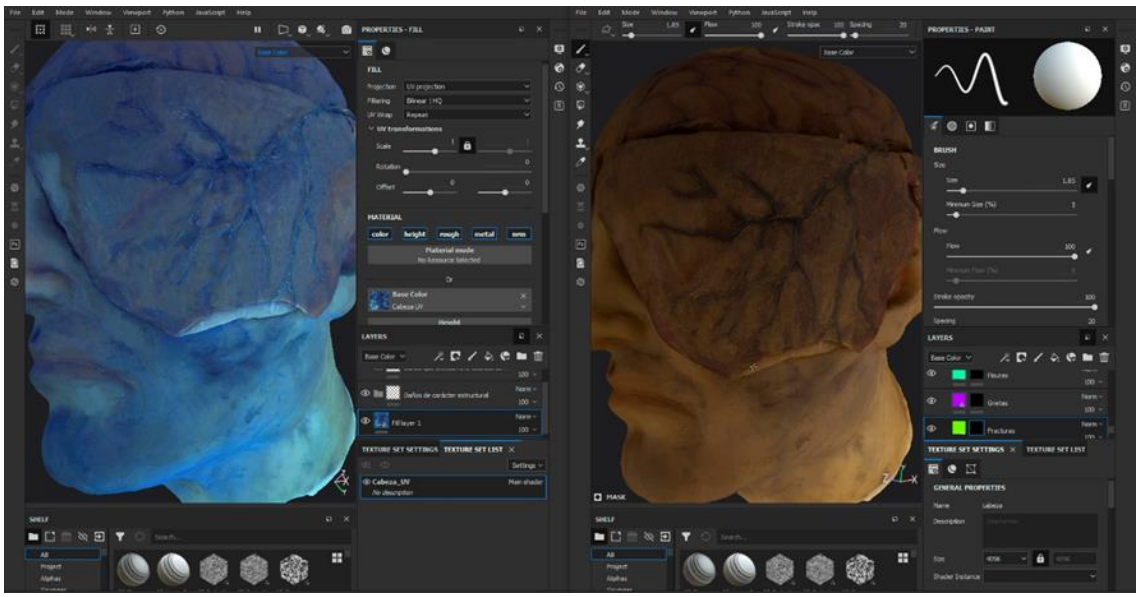


Figura 106. Análisis de las alteraciones mediante el modelo de luz visible y fluorescencia visible inducida por radiación UV. © Emanuel Sterp Moga.

El examen y la documentación de la luminiscencia inducida por radiación UV han sido esenciales en el proceso de registro para diagnosticar el estado de conservación de los modelos artificiales seleccionados en esta investigación. Este método ha posibilitado conocer detalles importantes acerca de la manufactura de las esculturas, así como de sus procesos de envejecimiento y de degradación a lo largo de su historia material por medio de las diferentes respuestas que tienen los compuestos orgánicos e inorgánicos ante la excitación molecular con las ondas visibles de UV. Sin embargo, cabe destacar que a pesar de ser una valiosa herramienta que ayuda a identificar barnices y pigmentos con carácter general, no puede constituir por sí sola un medio definitivo para determinar los materiales constitutivos, ya que se precisa también de estudios científicos que permitan llevar cabo la caracterización físico-química de los mismos.

Gracias a la luminiscencia foto-inducida se han conseguido diferenciar aparentemente dos películas filmógenas. La primera corresponde a una capa homogénea con una fluorescencia de un color verde poco brillante que varía ligeramente de intensidad dependiendo del grosor del estrato. Respecto a la segunda película, que se sitúa en un nivel superficial, la luminiscencia se torna en la misma tonalidad que la anterior pero más brillante. Estas zonas coinciden con la acumulación de un exceso del material aplicado con posterioridad y de modo bastante irregular. En ambos casos la película podría estar indicando que se trata de una resina natural del tipo colofonia (figura 107).

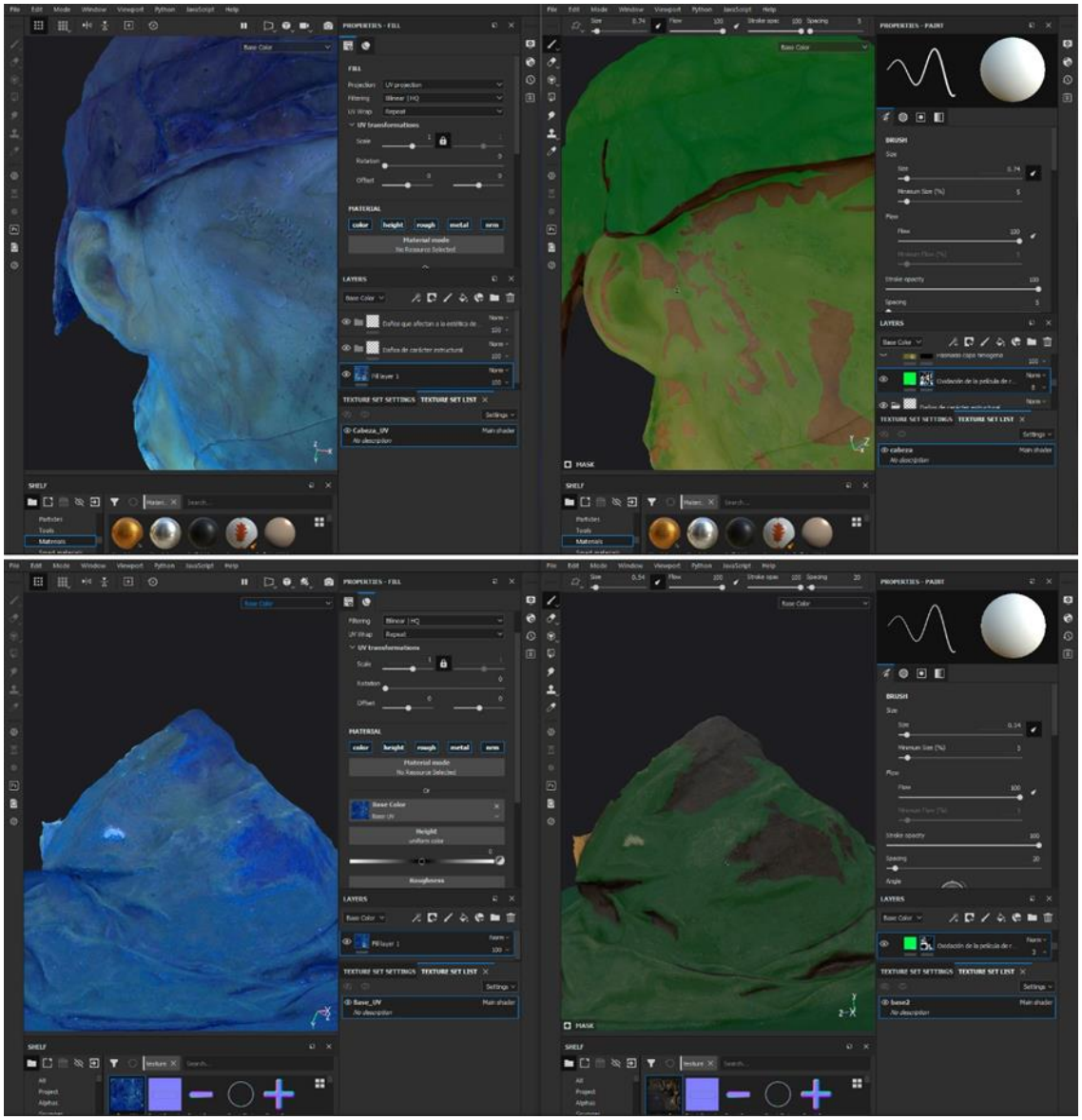


Figura 107. Proceso de señalización de la película filmógena oxidada. © Emanuel Sterp Moga.

En aquellas partes del modelo anatómico en las que la pasta cérea empleada como soporte no presenta películas filmógenas, se ha observado una ligera fluorescencia de la cera, con predominio de un tono verdoso. Es probable que dicho fenómeno se deba a la presencia de algún pigmento, como el blanco de plomo, que habitualmente se incorporaban a la pasta de cera líquida para teñirla en función del órgano o parte anatómica a reproducir. Dicha fluorescencia también podría deberse en parte por la adicción de la esencia de trementina a la pasta de cera (figura 108).

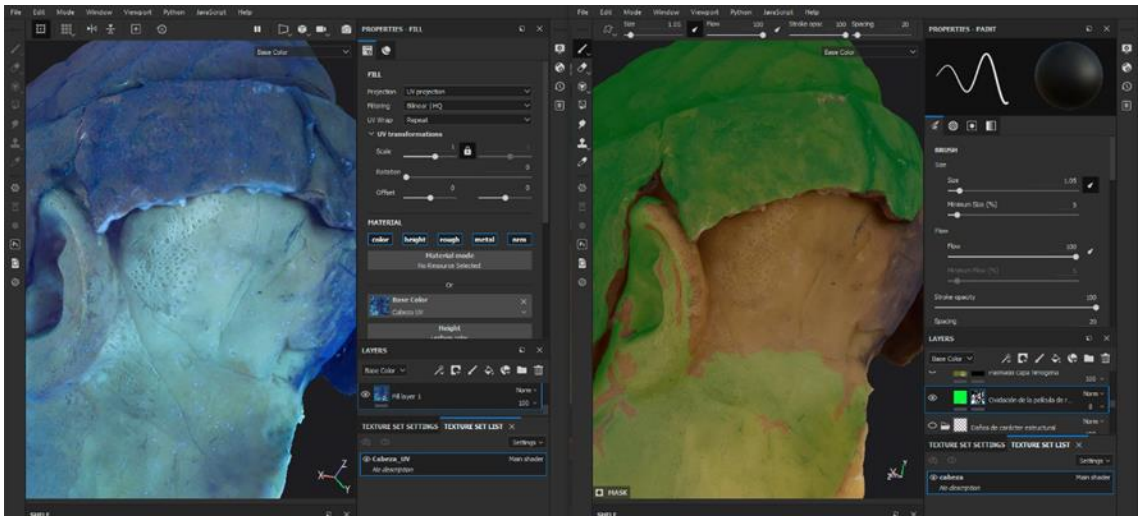


Figura 108. Proceso de señalización de la película filmógena oxidada. © Emanuel Sterp Moga.

Algunos detalles, como por ejemplo fisuras en la película filmógena (figura 109 a) o pequeñas pérdidas (figura 109 b), que se apreciaban con dificultad en el modelo 3D obtenido con luz visible, se han podido identificar y localizar con mayor grado de precisión gracias al estudio llevado a cabo con fluorescencia visible inducida por radiación UV.

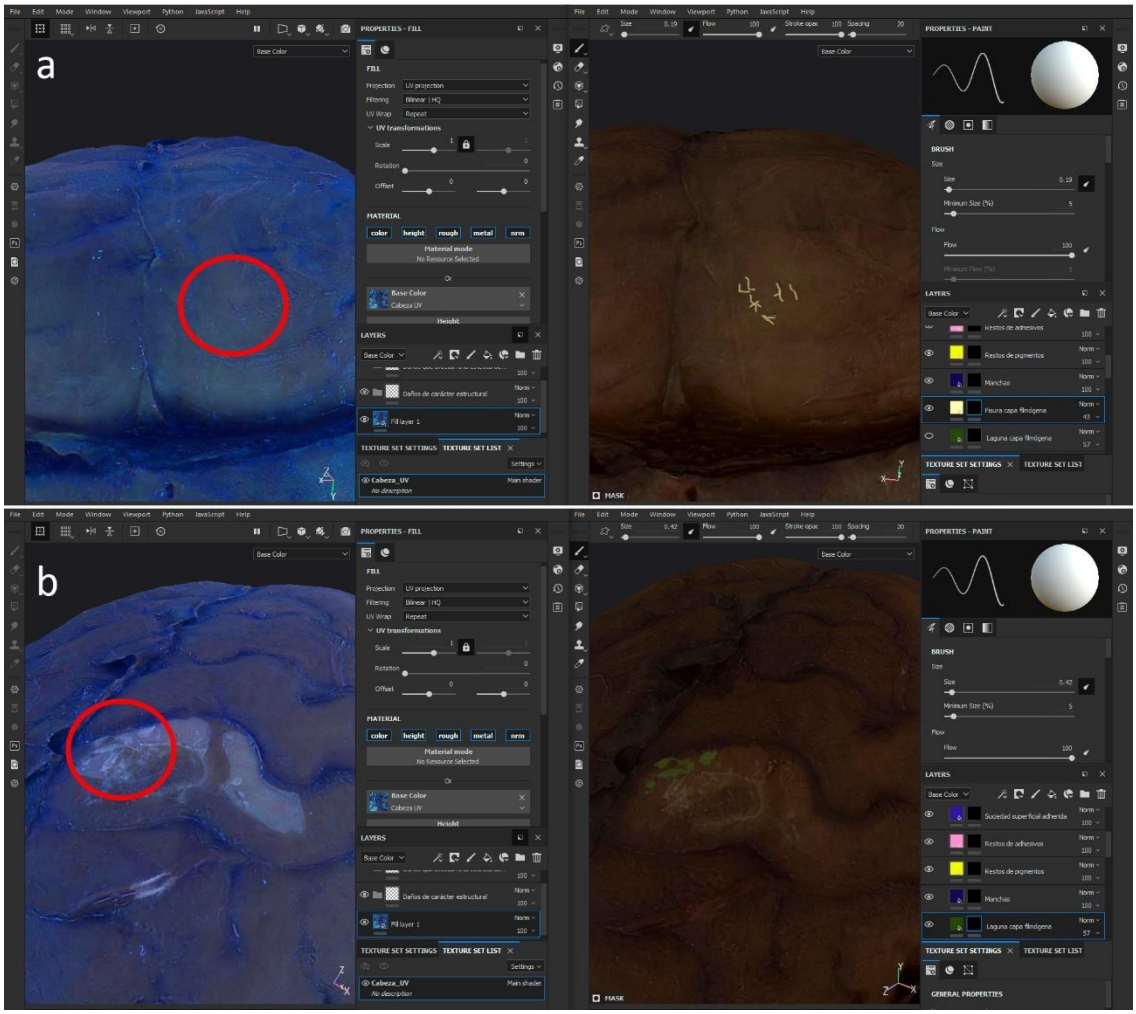


Figura 109. a) Proceso de señalización de las fisuras en la película filmógena. b) Proceso de señalización de la pérdida de material ceroso. © Emanuel Sterp Moga.

Aparte de la identificación de las características técnicas y de los procesos de evolución de los materiales constitutivos originales, se han identificado restos de adhesivos (figura 110 a) y la presencia de repintes (figura 110 b) realizados en intervenciones anteriores. En la figura 111 se puede contemplar los modelos 3D completos.

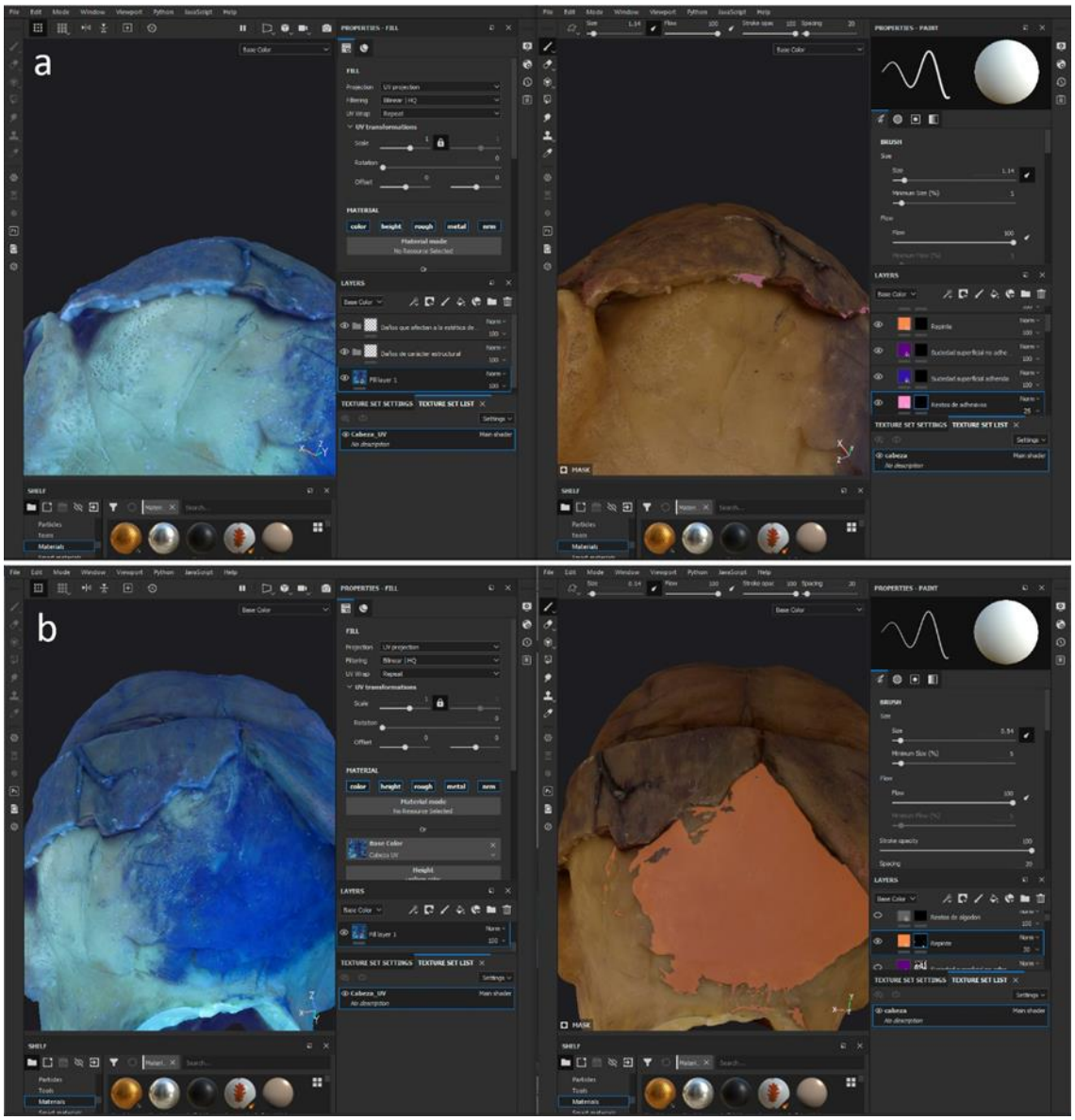


Figura 110. a) Proceso de señalización de los restos de adhesivos. b) Proceso de señalización de los repintes. © Emanuel Sterp Moga.

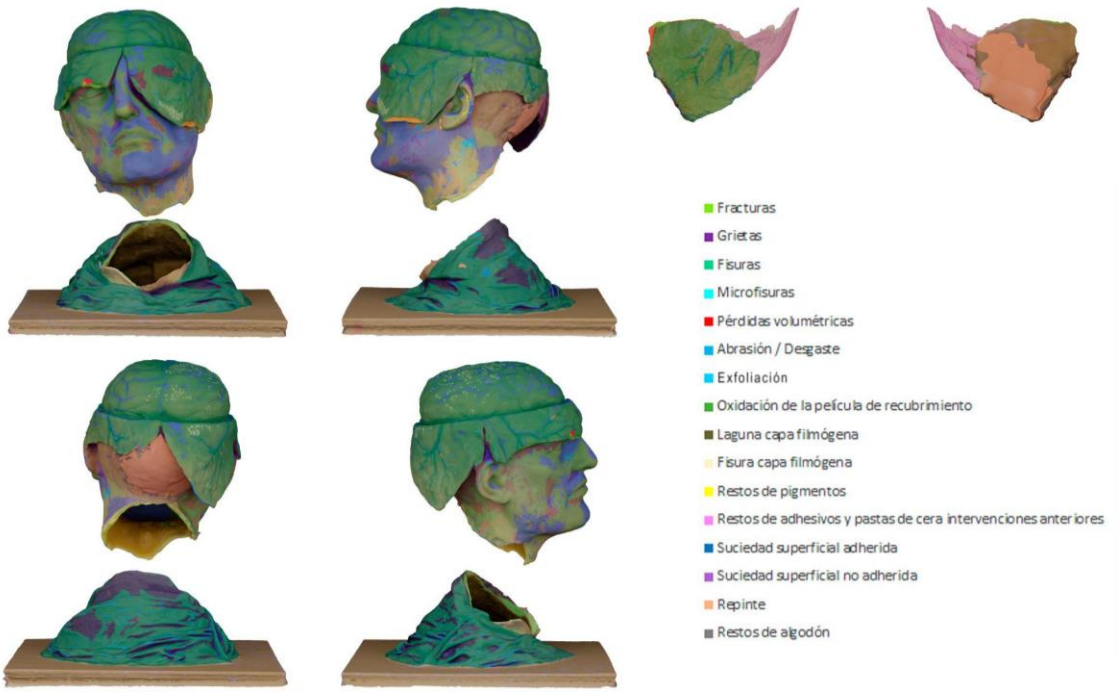


Figura 111. Cartografía de patologías (Ver modelo 3D). © Emanuel Sterp Moga.

Respecto a las cartografías de los procesos de conservación–restauración, se han organizado en dos grupos. El primero recoge las intervenciones de conservación curativa (adhesión de fragmentos, consolidación de grietas, consolidación de fisuras, consolidación de microfisuras, adhesión de fragmentos y reintegraciones volumétricas). El segundo contiene las intervenciones de restauración (limpieza de la suciedad superficial no adherida, limpieza de la suciedad superficial adherida, remoción de las películas filmógenas, eliminación de repintes, remoción de las pastas de adhesivos añadidos y la reintegración cromática) (figuras 112 y 113).

Las intervenciones necesarias se han identificado y planteado con el mismo grado de detalle que en el caso anterior, gracias al análisis en profundidad de los modelos 3D de luz visible y fluorescencia visible inducida por radiación UV.

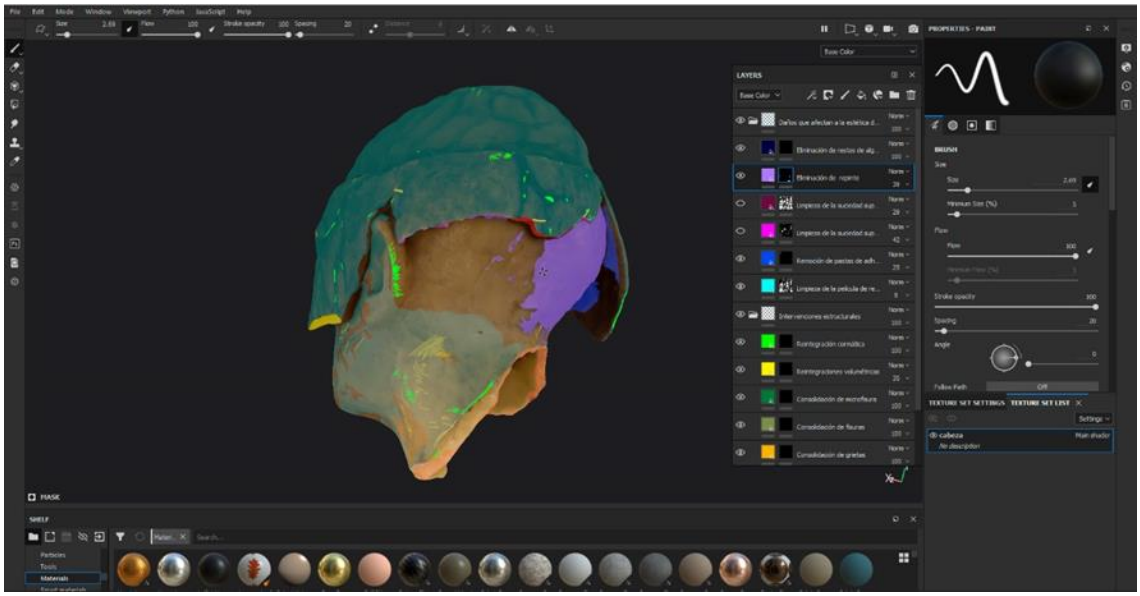


Figura 112. Señalización de los procesos de conservación-restauración. © Emanuel Sterp Moga.

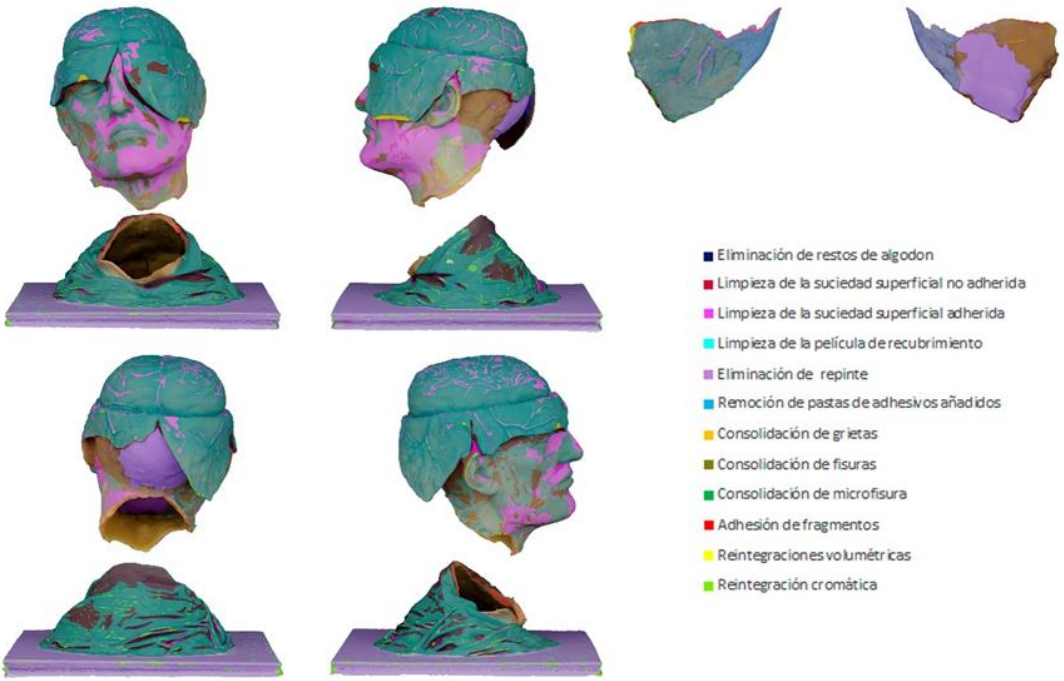


Figura 113. Cartografía de procesos de conservación–restauración (Ver modelo 3D). © Emanuel Sterp Moga.

A continuación, en la figura 114 se recoge el modelo de protocolo de actuación desarrollado para la creación de cartografías 3D de patologías y los tratamientos de conservación–restauración.

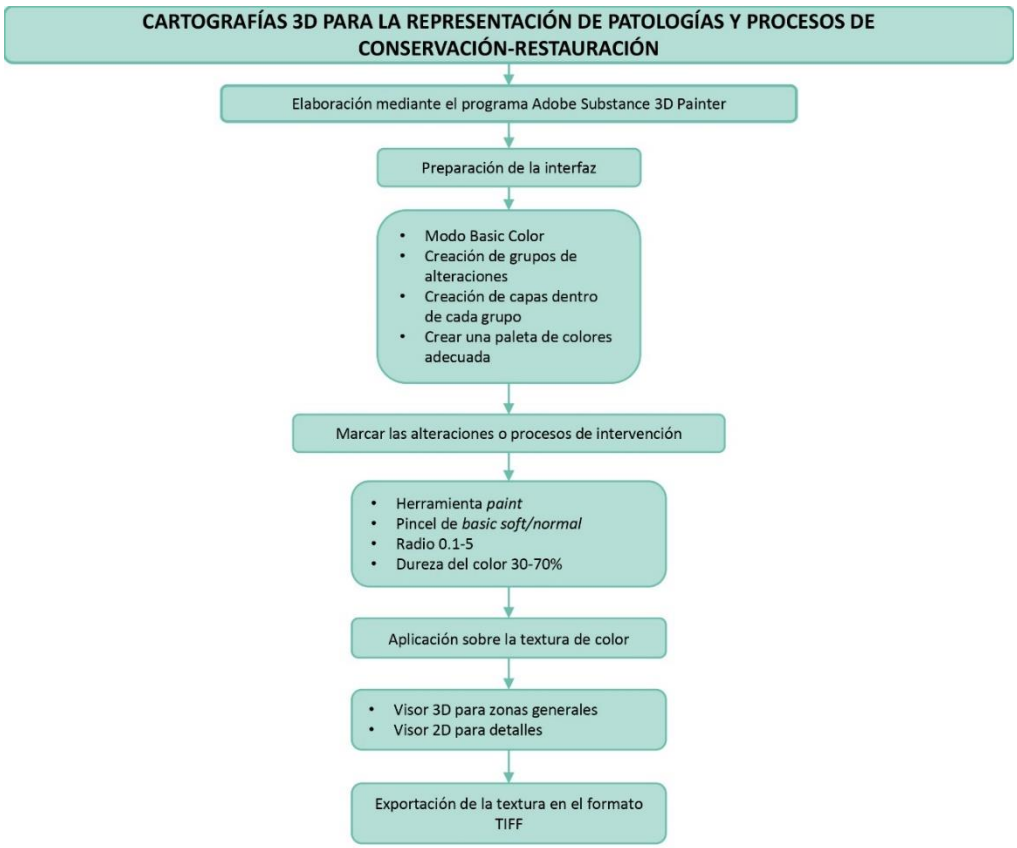


Figura 114. Protocolo de elaboración de las cartografías 3D para la representación de patologías y procesos de conservación–restauración. © Emanuel Sterp Moga.

4.5. Análisis dimensional de la manufactura y seguimiento del estado de conservación

Para el caso concreto enfocado al estudio morfológico y seguimiento del estado de conservación, se han analizado las diferencias entre un mismo modelo 3D obtenido mediante el escaneado y la fotogrametría. Pese a que ninguno de los dos presenta cambios importantes en el volumen, se ha decidido hacer uso de ellos para explorar el potencial de las herramientas de análisis dimensional y mediciones disponibles.

4.5.1. Análisis dimensional

Con el programa informático Artes Studio Profesional 15, durante el proceso de alineado en modo *ajuste óptimo* manual, se han establecido 10 puntos en común entre los dos modelos (figura 115 a), lo que ha permitido alcanzar una alineación precisa (figura 115 b). Se ha observado que el número de puntos coincidentes es determinante, ya que, en este caso concreto, estableciendo solamente 5 puntos en común (figura 115 c) no se logró una buena alineación (figura 115 d).

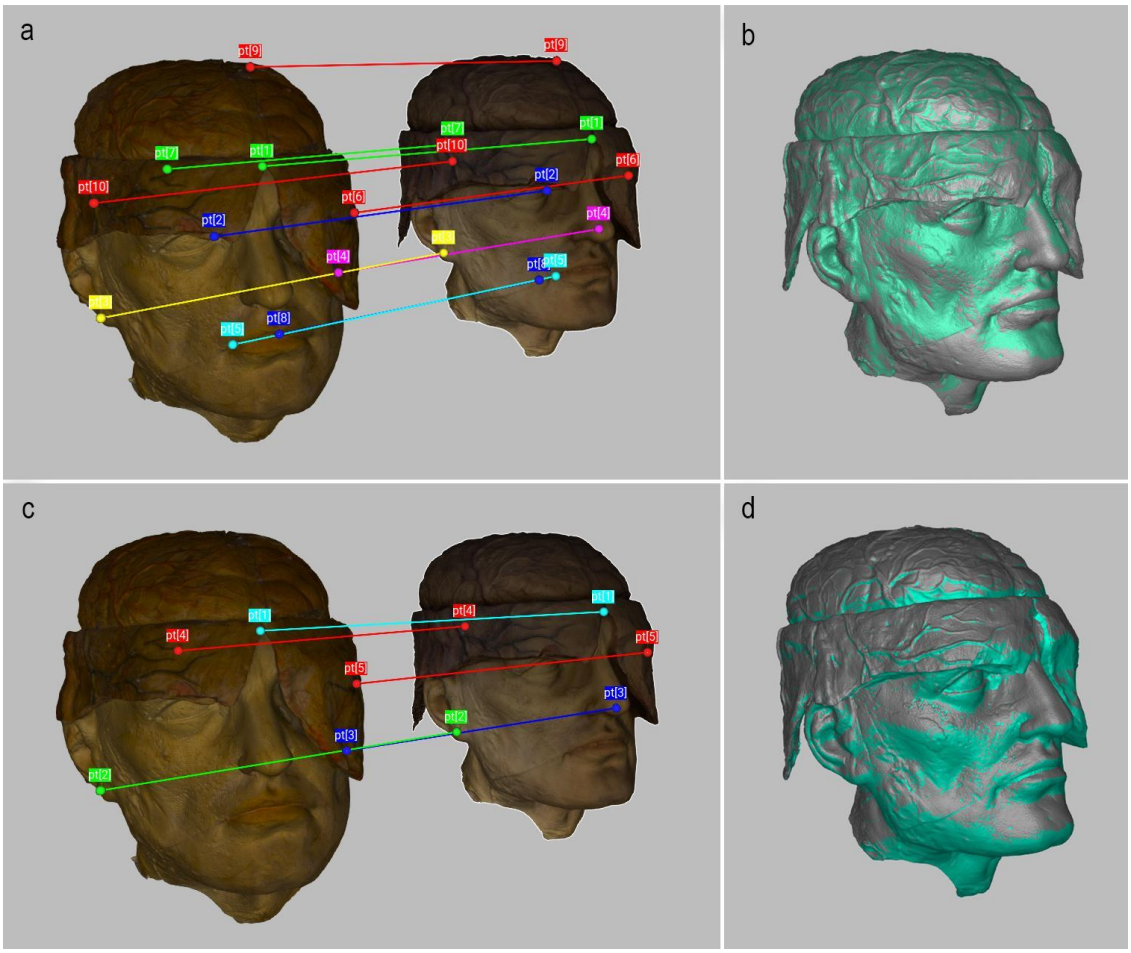


Figura 115. Proceso de alineado del modelo escaneado con el modelo fotogramétrico para su superposición. a) 10 puntos en común. b) Alineación completada. c) 5 puntos en común. d) Alineación completada. © Emanuel Sterp Moga.

Obtener la mejor precisión en la alineación ha sido muy relevante, ya que de este proceso dependen los resultados posteriores.

Tras concluir la alineación, la herramienta *X-Ray* ha permitido observar los dos modelos superpuestos con gran detalle y analizar las posibles pequeñas diferencias entre ellos. El resultado era previsible, puesto que la malla fotogramétrica tiene una calidad inferior a la del escáner. Pero dicha herramienta ha facilitado comprender y visualizar el grado de discrepancia en diferentes partes (figura 116).

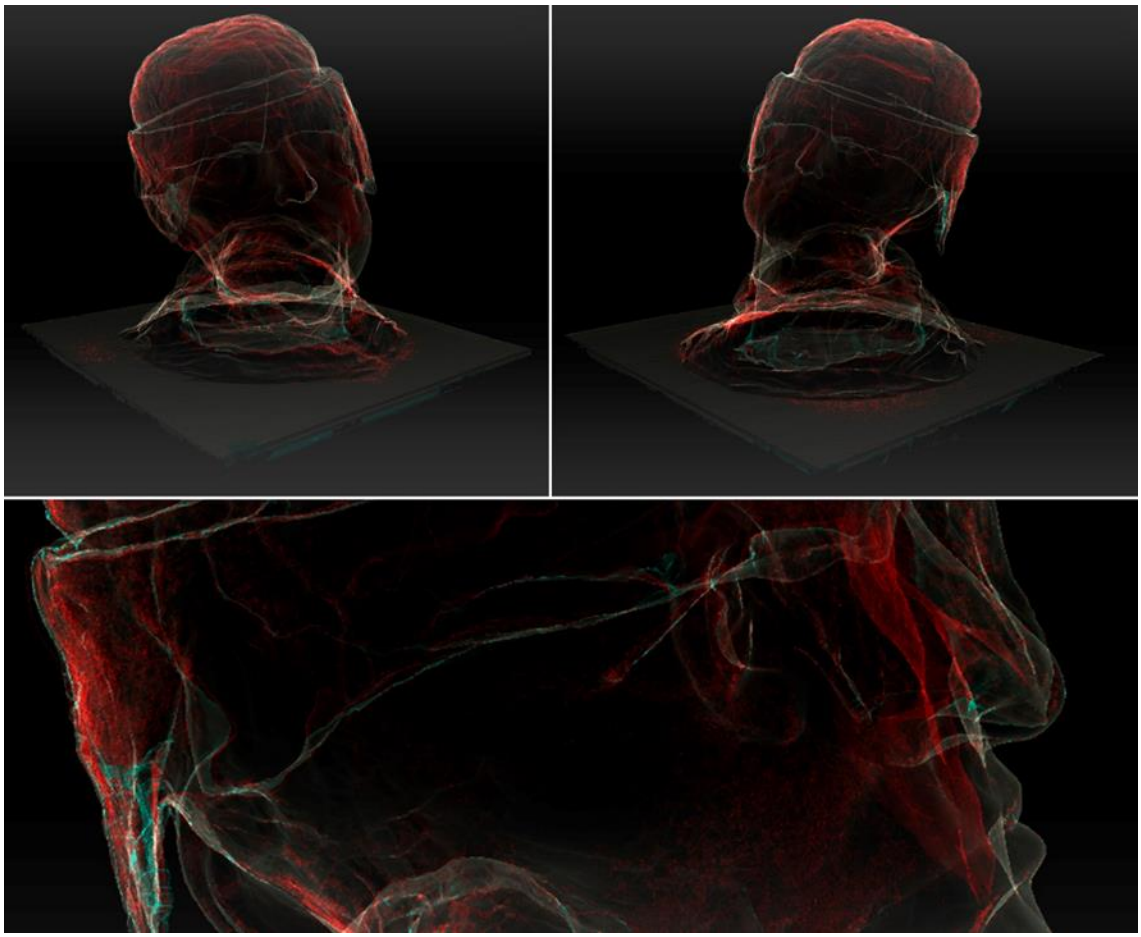


Figura 116. Análisis de la superposición de los dos modelos mediante la herramienta X-Ray. Rojo modelo escaneado. Turquesa modelo fotogramétrico. © Emanuel Sterp Moga.

Mediante la realización de medidas lineales, se han podido determinar las diferencias volumétricas entre las dos mallas (figura 117).

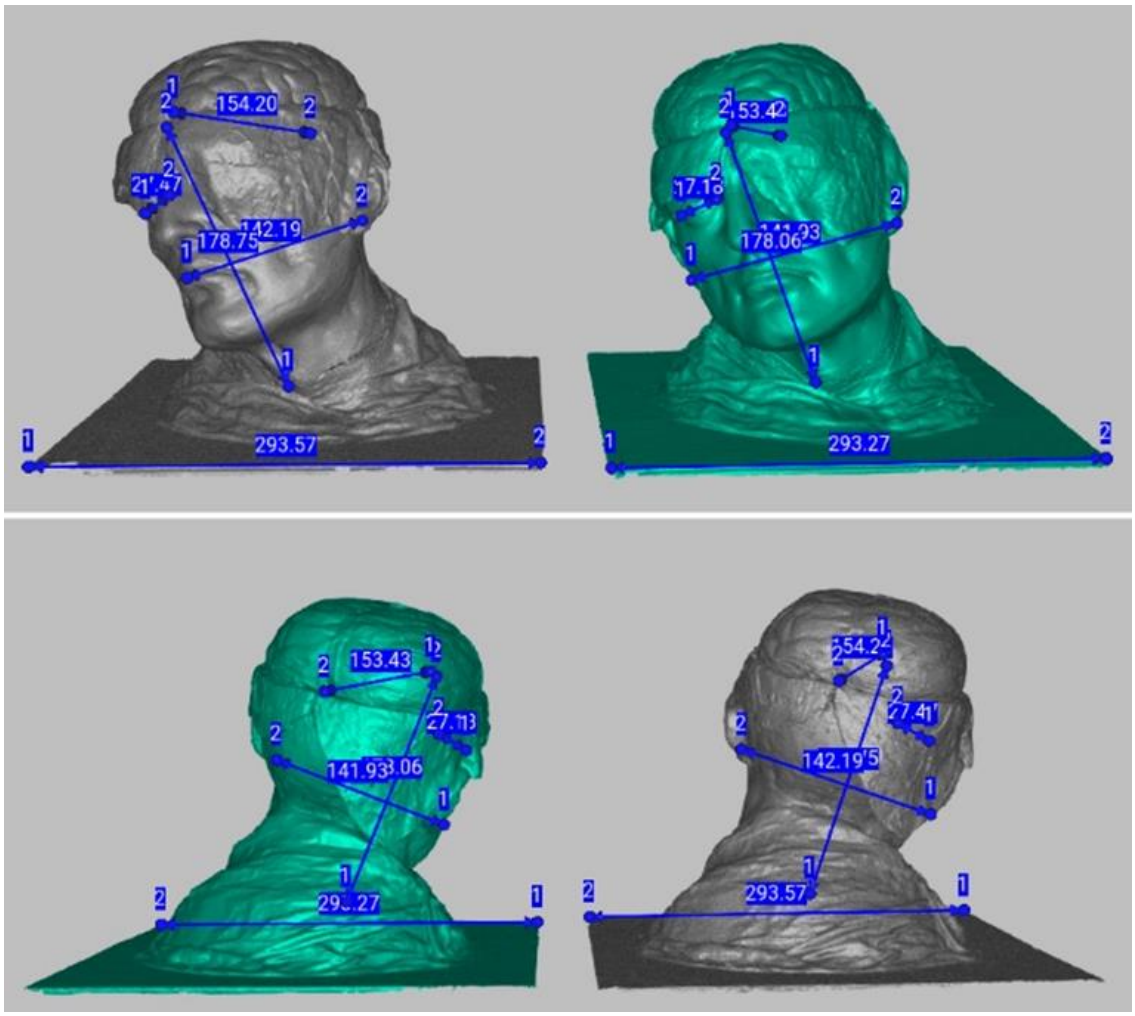


Figura 117. Mediciones lineales de los dos modelos. Gris modelos escaneados. Verde modelo fotogramétrico. © Emanuel Sterp Moga.

Para corroborar con mayor grado de exactitud la corrección de las medidas obtenidas, se procedió a examinar las diferencias volumétricas mediante los *mapas de distancias*. La posibilidad de manipular la tolerancia en la *escala de error*, ha hecho posible analizar en profundidad las diferencias volumétricas a distintas alturas. En el caso de la cabeza, los *mapas de distancias* han revelado un rango de error del modelo fotogramétrico con respecto al modelo escaneado de entre -0.5 mm hasta +0.6 mm, siendo el rango de error en aproximadamente el 80% de la pieza de entre -0.2 y +0.1 mm (figura 118). Ello deja patente el alto potencial que ofrecen estas herramientas cuando se quiere realizar un análisis comparativo. La elevada precisión que permiten alcanzar ha contribuido a la localización e identificación de la más mínima imperfección.

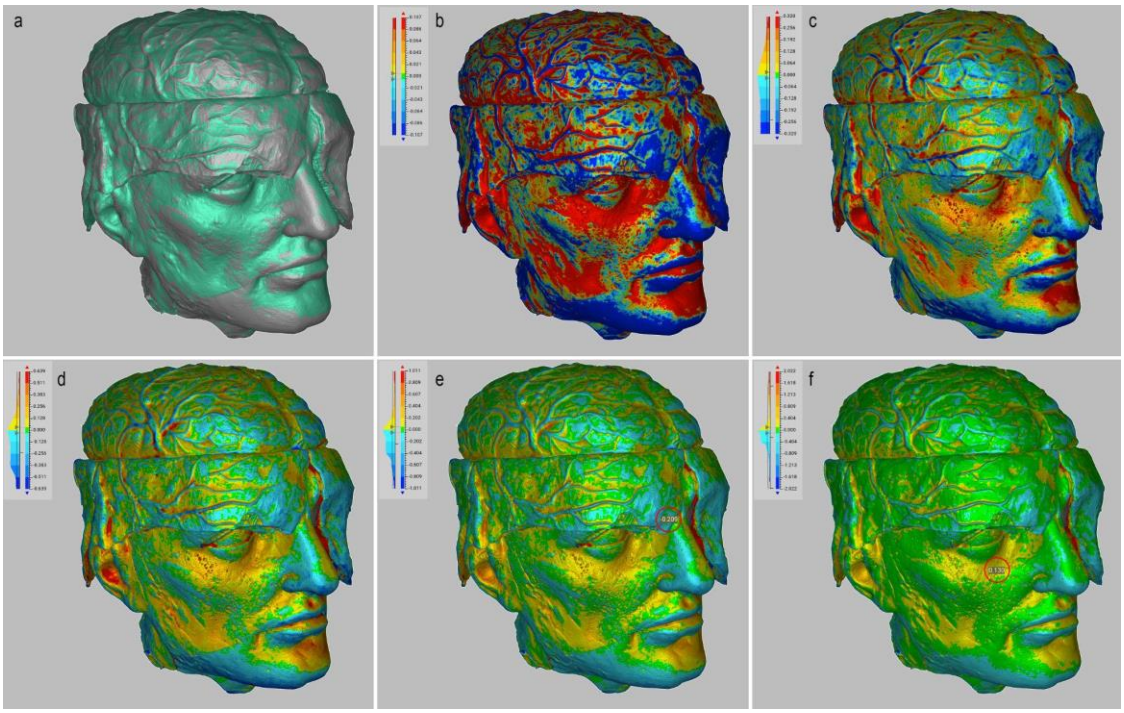


Figura 118. Medición de la diferencia del volumen entre los dos modelos mediante *mapas de distancias*. Distancia de error del modelo fotogramétrico respecto al modelo escaneado. a) Superposición de los modelos. b) Distancia 0.107 mm. c) Distancia 0.320 mm. d) Distancia 0.639 mm. e) Distancia 1.011 mm. f) Distancia 2.022 mm. © Emanuel Sterp Moga.

Aparte de la comparación de ambos modelos, la altísima calidad de la malla obtenida de 0.1 mm con el escáner *Space Spider*, ha permitido hallar ciertas uniones entre las piezas de cera que facilitan la comprensión del proceso de construcción del artefacto. La hipótesis de partida radica en que la obra está compuesta por diferentes piezas unidas y elaboradas con diversas técnicas de construcción. La primera pieza, creada del modelo anatómico, es la cabeza. Esta seguramente se realizó mediante la técnica "molde a la italiana", sobre la cabeza de un ser vivo o muerto, ya que se observa un alto grado de realismo y algunas imperfecciones en la propia técnica del uso de los moldes. Dichos defectos se pueden apreciar con sumo detalle sobre el rostro en zonas puntuales mediante numerosos orificios generados durante el vertido de la cera en el molde (figura 119 a). Una vez obtenida, se ha procedido a eliminar la parte del cráneo para poder colocar el cerebro. Esta segunda pieza, también se ha elaborado con la misma técnica mencionada anteriormente, dado el alto grado de realismo (figura 119 b). Esta pieza ha sido la segunda en colocarse debido a las tiras de refuerzo aplicadas por el interior del modelo (figura 119 c). Una vez reforzada la parte interna, se ha procedido a ubicar el busto sobre la peana de madera. A continuación, para reforzar la zona del cuello y los hombros, se ha colocado la tela encerada y pintada (figura 119 d), dotando de una mejor estabilidad al conjunto. Posteriormente, se han añadido los tejidos blandos revertidos y retirados de la calota craneal, realizados mediante el modelado y tallado de la cera (figura 119 e). Por último, se han colocado los detalles de los vasos sanguíneos y se ha aplicado barniz sobre la superficie (figura 119 f).

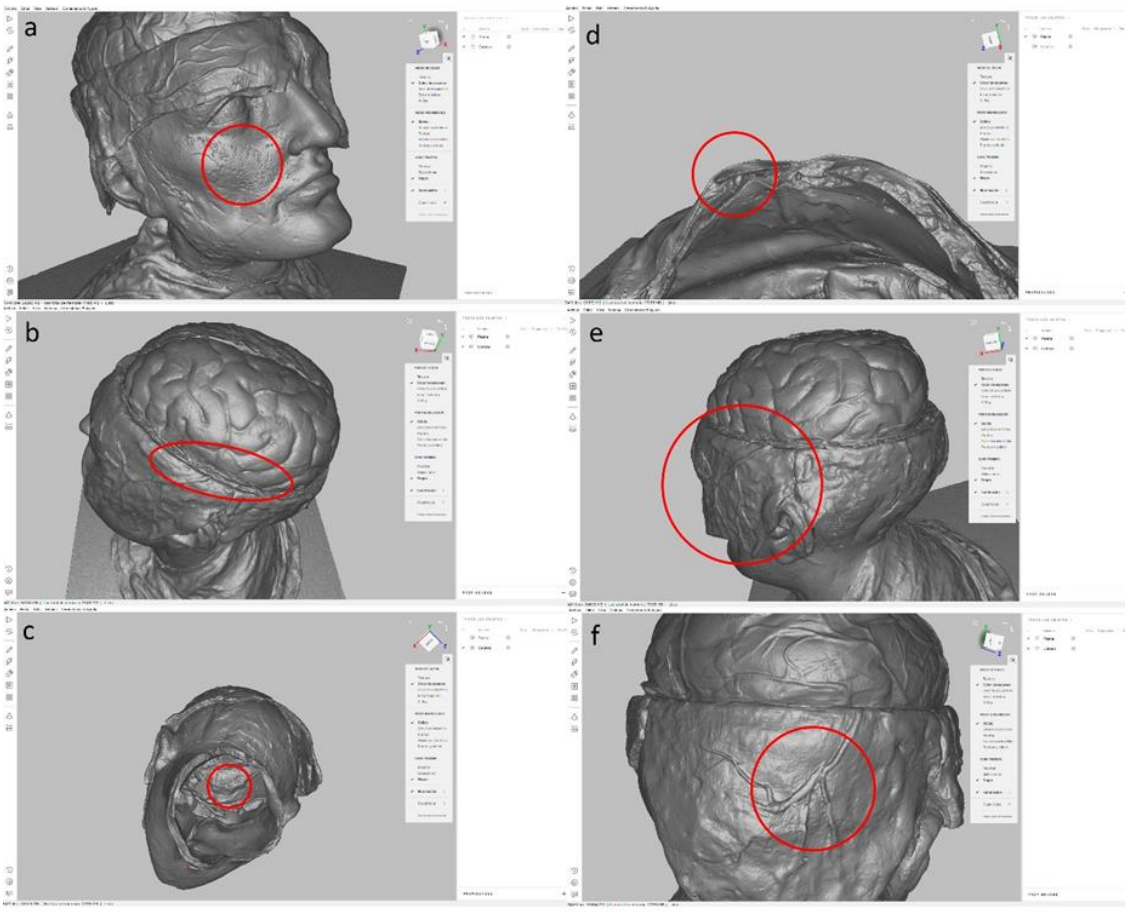


Figura 119. Análisis de la composición y fases de la construcción del modelo anatómico. © Emanuel Sterp Moga.

4.5.2. Seguimiento del estado de conservación

Durante las mediciones geodésicas de las alteraciones, dada la dificultad de trabajar con la malla densa obtenida en el modelo escaneado (14 millones de polígonos), ya que colapsaba el programa, se simplificó esta de forma escalonada reduciendo el número de polígonos sucesivamente. Al comparar unos modelos con otros por medio de los *mapas de distancias*, se pudo comprobar que, a partir de 2 millones de polígonos, el modelo sufre considerables modificaciones en la malla y, por tanto, en el volumen y la calidad de la obra. El modelo con este número de polígonos se descartó directamente. Respecto a los resultados de los modelos de 3 millones de polígonos, se aprecia una ligera pérdida en los detalles (figura 120). Para las mediciones precisas de las alteraciones, este tipo de mallas también quedarían descartadas, ya que modifica mínimamente los detalles más sutiles de las fracturas o grietas. En los modelos de 10, 7 y 5 millones de polígonos no se han detectado cambios dimensionales, ni tampoco en los detalles, por lo que finalmente se recurrió al modelo más ligero de 5 millones de polígonos.

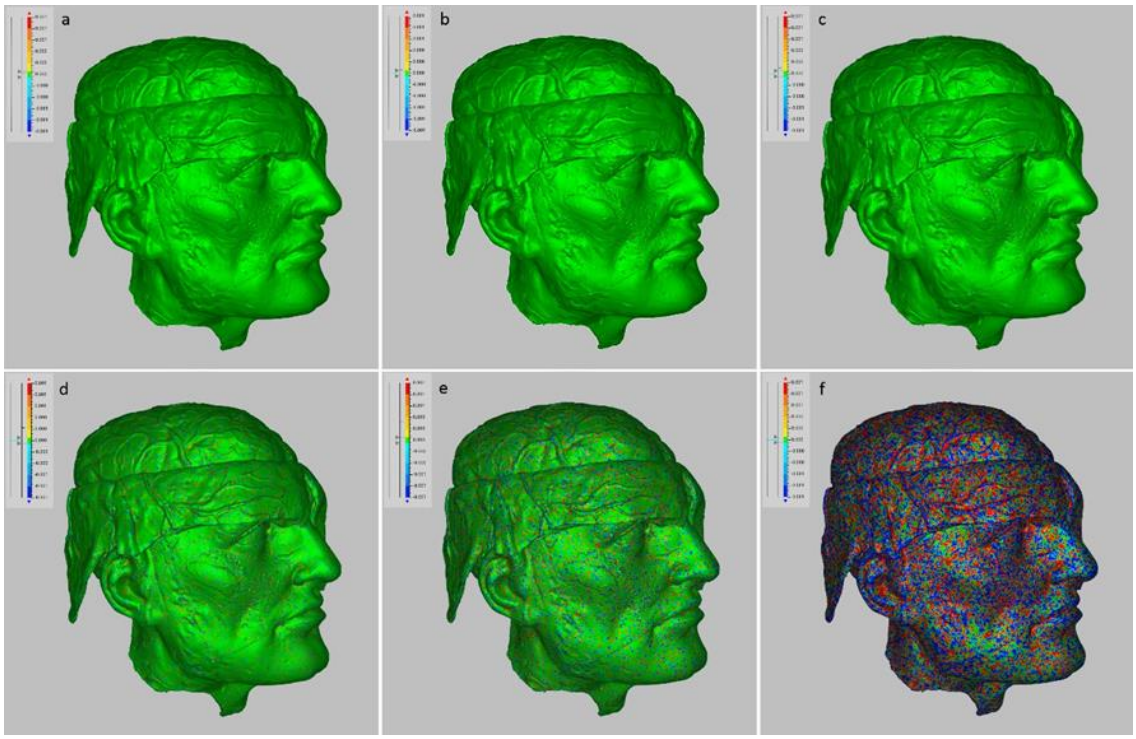


Figura 120. *Mapas de distancias* con una escala de error de 0.001 mm. a) 10 millones de polígonos. b) 7 millones de polígonos. c) 5 millones de polígonos. d) 3 millones de polígonos. e) 2 millones de polígonos f) 1 millones de polígonos. © Emanuel Sterp Moga.

La reducción de la malla aplicada para poder realizar las mediciones geodésicas, ha facilitado un trazo más controlado, ya que el número de vértices se ha reducido respecto al modelo inicial. El modo de visualización de malla denominado *alámbrica más sólido* ha sido clave para poder trazar una trayectoria exacta sobre las alteraciones (figura 121). A partir de los numerosos puntos aplicados a lo largo de toda la grieta, se ha establecido una distancia máxima entre punto y punto de tres vértices. Con ello, se ha logrado controlar en todo momento el recorrido de las líneas, ajustándose estas perfectamente a la superficie de la zona alterada (figuras 122 y 123).

Cabe destacar que, durante el seguimiento del estado de conservación, al obtenerse modelos con diversas mallas a causa de la digitalización en diferentes momentos, estas se han de comparar siempre en las mismas condiciones, es decir, se tiene que reducir la malla a los mismos millones de polígonos y realizar las medidas geodésicas o lineales de manera idéntica.

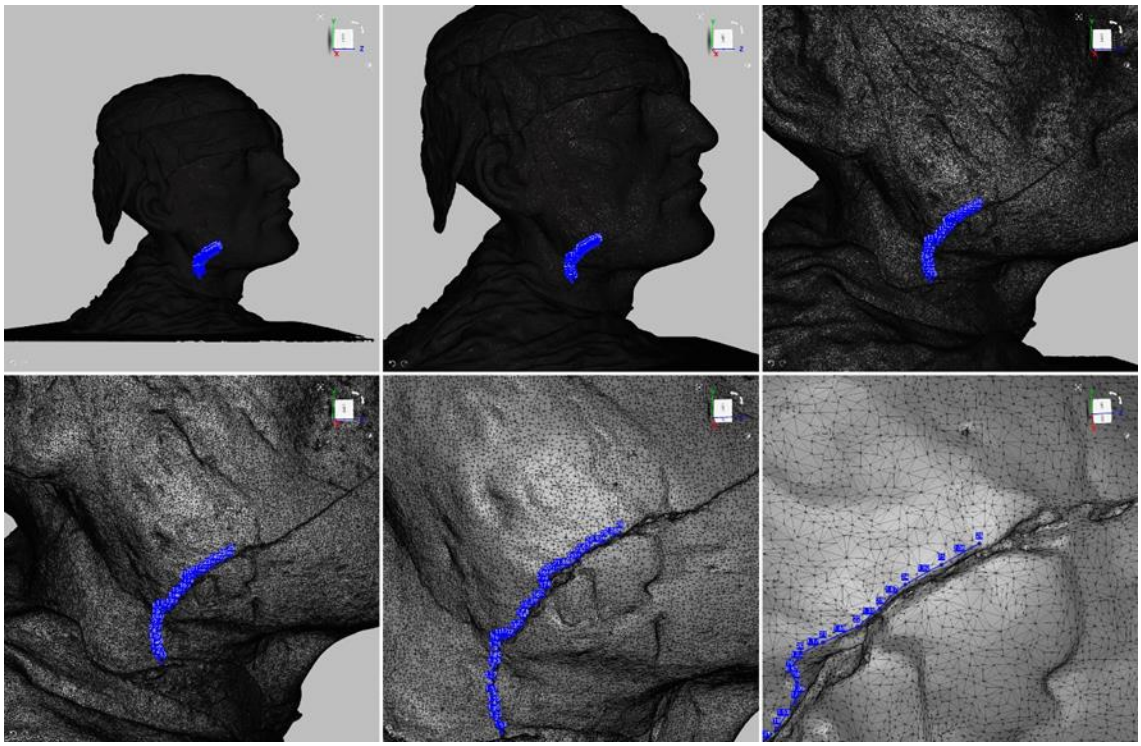


Figura 121. Proceso de medición de la extensión de grietas. © Emanuel Sterp Moga.

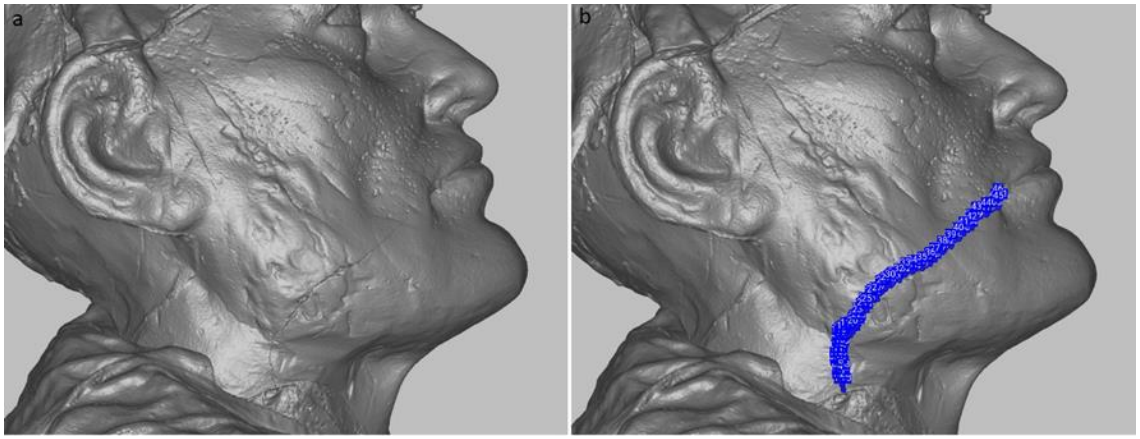


Figura 122. a) Antes de realizar la medición de la grita. b) Después de realizar la medición de la grita mostrando 88 mm de extensión. © Emanuel Sterp Moga.

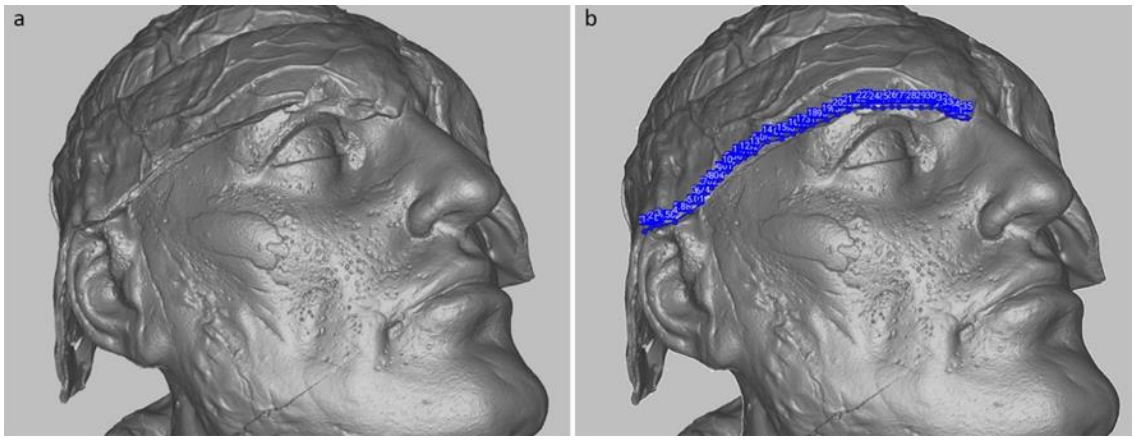


Figura 123. a) Antes de realizar la medición de la fractura. b) Después de realizar la medición de la fractura mostrando 129 mm de extensión. © Emanuel Sterp Moga.

Por último, las diferentes mediciones lineales enfocadas a obtener la distancia de separación de la grieta han ofrecido unos resultados de altísima precisión (figura 124).

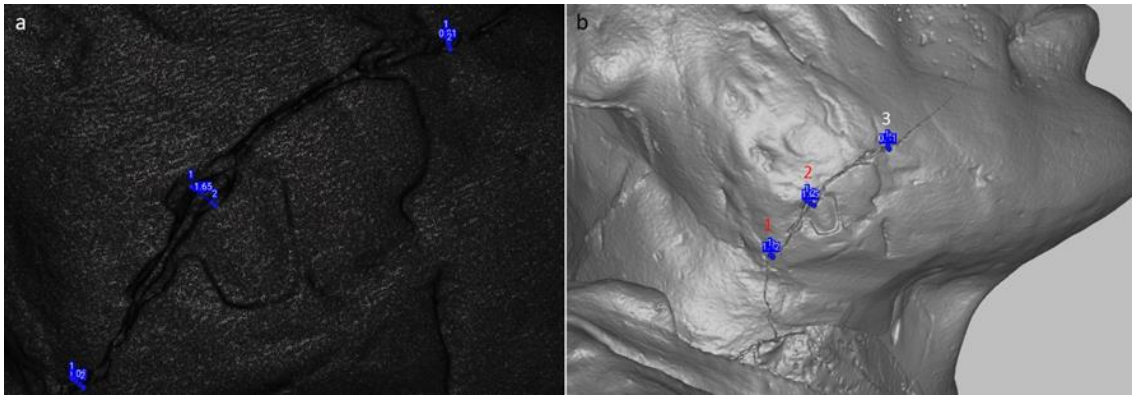


Figura 124. Medición de la distancia de separación. a) Malla sólida con alambre. b) Malla sólida. 1) 1 mm. 2) 1.6 mm. 3) 0.8 mm. © Emanuel Sterp Moga.

A continuación, en la figura 125 se muestra el modelo de protocolo de actuación desarrollado para llevar a cabo el análisis dimensional de la manufactura y el seguimiento del estado de conservación.

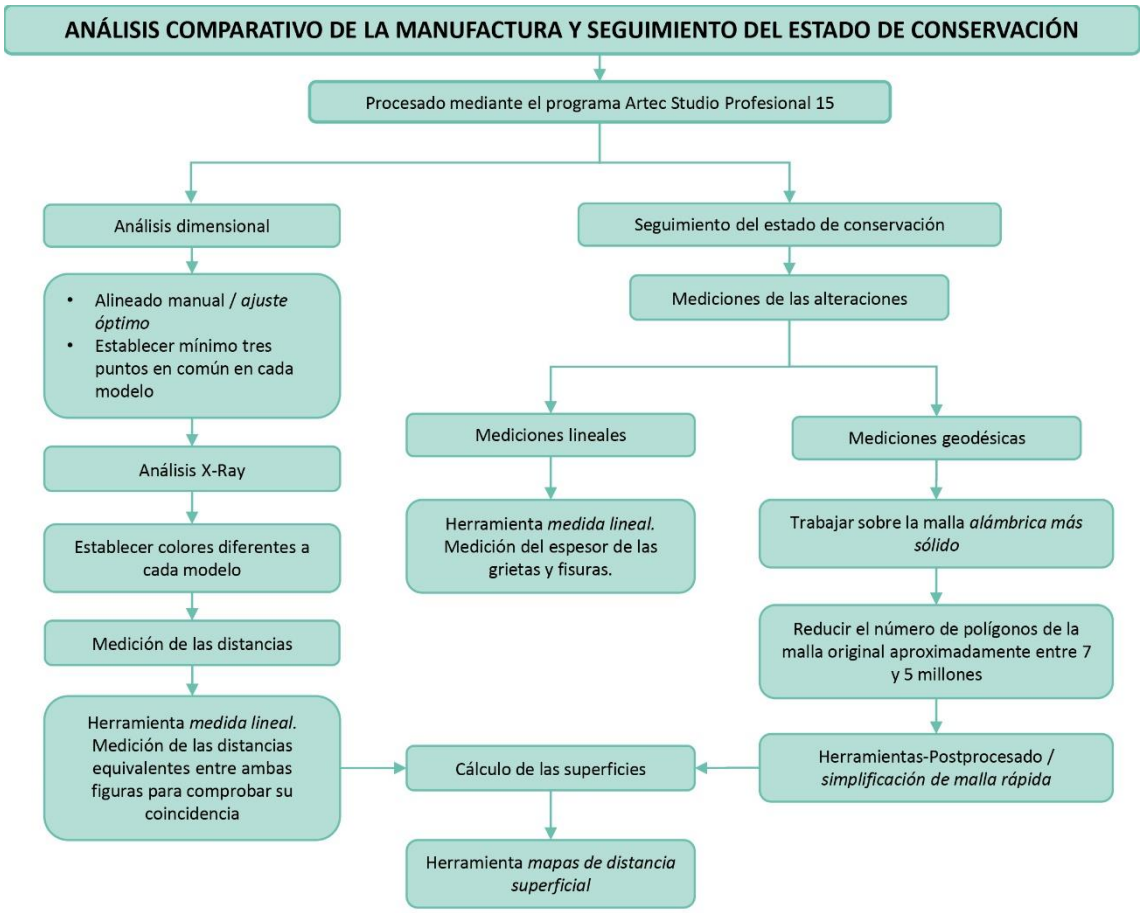


Figura 125. Protocolo de actuación para el análisis comparativo de la manufactura y el seguimiento del estado de conservación. © Emanuel Sterp Moga.

4.6. Restauración virtual

4.6.1. Anastilosis virtual

La anastilosis virtual, realizada en el programa informático Blender, ha sido un proceso muy importante al proporcionar una visión global del estado de conservación (figura 126) y de la magnitud de cada una de las intervenciones. Durante este proceso, se han podido examinar con detalle la ubicación y posición exacta de los fragmentos conservados del modelo. Con ello, se han reducido todos los movimientos innecesarios que se podrían acometer durante la intervención en la obra real y se ha garantizado de esta manera una manipulación más segura (figura 127). Por otra parte, también ha aportado una información muy útil acerca de los medios necesarios para asegurar los fragmentos en la posición exacta durante el proceso de adhesión, permitiendo así diseñar las estructuras auxiliares consideradas imprescindibles para la adecuada estabilización de los mismos (figuras 128 y 129) (Sterp Moga et al., 2020).



Figura 126. Estado de conservación del modelo original con partes del mismo fragmentadas por manipulaciones incorrectas realizadas en el pasado (Ver modelo 3D). © Emanuel Sterp Moga.



Figura 127. a) Estudio de la manipulación y posición de las manos. b y c) Proceso de anastilosis virtual del modelo anatómico (Ver modelo 3D). © Emanuel Sterp Moga.

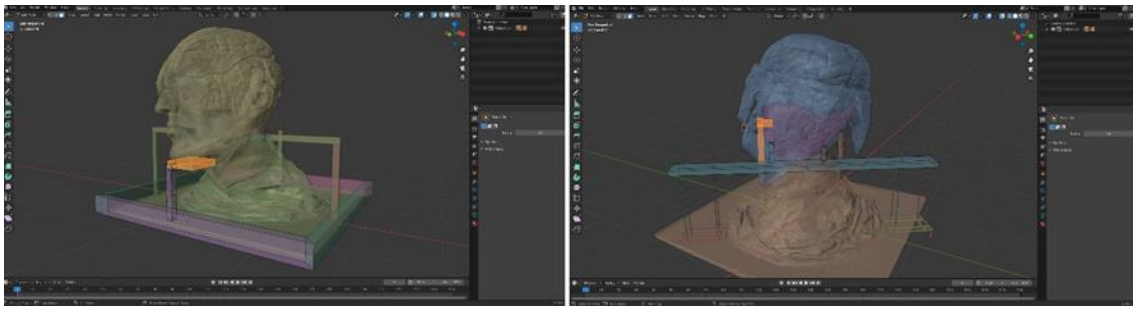


Figura 128. Proceso del diseño de estructuras auxiliares necesarias para realizar la adhesión de fragmentos. © Emanuel Sterp Moga.



Figura 129. Diseño y empleo de estructuras auxiliares necesarias para el proceso de adhesión de fragmentos. a, b, c y d) Estructuras para la adhesión de la cabeza (Ver modelo 3D). e y f) Estructuras para la adhesión del tejido blando revertido y retirado de la calota craneal (Ver modelo 3D). © Emanuel Sterp Moga.

Por último, este proceso ha permitido determinar la manera correcta de realizar las reintegraciones volumétricas de todas aquellas partes que no se conservan y que son imprescindibles para asegurar la estabilidad estructural del conjunto escultórico (figura 130). No obstante, en algún fragmento se han detectado deformaciones del material ceroso que han impedido reubicarlo con exactitud en su sitio de origen (figura 131).

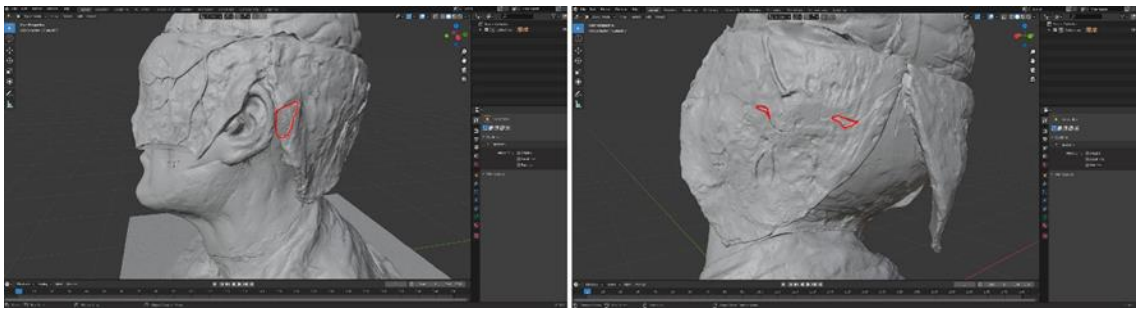


Figura 130. Materia faltante en la unión del fragmento. © Emanuel Sterp Moga.

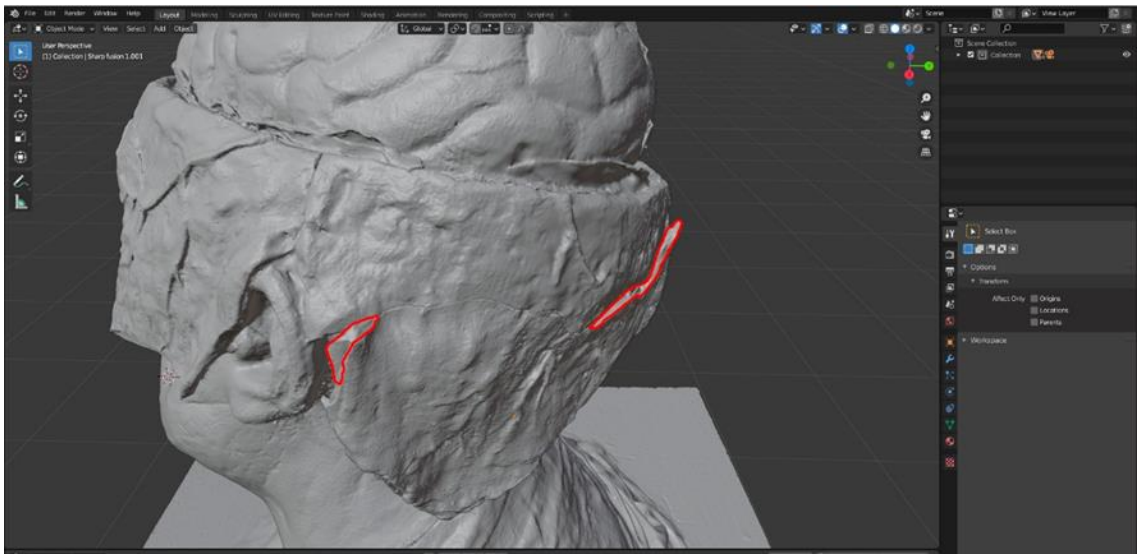


Figura 131. Partes del fragmento deformadas debido a una inadecuada conservación. © Emanuel Sterp Moga.

4.6.2. Limpieza virtual

Los tratamientos irreversibles, como la limpieza de la suciedad superficial, la remoción de películas filmógenas o la eliminación de repintes, han reflejado resultados cuantitativos de cara a la toma de decisiones para la intervención en la obra real.

Las diferentes mediciones de los valores RGB y HSV, efectuadas con el programa informático Adobe Substance 3D Painter, en las zonas donde la superficie cerosa no presentaba suciedad superficial ni película de recubrimiento, se han podido realizar gracias a que dichas áreas estaban ocultas por los tejidos blandos revertidos de la calota craneal, actualmente fracturados (figura 132). Los valores hallados en estos puntos han servido de referencia para compararlos con el resto de las mediciones de otras zonas, las cuales sí presentan suciedad superficial y películas filmógenas oxidadas (figura 133). Con ello, se han estimado los parámetros de referencia a alcanzar en la limpieza virtual esenciales para obtener unos datos rigurosos.

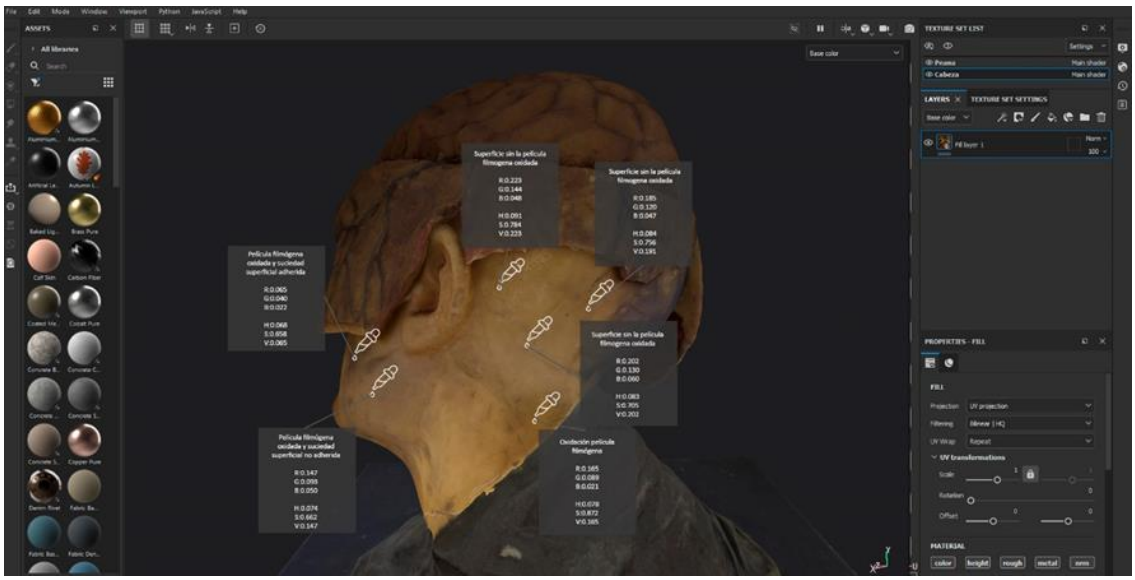


Figura 132. Medición de los valores cromáticos en diferentes zonas de la obra las cuales no presentaba suciedad superficial ni película de recubrimiento oxidadas. © Emanuel Sterp Moga.

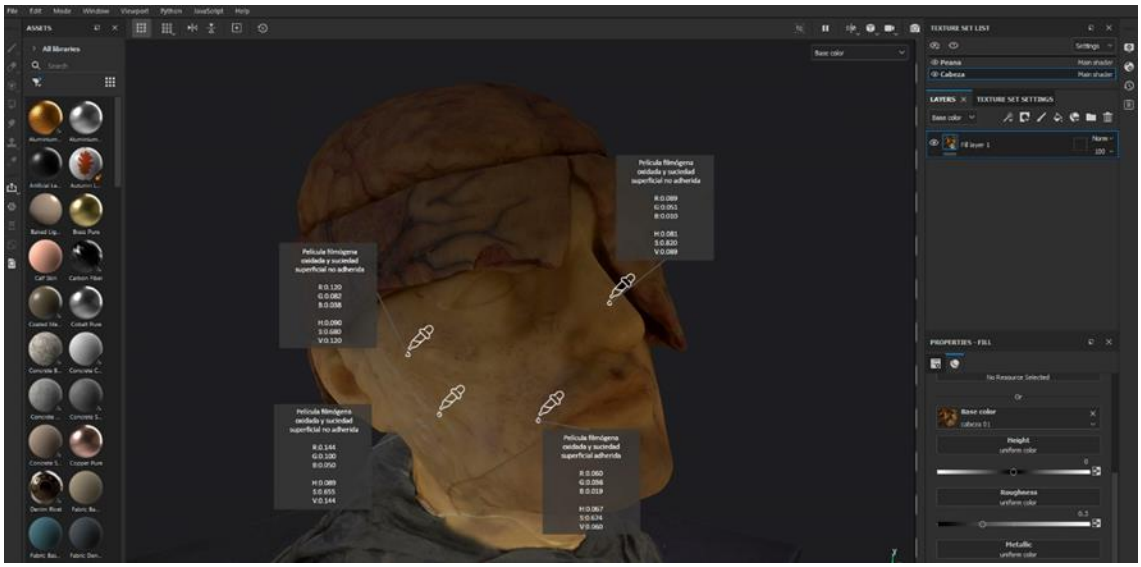


Figura 133. Medición de los valores cromáticos en diferentes zonas de la obra con suciedad superficial y película de recubrimiento oxidadas. © Emanuel Sterp Moga.

A lo largo del proceso de ensayo se han podido alcanzar los resultados necesarios con los valores RGB y HSV de referencia en las áreas precisas, manipulando únicamente en el pincel *paint* el valor V del espacio de color HSV (figura 134). Cada zona y color ha necesitado un ajuste específico en dicho parámetro para alcanzar los valores de limpieza ideales. Estos se han podido desarrollar con fluidez gracias a la posibilidad de trabajar con sucesivas capas en cada una de las fases de limpieza. El modo de fusión *overlay* ha sido de gran utilidad, ya que ha permitido respetar al máximo la textura de color sin alterarla ni crear resultados arbitrarios.

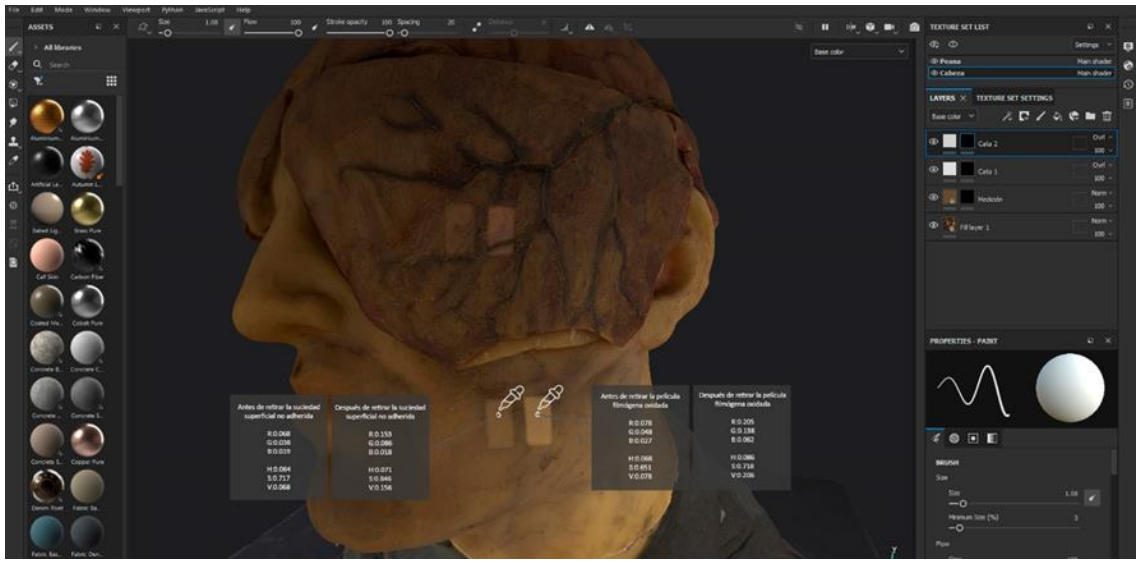


Figura 134. Medición de los valores cromáticos en las zonas ensayadas de la limpieza. © Emanuel Sterp Moga.

La configuración del pincel para la eliminación de la suciedad superficial del modelo ha resultado relativamente fácil (figura 135 a), no obstante, la remoción de la película filmógena ha sido un proceso algo más complejo (figuras 135 b y 136). Ello se debe a la mala praxis durante el barnizado, pues se ha observado una aplicación de este muy irregular y zonas donde se confunde con la acumulación de partículas de suciedad adheridas. En esta fase de trabajo ha sido determinante realizar la limpieza del modelo virtual obtenido con luz visible, apoyados en todo

momento por la imagen del mismo con fluorescencia visible inducida por radiación UV. Con ello, se han podido identificar las zonas que presentaban películas de recubrimiento y cuáles no, lo que ha ayudado a efectuar un proceso de limpieza con una gran fidelidad respecto a la obra real (figura 137).

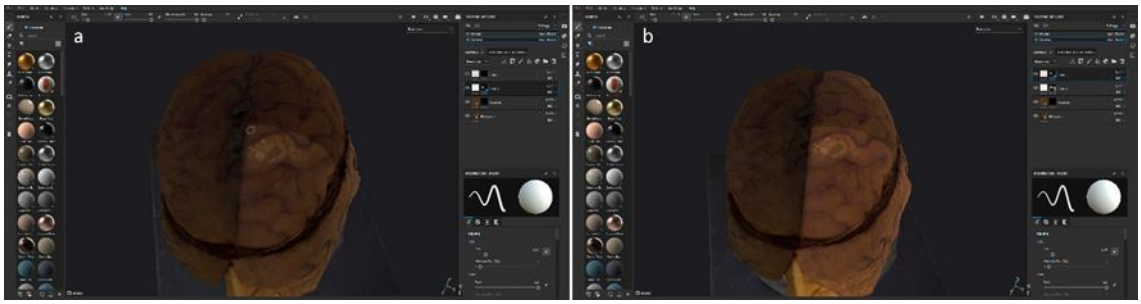


Figura 135. a) Proceso de limpieza virtual de la suciedad superficial. b) Proceso de limpieza virtual de la película filmógena. © Emanuel Sterp Moga.

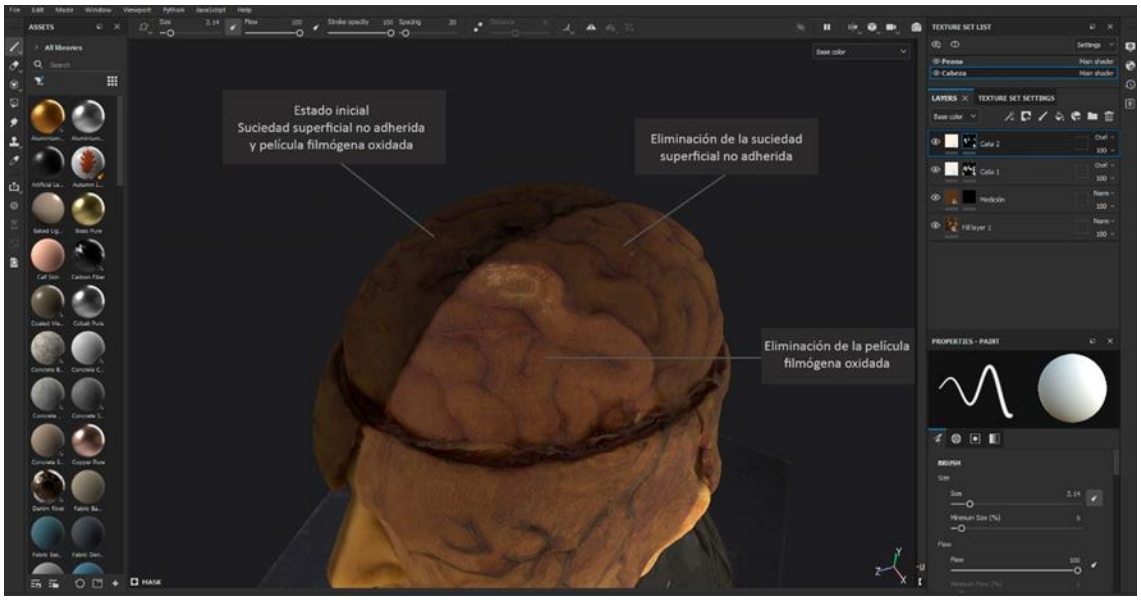


Figura 136. Fases de la limpieza virtual. © Emanuel Sterp Moga.

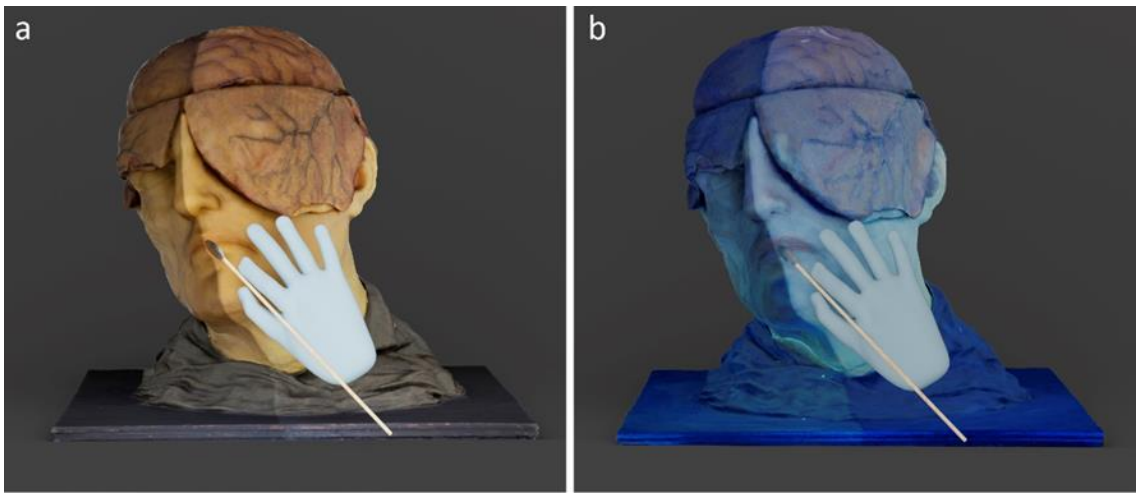


Figura 137. Proceso de limpieza virtual para la remoción de la película de recubrimiento no original. a) Modelo luz visible (Ver modelo 3D). b) Modelo fluorescencia visible inducida por radiación UV (Ver modelo 3D). © Emanuel Sterp Moga.

Por último, en las zonas con una gran acumulación de suciedad superficial o en los repintes que recubrían por completo la textura de color del material ceroso, la herramienta *clone* ha ofrecido resultados muy eficaces. Pese a que en estos puntos modifican mínimamente la textura de color de la obra, las zonas tratadas con esta técnica han sido minoritarias. Ello no ha repercutido de manera negativa en la fidelidad del conjunto escultórico, sino que ha servido de ayuda para realizar una mejor lectura del modelo anatómico (figura 138).

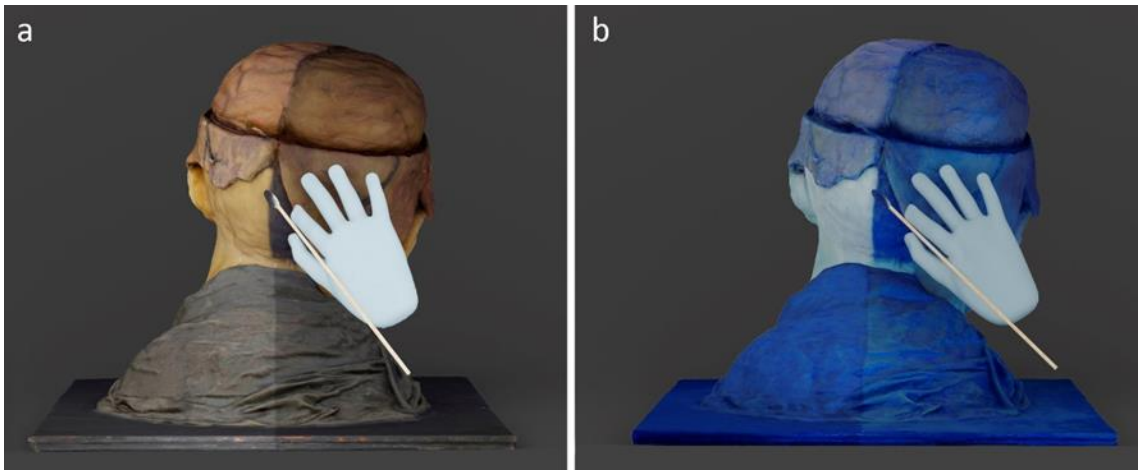


Figura 138. Proceso de remoción virtual de los repintes. a) Modelo luz visible (Ver modelo 3D). b) Modelo fluorescencia visible inducida por radiación UV (Ver modelo 3D). © Emanuel Sterp Moga.

A continuación, se muestra el estado inicial de la obra y el resultado final tras realizar la restauración virtual, comprendiendo la limpieza y la anastilosis (figura 139).

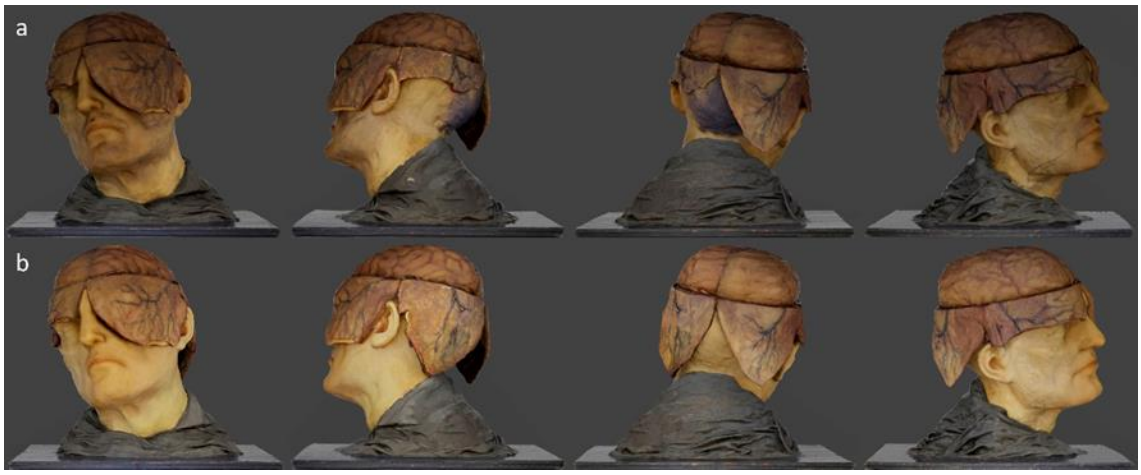


Figura 139. a) Estado inicial de conservación de la escultura. b) Resultados obtenidos con la restauración virtual (Ver modelo 3D). © Emanuel Sterp Moga.

4.6.3. Reintegración volumétrica virtual

El modelado realizado con el programa informático Blender de la malla en *quads,* adaptado a la superficie a reintegrar, ha ofrecido una primera aproximación de la materia requerida. La herramienta *snap* en caras ha facilitado el flujo del trabajo, ya que los vértices se han adaptado con bastante precisión a la superficie de la obra (figura 140 a, b y c). El ajuste perfecto de la laguna se ha conseguido con la herramienta *boolean*. La opción de *sustracción* ha restado todo el material sobrante del modelado previo, ajustándose con precisión a las irregularidades de la

superficie con la que irá en contacto. Ello ha permitido que pequeños elementos encajasen a la perfección sin añadir materia de más (figura 140 d).

Respecto a los acabados superficiales, se han rematado con una alta calidad y semejanza a la textura del modelo real gracias a las brochas de esculpido *draw*, *smooth* y *grab,* junto con el modificador *multiresolution*, que se ha utilizado para aumentar el número de polígonos de la malla (figura 140 e) Sin embargo, los relieves más pequeños se han creado gracias a la herramienta *dyntopo*, con la opción *constant* activada, ya que ha permitido añadir nueva geometría a la ya existente, otorgándole mayor calidad a los pequeños detalles y acabados (figuras 140 f y 141).

Finalmente, se ha logrado calcular la cantidad del material ceroso que se necesita durante el tratamiento de la reintegración volumétrica en todo el conjunto de la obra con un total de 243 cm^3.

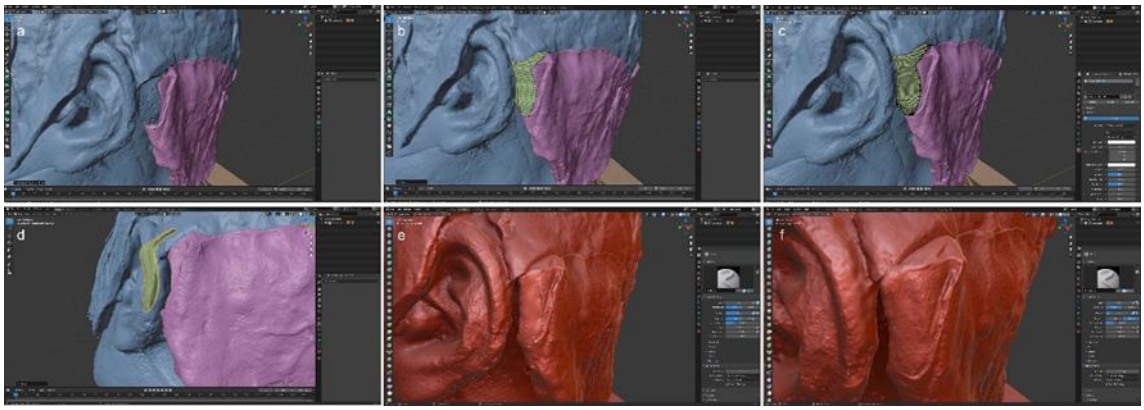


Figura 140. Proceso de modelado digital de los elementos perdidos. a, b y c) Modelado de la malla en *quads*. d) Aplicación de la herramienta *boolean* para la reproducción exacta de la zona fracturada. e y f) Modelado orgánico mediante la opción *dyntopo*. © Emanuel Sterp Moga.

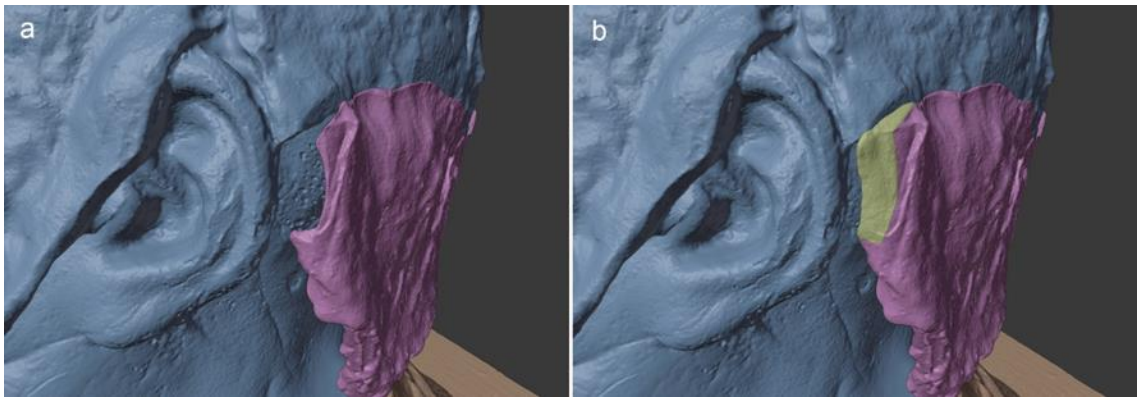


Figura 141. a) Antes de la reintegración volumétrica. b) Después de la reintegración volumétrica. © Emanuel Sterp Moga.

4.6.4. Reintegración cromática virtual

Los pinceles disponibles en el programa Adobe Substance 3D Painter han ofrecido diferentes resultados en la reintegración cromática virtual en modo *overlay*. Entre los pinceles analizados, los de tipo *kyle* números 28, 30 y 53, corresponden a la técnica del puntillismo, pues, son pinceles que reproducen diferentes tipos de puntos. En cuanto a la reintegración mediante la técnica de selección cromática, los pinceles que producen el trazo requerido han sido los *kyle* 57, 58 y 71 (figura 142).

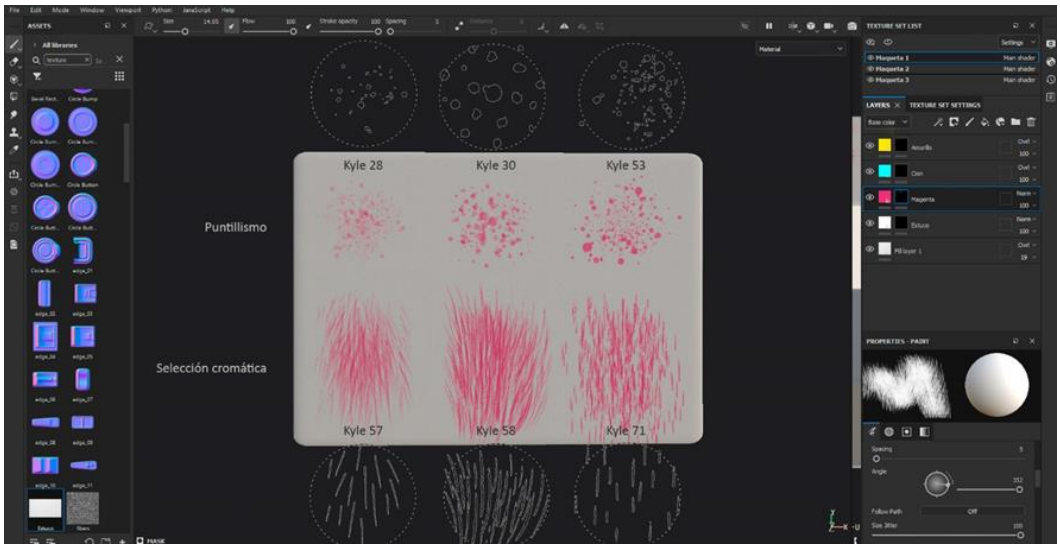


Figura 142. Ensayo de diferentes pinceles para el proceso de reintegración cromática (puntillismo y selección cromática). © Emanuel Sterp Moga.

En el caso de los pinceles seleccionados para la técnica del puntillismo, el tipo *kyle* 53 es el que mejores resultados ha ofrecido (figura 143). El patrón presenta diferentes tipos de puntos más grandes y pequeños, así como más regulares o menos, en una sola aplicación. Ello crea un resultado muy parecido al que se podría lograr en la intervención real. Respecto a la distribución de los puntos durante varias aplicaciones, debido al patrón que presenta, no se ha detectado repeticiones que destaquen cierta simetría. En diversos casos también se ha recurrido a rotar los puntos en diferentes ángulos para generar mayor vibración en la zona intervenida. Con ello, se ha conseguido una mayor integración de los elementos repetitivos.

En cuanto a los tres tipos seleccionados para reproducir la selección cromática, el que mejor resultado ha ofrecido ha sido el kyle 71 (figura 143). Los trazos son muy verticales y relativamente cortos. El patrón que presenta genera múltiples líneas a diferentes alturas y con diversos trazos, lo que ha proporcionado una adecuada vibración en el conjunto de líneas, como si de una aplicación real se tratara.

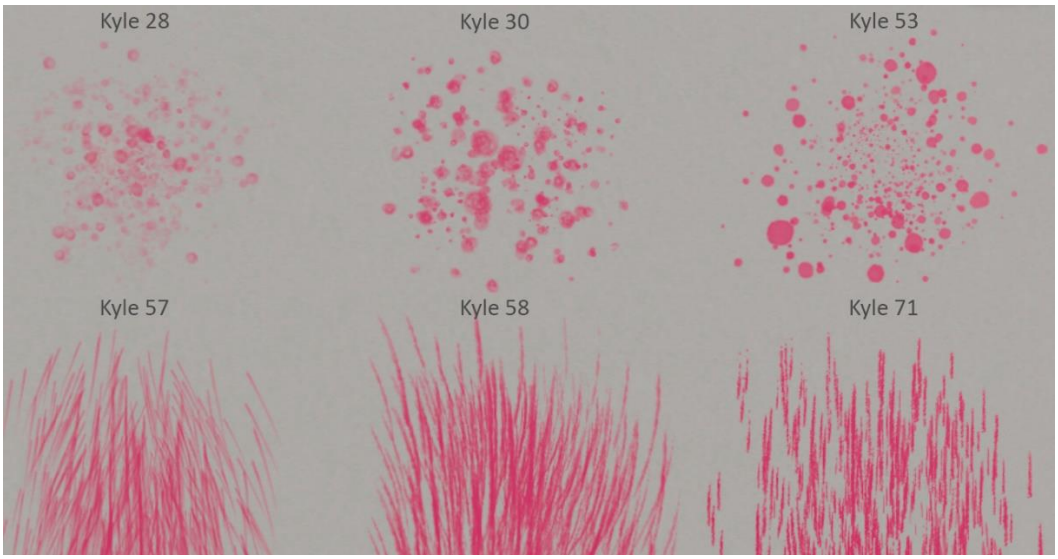


Figura 143. Detalle de la aplicación de los diferentes pinceles para el proceso de reintegración cromática (puntillismo y selección cromática). © Emanuel Sterp Moga.

Los resultados obtenidos se han puesto en práctica sobre diversas texturas que simulan la cera (figura 144 y 147) a fin de encontrar el método de abordaje en cada caso concreto. En los ejemplos mostrados, la técnica que mejor se ha adecuado a la laguna ha sido el puntillismo.

Los colores primarios cian, magenta, amarillo, y los secundarios, azul, rojo y verde, basados en la síntesis sustractiva similar al modelo CMYK, han sido aplicados en capas superpuestas determinándose el orden, número y la densidad de las mismas (figuras 144 y 145). De ese modo, se ha podido concretar de cara a la intervención en la obra real, la opacidad que debe tener cada uno de los colores por cada capa correspondiente, es decir, el nivel de carga de los pigmentos, así como la distribución de los puntos sobre el área (figuras 146 y 147).

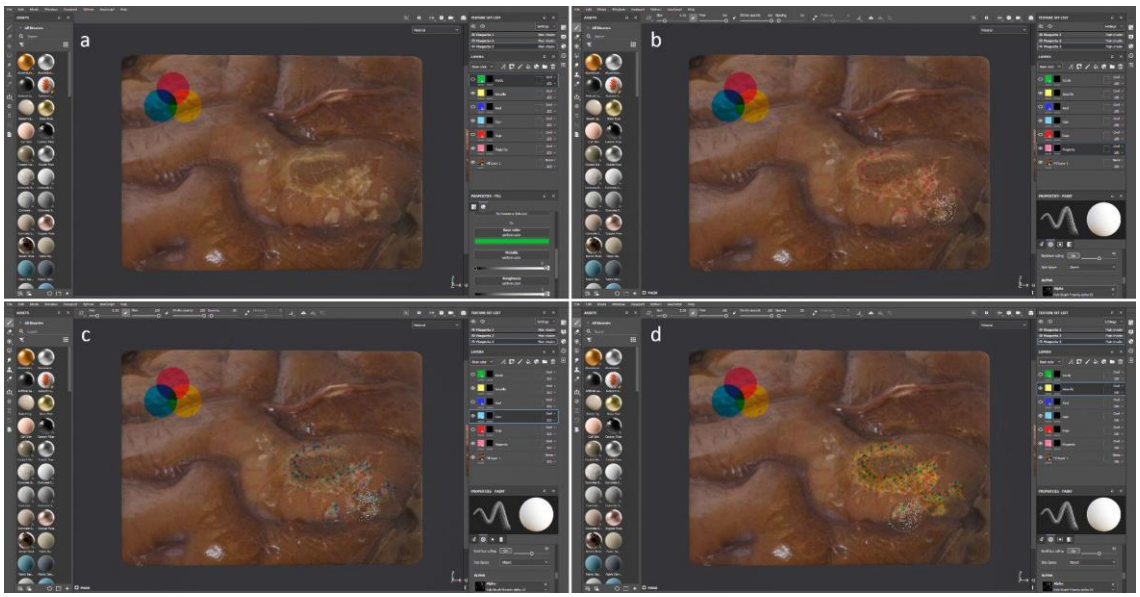


Figura 144. Proceso de reintegración cromática. a) Estado inicial. b) Aplicación de magenta. c) Aplicación de cian. d) Aplicación de amarillo. © Emanuel Sterp Moga.

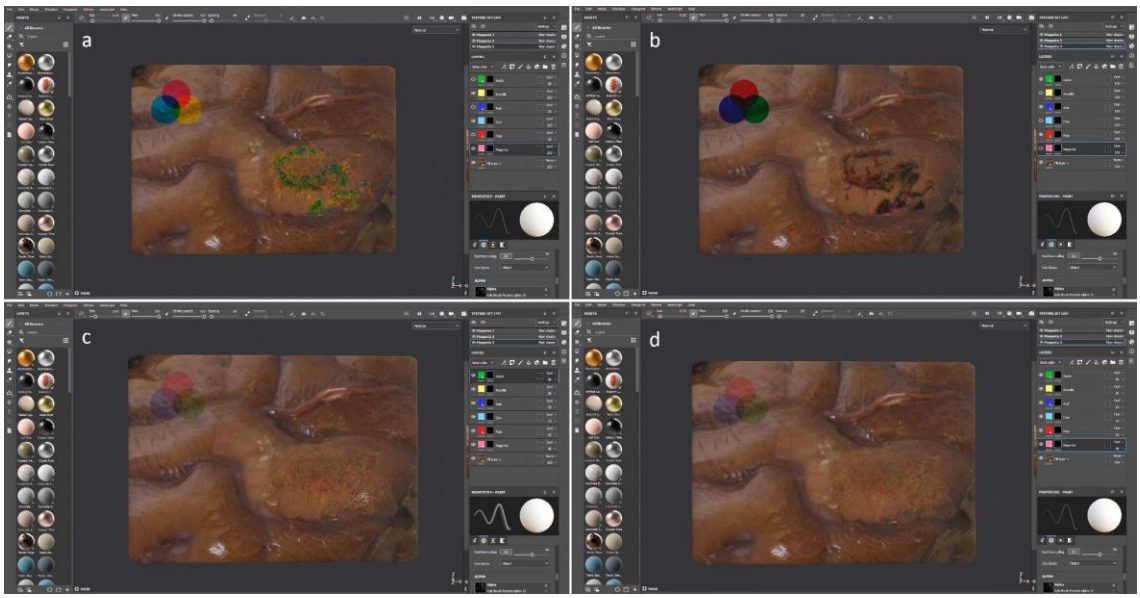


Figura 145. Proceso de reintegración cromática. a) Aplicación de las capas magenta, cian y amarillo con una opacidad del 100%. b) Aplicación de las capas rojas, azules y verdes con una opacidad del 100%. c) Ajuste de los parámetros de opacidad de cada capa de color. d) Resultado final. © Emanuel Sterp Moga.

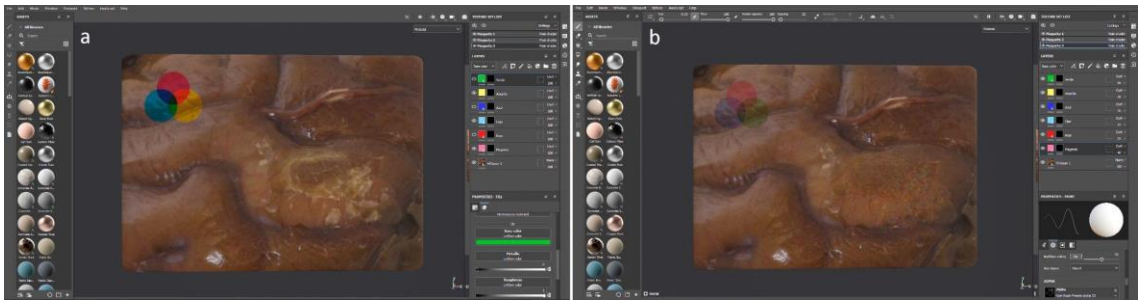


Figura 146. a) Estado inicial. b) Después de realizar la reintegración cromática de las partes dañadas. © Emanuel Sterp Moga.

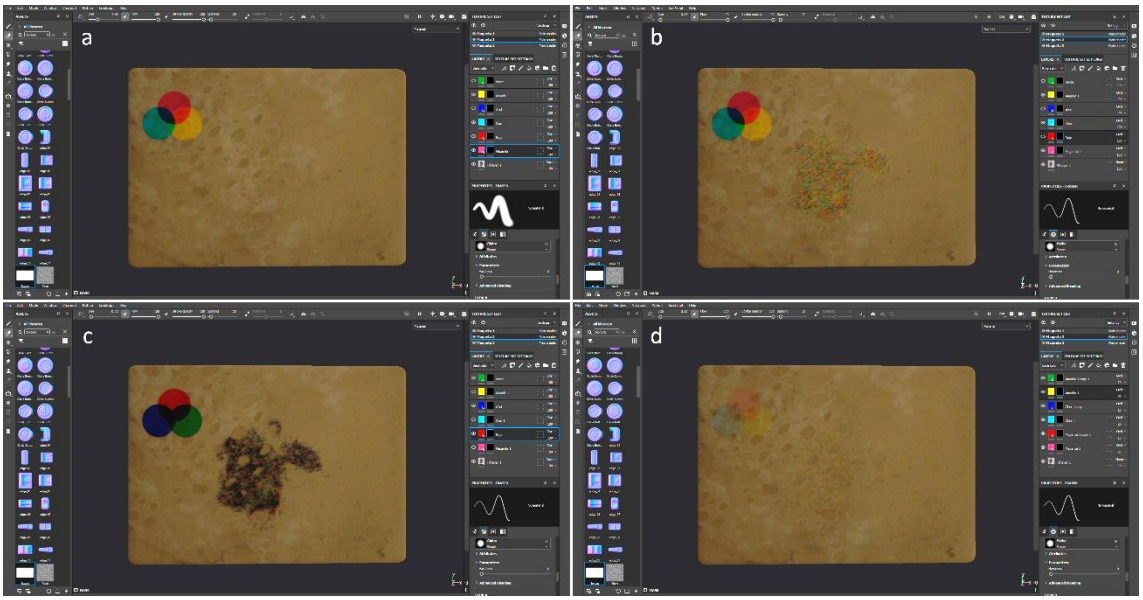


Figura 147. Proceso de reintegración cromática. a) Estado inicial. b) Aplicación de las capas magenta, cian y amarillo con una opacidad del 100%. c) Aplicación de las capas rojas, azules y verdes con una opacidad del 100%. d) Resultado final después de ajustar los parámetros de opacidad de cada capa de color. © Emanuel Sterp Moga.

A continuación, en la figura 148 se recoge el modelo de protocolo de actuación desarrollado para los diferentes procesos de restauración virtual.

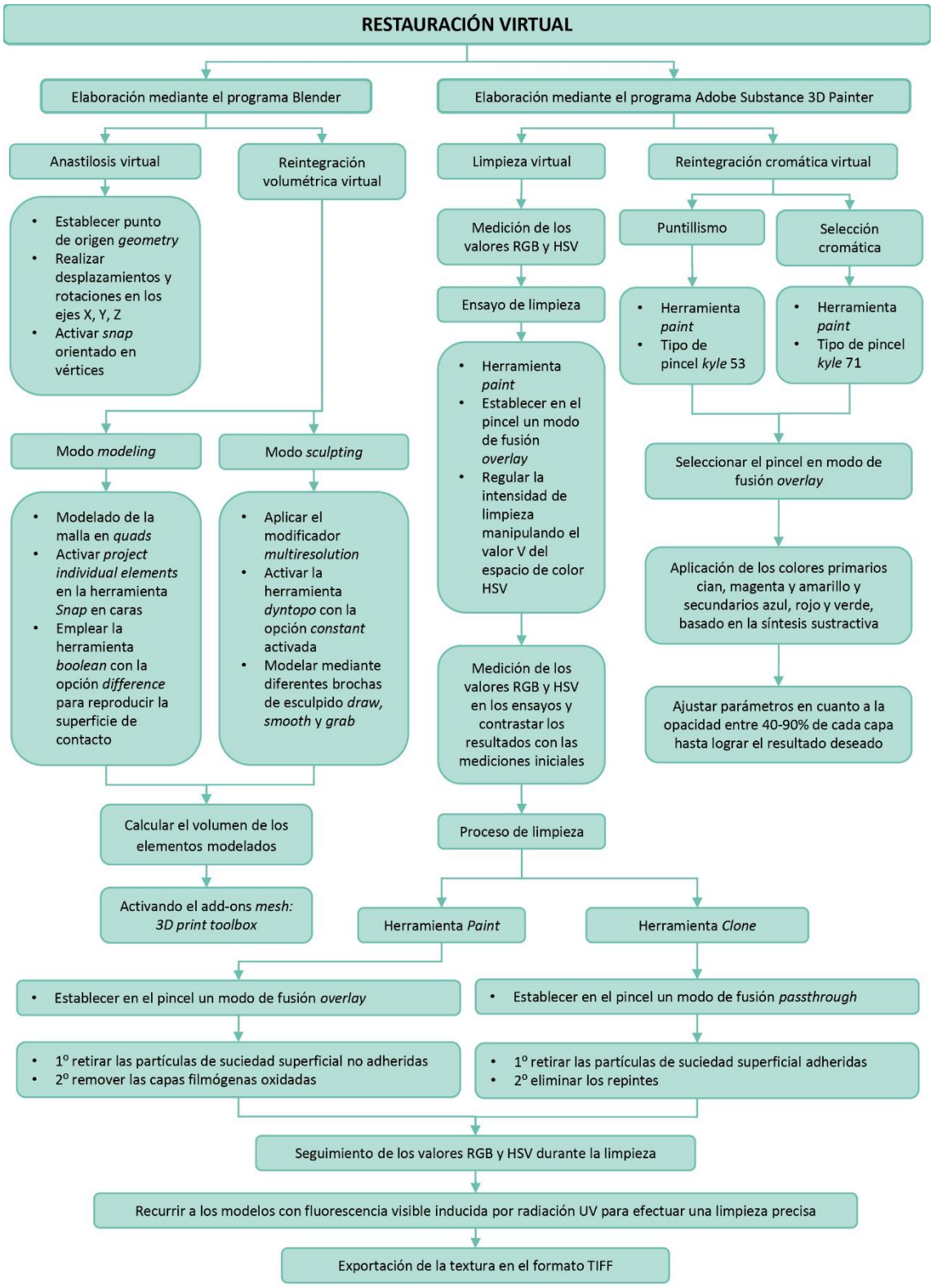


Figura 148. Protocolo de aplicación para la restauración virtual. © Emanuel Sterp Moga.

4.7. Diseño de moldes y estructuras auxiliares mediante el modelado digital

4.7.1. Modelado digital de los moldes

Trabajar el diseño del molde junto al elemento a reproducir de manera virtual ha posibilitado analizar el nivel, posición y profundidad de cada una de las piezas que componen el molde (Sterp Moga et al., 2022b).

Las herramientas utilizadas como *bevel, loop cut o knife* durante el modelado con el programa informático Blender, han permitido crear cada una de las piezas. De este modo, se han podido estudiar los encajes y las formas de las piezas, aspectos que, sin duda, han contribuido a obtener unos resultados más precisos. Cada una de las llaves, ubicadas de modo estratégico, ha sido de gran ayuda para encajar las piezas de los moldes sin generar ninguna desviación en el elemento a reproducir. Con todo ello, se ha garantizado un desmontaje del positivo de cera fácil y seguro (figura 149). Por otro lado, la obtención de la huella del molde se ha visto enormemente facilitada por el uso de la herramienta *boolean* con la opción de *sustracción*. Mediante esta función se ha logrado reproducir con altísima precisión y calidad cada superficie. Todo el proceso ha resultado ser muy fluido y preciso gracias al modelado sobre las piezas digitalizadas a escala real 1:1. Con ello, se ha logrado la máxima precisión volumétrica para la impresión 3D en los moldes (figura 150).

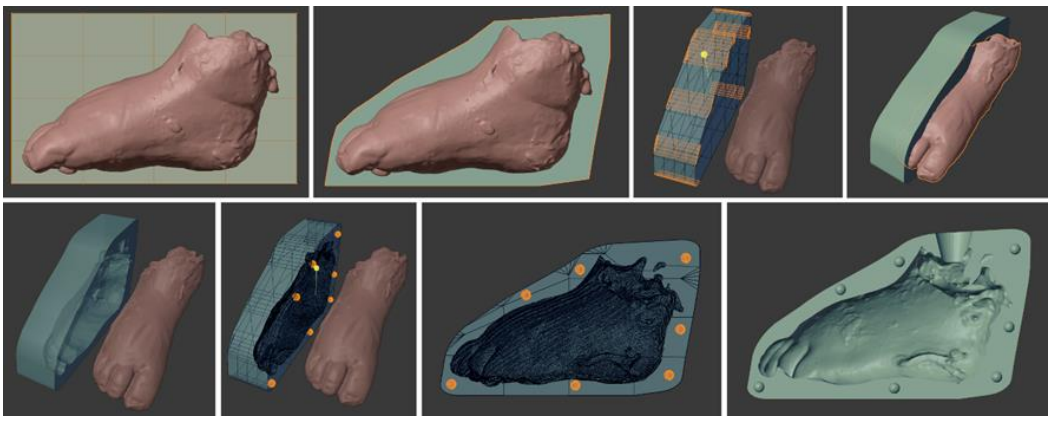


Figura 149. Proceso de modelado digital del molde. © Emanuel Sterp Moga.

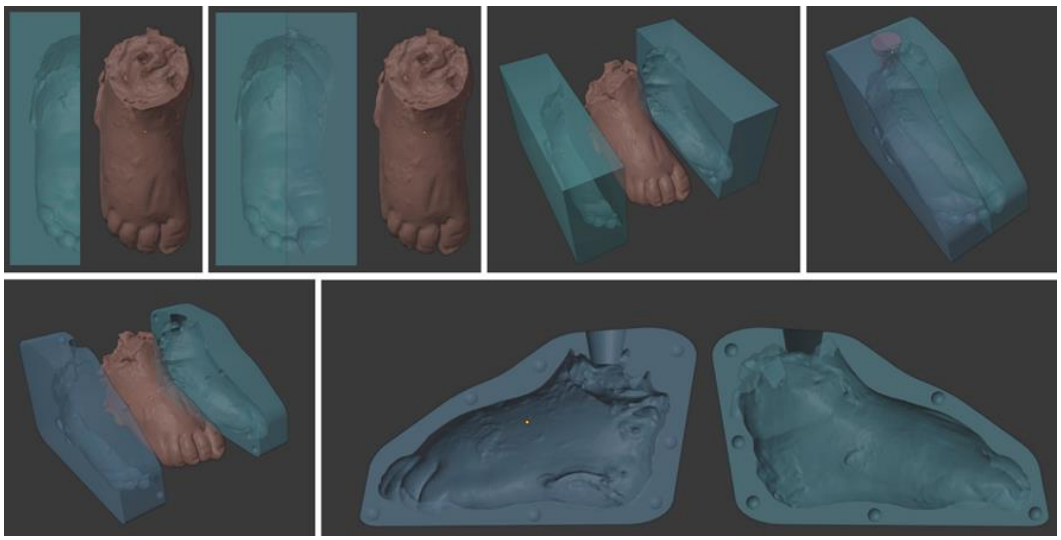


Figura 150. Obtención de los moldes virtuales. © Emanuel Sterp Moga.

4.7.2. Modelado digital de las estructuras auxiliares

El modelado digital de las estructuras, también realizado en el programa Blender, se ha llevado a cabo con ayuda de las herramientas *bevel, loop cut o knife*. Gracias a ellas, se han podido crear numerosas piezas, algunas de cierta complejidad (figura 151). La información obtenida de la construcción morfológica de cada pieza, incluyendo mediciones, grosores y formas, ha resultado muy útil, ya que de estos factores dependerá en buena parte su calidad y funcionalidad final.

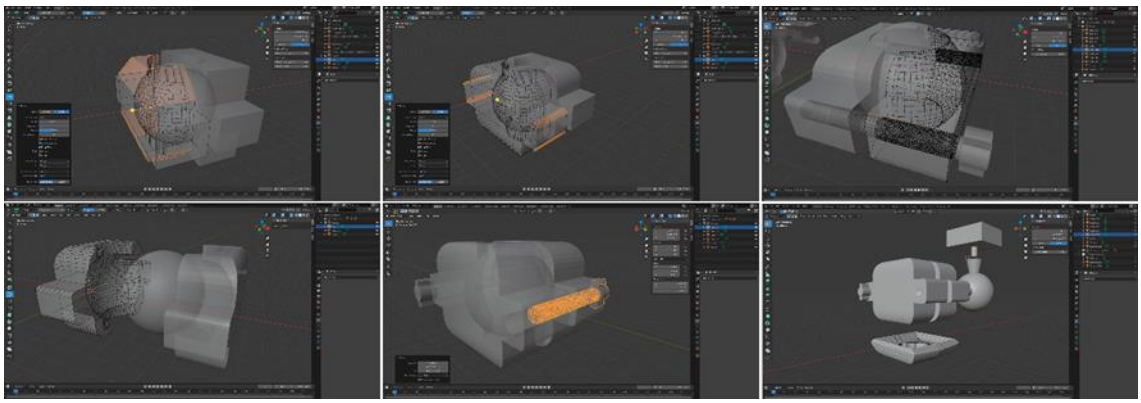


Figura 151. Proceso de modelado digital de las piezas estructurales (abrazaderas). © Emanuel Sterp Moga, Óscar Hernández-Muñoz, Javier del Río Esteban y Alicia Sánchez Ortiz.

La herramienta *boolean* también ha sido clave para crear las diferentes piezas con un encaje perfecto entre unas y otras. Las esferas que se encuentran alojadas en las diferentes abrazaderas (figura 152) o los mástiles que casan en las esferas, así como los soportes que reproducen fielmente la forma de contacto de cualquier elemento a sujetar, han sido fácilmente creadas con dicha herramienta (figura 153). No obstante, se tuvieron que modificar las plataformas en determinadas zonas para asegurar que durante la adhesión no se desprendiera o girase hacia los lados (figura 154).

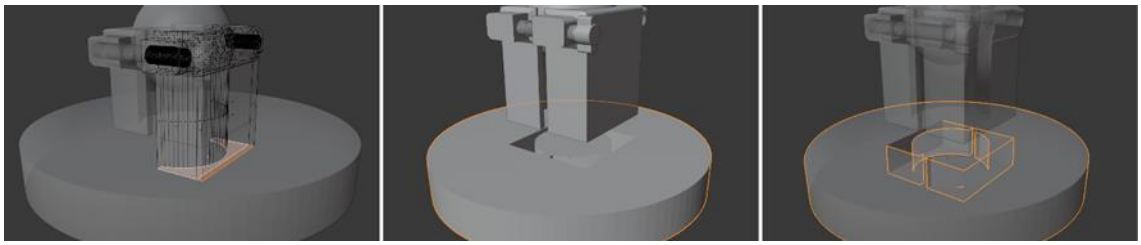


Figura 152. Proceso de modelado digital de las piezas estructurales (base y abrazadera). © Emanuel Sterp Moga.

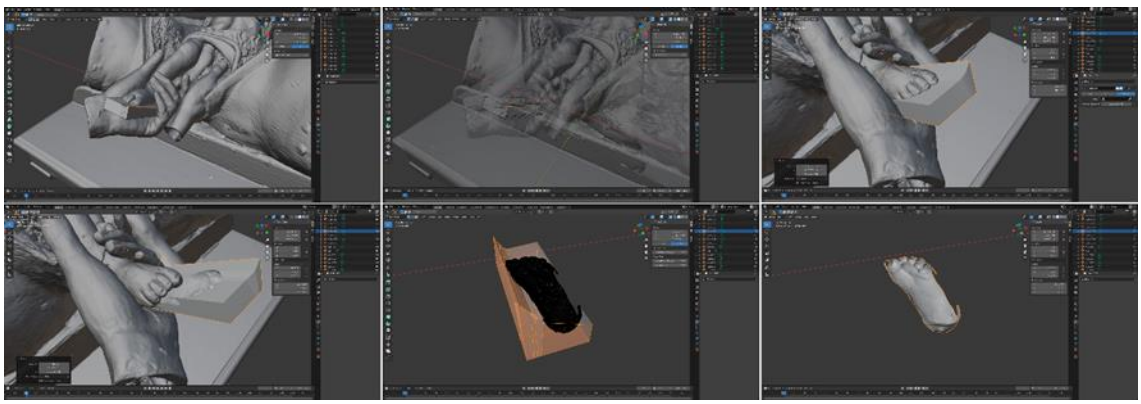


Figura 153. Proceso de modelado digital del soporte de la plantilla del pie. © Emanuel Sterp Moga.

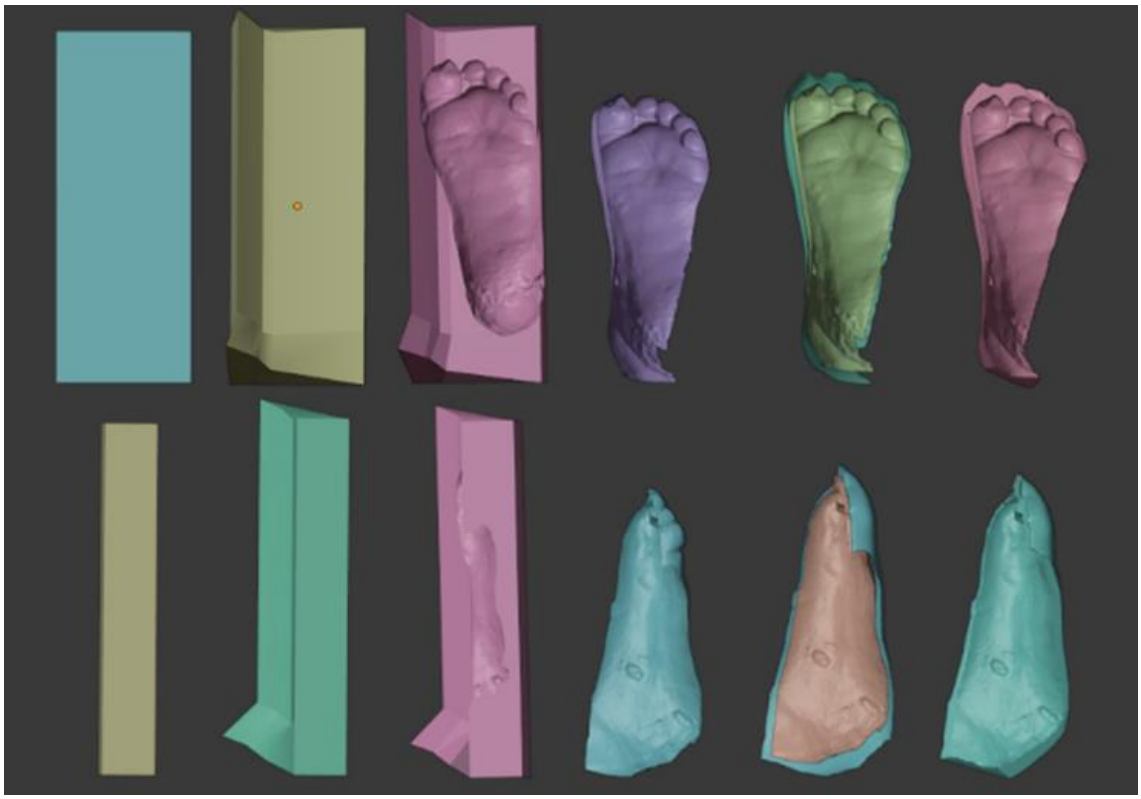


Figura 154. Evolución del proceso para la obtención del soporte de la plantilla del pie. © Emanuel Sterp Moga.

Por otra parte, el modelado digital ha facilitado el estudio de las limitaciones que poseen las estructuras auxiliares, pudiendo comprender de manera más clara su funcionamiento. Los numerosos análisis han dado pie a diferentes cambios y mejoras a lo largo del trabajo, algo que fue esencial para concluir con un prototipo de calidad.

Inicialmente, el diseño de la abrazadera que inmovilizaba la esfera ocultaba prácticamente toda el área de la esfera recogida en su interior. De este modo, impedía que el mástil tuviera mucho espacio para rotar (figura 155 a). El análisis de un diseño de soporte con varias abrazaderas de este tipo y sus correspondientes mástiles enfocados a alcanzar una determinada altura y posición, ha servido para comprobar que los movimientos quedaban claramente limitados, lo que hacía imposible colocar el cabezal final que sustenta el fragmento a adherir exactamente en el punto deseado (figura 155 b).

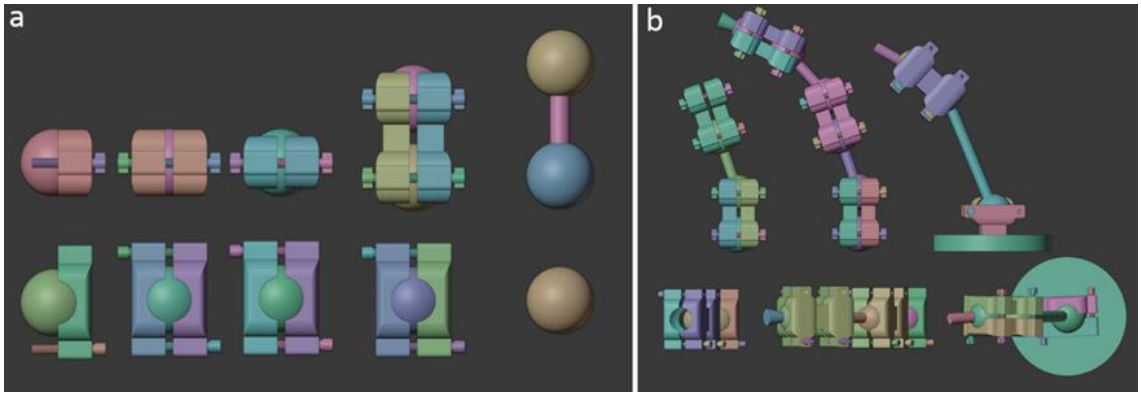


Figura 155. a) Evolución del proceso de la modificación de la brida. b) Ángulos de desplazamiento permitido. © Emanuel Sterp Moga.

Con los resultados alcanzados se vio la necesidad de reducir el número de abrazaderas y colocar mástiles más largos, pero aun así no fue suficiente. Para poder ofrecer mayor ángulo de rotación al mástil con la esfera fue preciso reducir la altura de la abrazadera, quedando prácticamente sujeta dicha esfera en su ecuador (figura 156 a). Tras numerosas pruebas, se ha observado que el diseño final cumple con los requisitos para intervenir una gran variedad de obras, ya que permite rotar y posicionar los elementos sustentantes en todos los puntos de vista necesarios (figura 156 b).

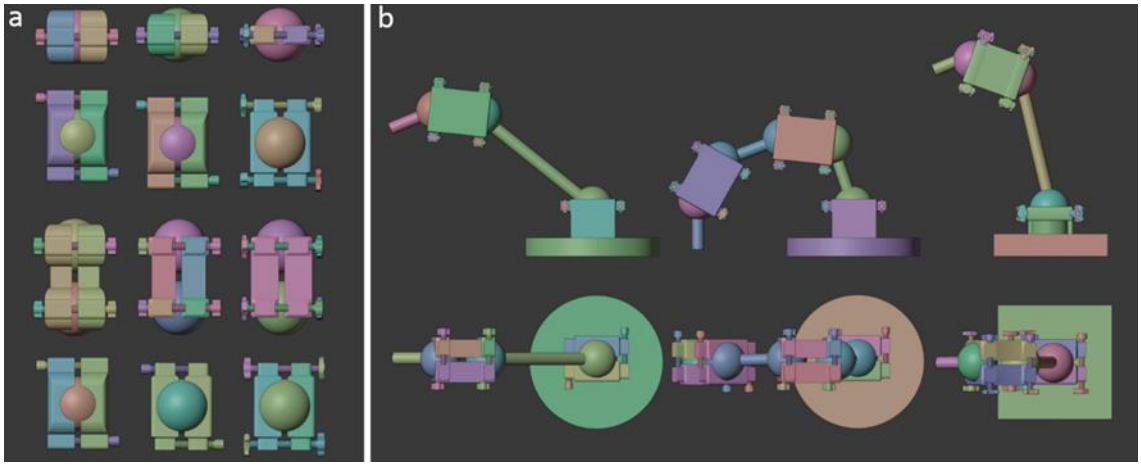


Figura 156. a) Evolución del proceso de la modificación de la brida. b) Ángulos de desplazamiento permitido. © Emanuel Sterp Moga.

La evolución y mejora de las abrazaderas han sido claves para elaborar el presente prototipo de estructuras, dando pie a otras alternativas enfocadas a sustentar fragmentos de mayor tamaño (figura 157).

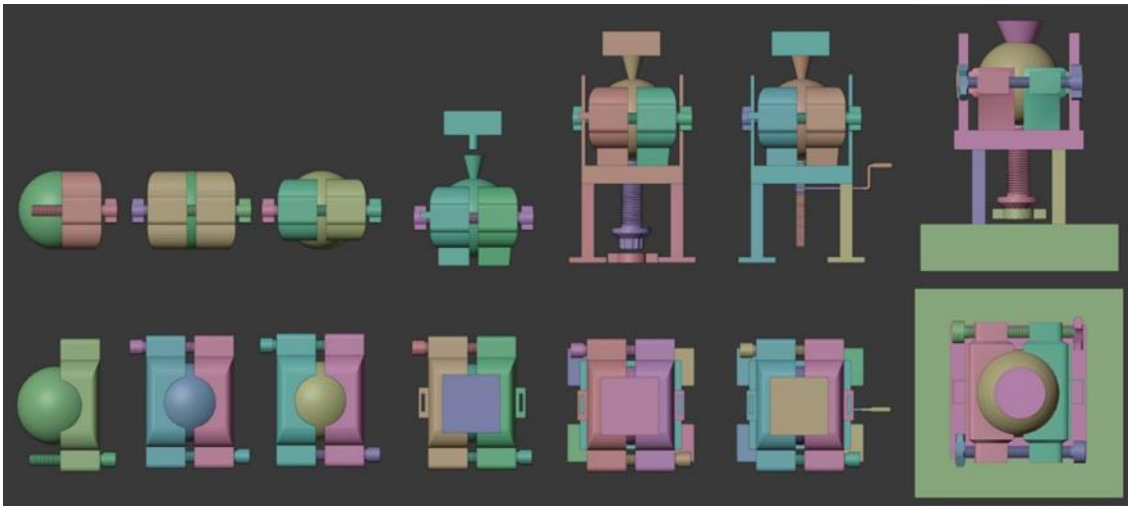


Figura 157. Creación de un sistema y estructura diferente. © Emanuel Sterp Moga.

Tras concluir con los diseños virtuales de los prototipos necesarios para acometer los objetivos de tratamientos planteados, se procede a describir la composición de los dos tipos de estructuras desarrolladas.

Cada estructura auxiliar está compuesta por:

Primer sistema de estructuras auxiliares (figura 158)

- Una base que sustenta todo el cuerpo, dotada en la parte central de dos cavidades que permiten alojar dentro las piezas que conforman la estructura (1).
- Un sistema de abrazadera (2) cuya parte inferior encaja en las cavidades de la base (1). La parte superior se cierra mediante la presión que se aplica a través de dos tornillos con tuercas (3) colocados a los dos laterales. A la altura de los tornillos y en el interior de la abrazadera, se aloja una esfera (4) que es presionada por la abrazadera (2) mediante el sistema de tornillo y tuerca (3), de modo que permite colocar y sujetar la esfera en la posición deseada.
- Un conjunto de esferas presenta un orificio cilíndrico para poder insertar un mástil que se une, a su vez, con otra esfera ubicada en otro sistema de abrazadera (5).
- Un sistema de abrazadera para dos esferas (6), dotado de un mecanismo de presión mediante cuatro tornillos y tuercas (3).
- Un conjunto de mástiles (7) con diferentes alturas que encajan en las esferas (5).
- Un cabezal que encaja en el mástil para sujetar la estructura próxima a la obra (8).
- Un sistema de sujeción basado en un elemento rectangular con dos orificios abiertos ubicados en los laterales que permite recoger y sujetar los fragmentos necesarios con ayuda de una cinta elástica (9). Se dispone de varios cabezales con diferentes tamaños y formas de contacto con la obra.
- Un sistema de plantilla (10) que encaja perfectamente en el pie que descansa sobre el cabezal (8).

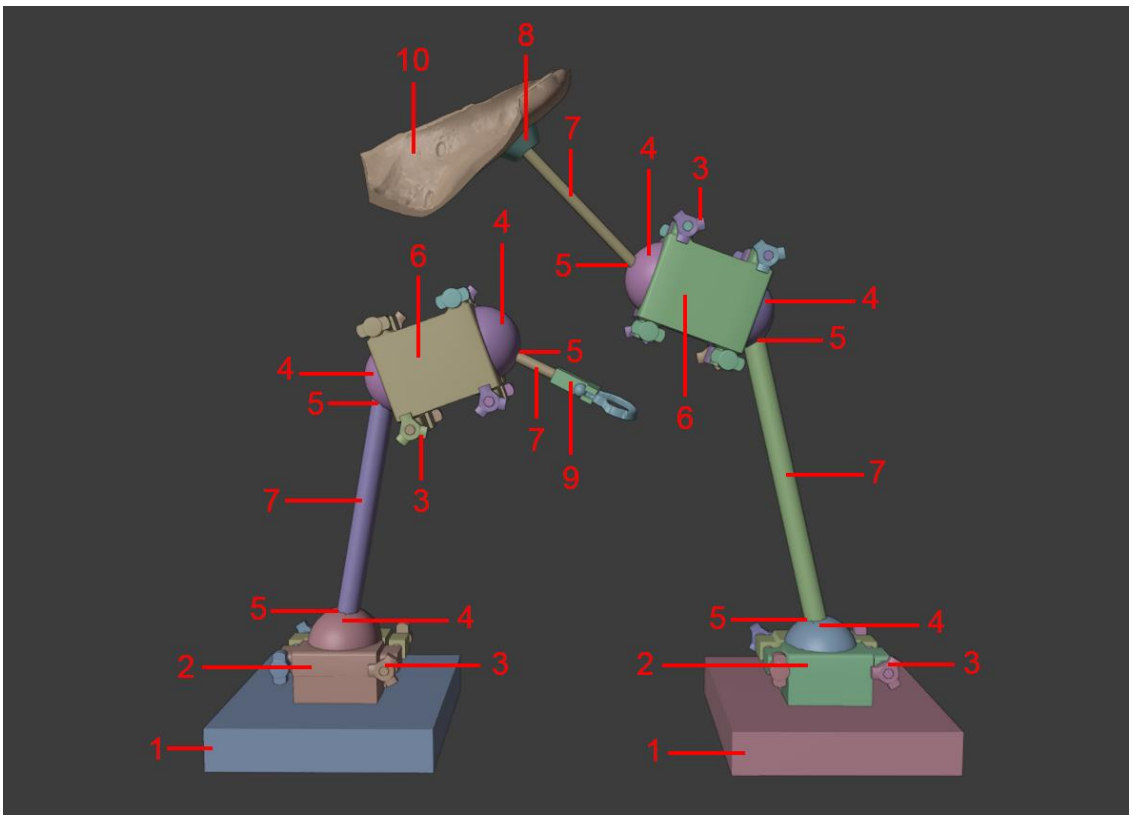


Figura 158. Composición de los diferentes elementos que conforman la estructura auxiliar (Ver modelo 3D montado) (Ver modelo 3D desmontado). © Emanuel Sterp Moga.

Segundo sistema de estructuras auxiliares (figura 159)

- Una base que sustenta todo el cuerpo, dotada en la parte central de cuatro cavidades que permiten alojarse dentro las piezas que conforman la estructura (1).
- Cuatro pilares que sustentan la estructura y que encajan en la base (2).
- Una plataforma que descansa sobre cuatro pilares (3), en cuyo centro se encuentra un orificio roscado (4). En los laterales presentan dos pilares a modo de guía para elevar las abrazaderas (5).
- Un sistema de abrazadera (6) que encaja en la plataforma que descansa sobre los cuatro pilares (3). La parte de la abrazadera que se alojan en su interior (6) permite ser manipulada hacia arriba y hacia abajo con la ayuda de un tornillo (7). Presenta en los laterales dos pequeñas ranuras fijas (8) a la abrazadera (6), con la forma exacta para que permita pasar los pilares a modo de guía (5), proporcionando estabilidad y seguridad durante la elevación. La parte superior de la abrazadera ejerce presión mediante dos tornillos con tuercas (9) colocados a los dos laterales.
- Una esfera (10) ubicada dentro del sistema de abrazadera (6) con un orificio cilíndrico para poder insertar el cabezal que sujeta la plantilla de la mano (11).
- Un sistema de plantilla que se adapta al volumen de la mano (12) que descansa sobre el cabezal (11).

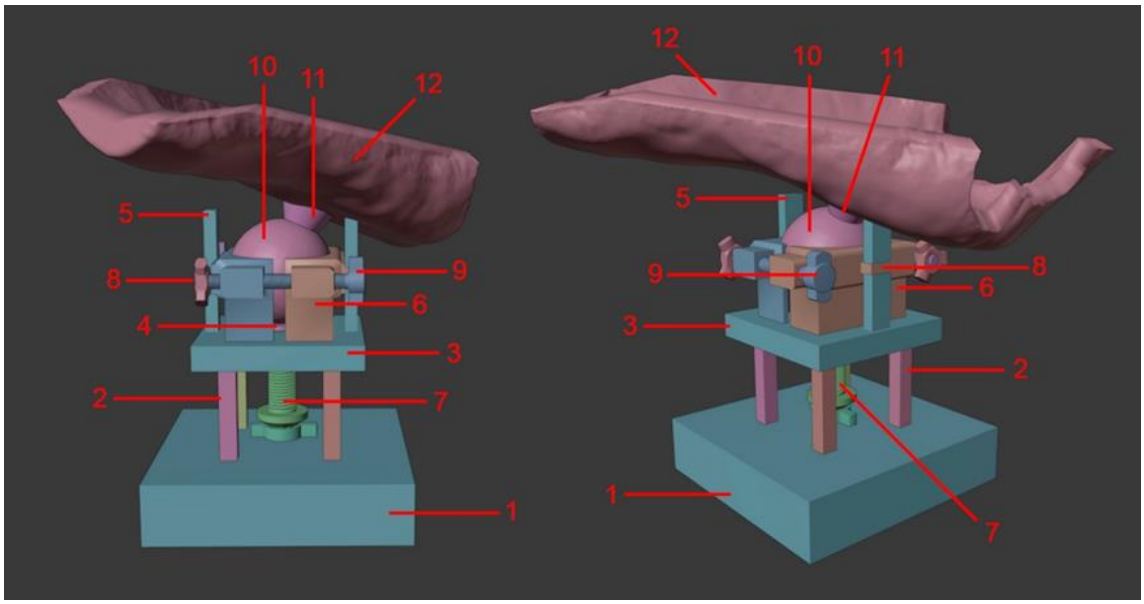


Figura 159. Composición de los diferentes elementos que conforman la estructura auxiliar (Ver modelo 3D montado) (Ver modelo 3D desmontado). © Emanuel Sterp Moga.

A continuación, en la figura 160 se recoge el modelo de protocolo de actuación desarrollado para el diseño de moldes y estructuras auxiliares mediante el modelado digital.

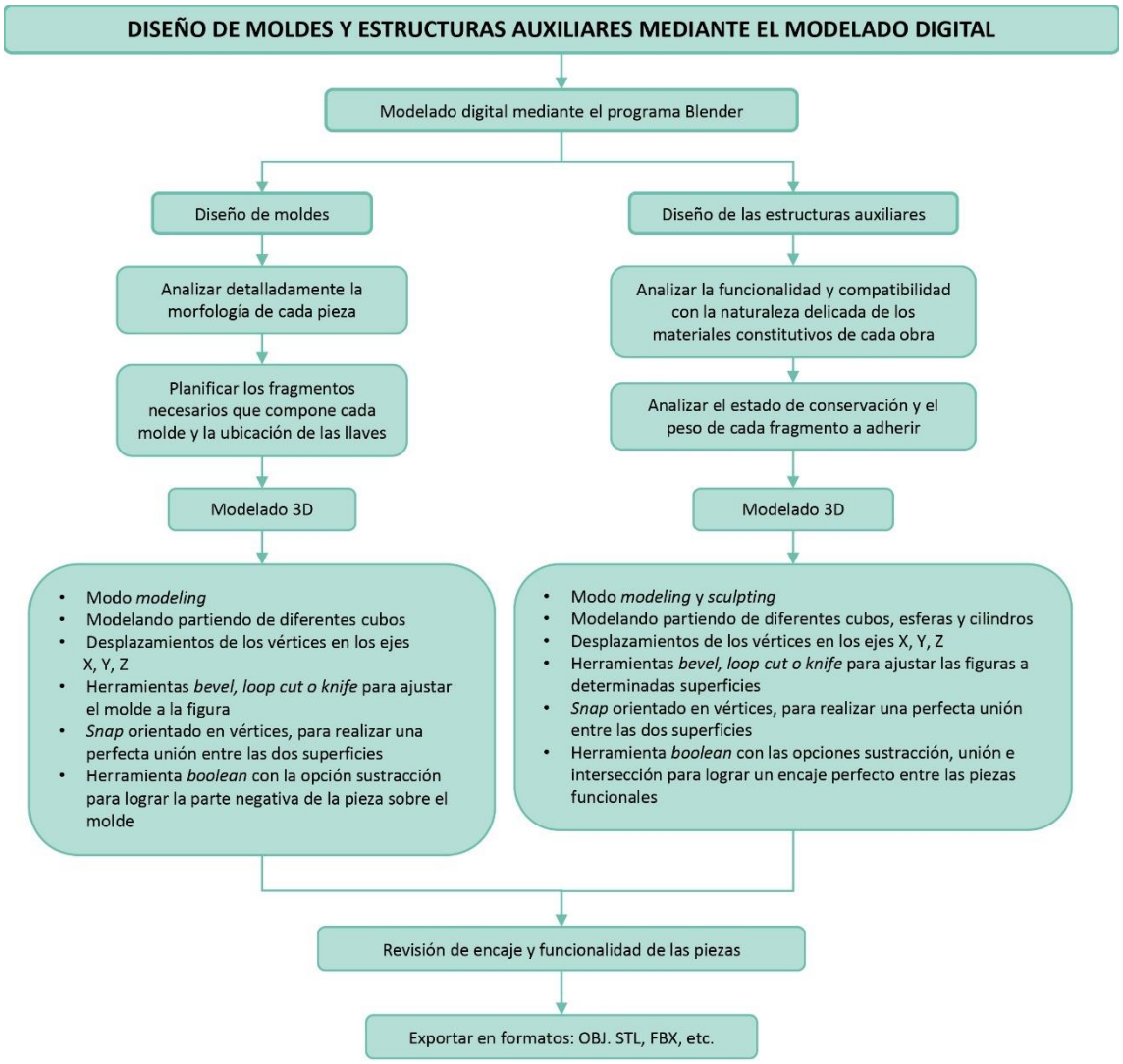


Figura 160. Protocolo del diseño de moldes y estructuras auxiliares mediante el modelado digital. © Emanuel Sterp Moga.

4.8. Difusión de los modelos anatómicos científicos

4.8.1. Fotorrealismo y renderizado 2D

La obtención de las texturas PBR por medio del programa informático Adobe Substance 3D Sampler, ha permitido previsualizar los resultados en el visor 3D según se han ido modificando y ajustando los parámetros para lograr que el material tuviera unos acabados más afines a la obra original estudiada (figura 161).

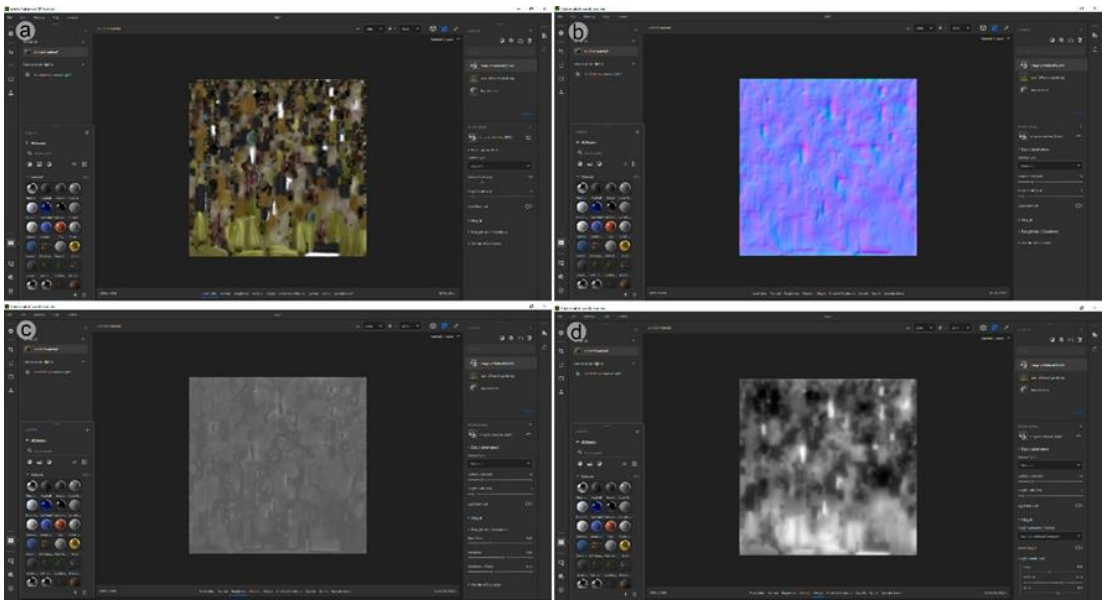


Figura 161. Proceso de obtención de texturas PBR con Adobe Substance 3D Sampler. © Emanuel Sterp Moga.

Las texturas PBR utilizadas han proporcionado un mayor volumen de información acerca del nivel de detalle, la cantidad de reflexión y refracción sobre el modelo (figura 162). Ello ha dejado patente la gran utilidad para representar el aspecto físico de los materiales constituyentes de cada obra. En algunos casos ha sido necesario realizar mínimos ajustes de estos mapas de textura para lograr un mayor acercamiento al aspecto real del modelo.

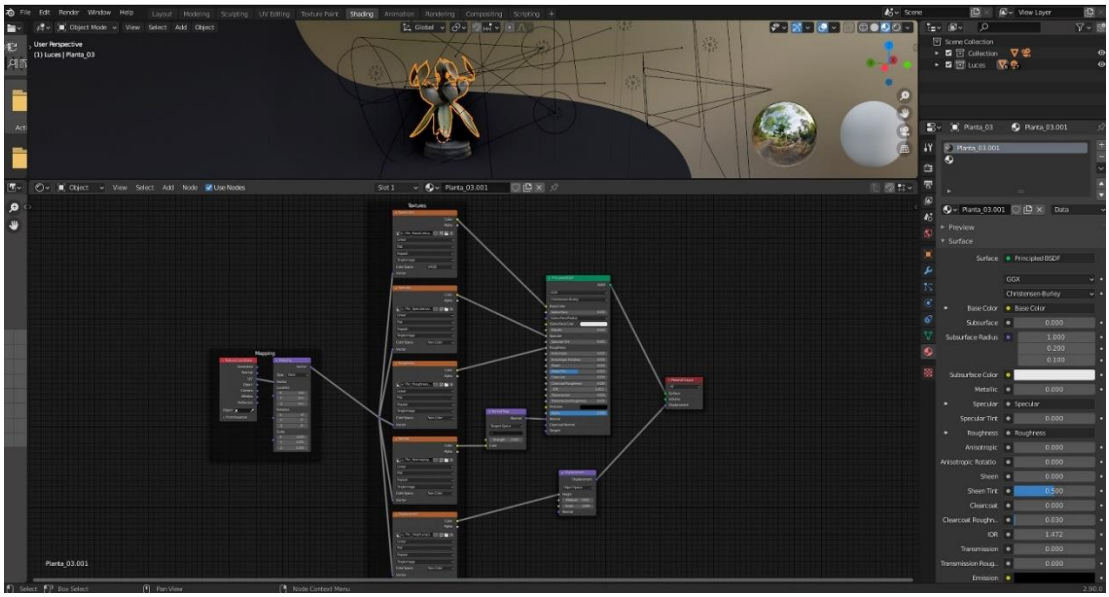


Figura 162. Aplicación de las texturas PBR al modelo 3D. © Emanuel Sterp Moga.

Por otro lado, el plató virtual diseñado en el programa Blender, ha resultado ser eficaz para el renderizado de los modelos. El color gris aplicado al fondo ha sido muy apropiado a fin de contrastar y potenciar los modelos científicos (figura 163 a).

La ubicación, el número y los tipos de fuentes de iluminación empleadas (figura 163 b), han favorecido la obtención de los resultados aportados por las texturas PBR. Dos de los parámetros más importantes han sido la dirección de la luz y las diferentes intensidades aplicadas a cada uno de los focos. Mediante la combinación de luces más o menos intensas, así como luces más o menos difusas, ha sido posible lograr un acabado prácticamente idéntico al modelo real. Su combinación ha contribuido a matizar diversas zonas en las obras, destacando pequeños matices en los reflejos. Respecto a la temperatura de color establecida de 6000ºK, también ha ofrecido resultados muy afines a los que se obtendrían con una iluminación natural diurna.

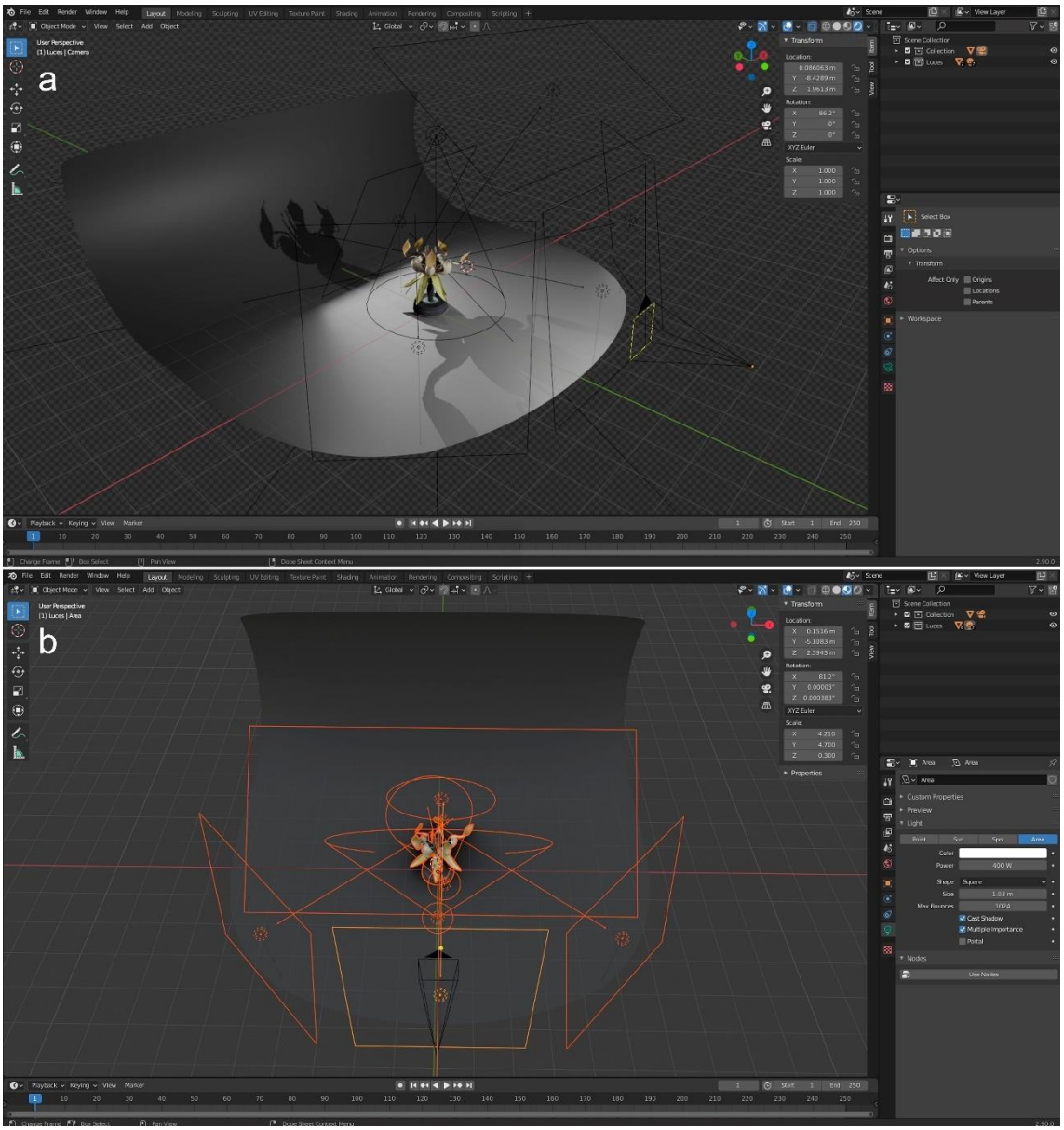


Figura 163. a) Diseño del plató fotográfico. b) Ubicación de las diferentes fuentes de iluminación. © Emanuel Sterp Moga.

Otro importante factor que se ha tenido en cuenta y no se ha manipulado en ningún momento ha sido la escala. Trabajar con la escala real 1:1 del objeto, ha asegurado una perfecta proporción. Esto ha resultado importante, sobre todo, en los modelos que presentan varios fragmentos. Si manipulamos la escala en cualquiera de ellos, los resultados se verán alterados.

Respecto a la configuración de la cámara fotográfica virtual, tanto la lente, como la distancia focal, la perspectiva o la PDC, han hecho posible un renderizado de aspecto fotorrealista. La PDC ha sido uno de los elementos más determinantes, ya que los diferentes niveles de desenfoque aplicados han otorgado a la imagen un gran realismo.

La calidad de los renders obtenidos con los 128 *samples* establecidos, ha sido muy alta. El ruido de la imagen se ha controlado y ajustado mediante la función *denoising*, lo que ha permitido reducir el nivel de grano para lograr resultados más cercanos a la realidad.

A través de las texturas PBR, de la iluminación y de la configuración de la cámara, se ha logrado obtener un acabado fotorrealista en los acabados de superficie y detalles (figura 164).

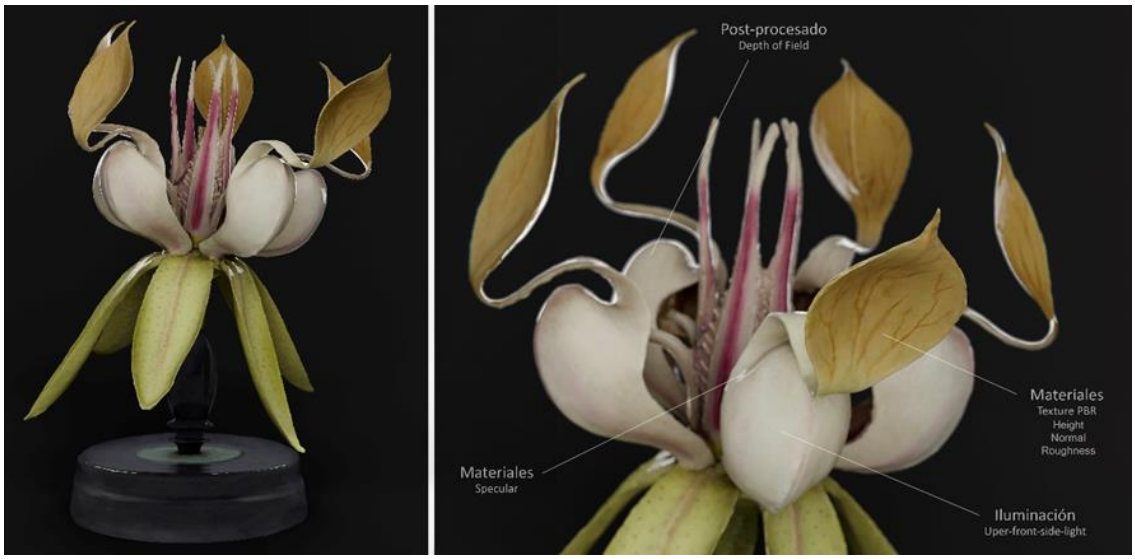


Figura 164. Resultados obtenidos en los renders del modelo *Theobroma cacao*. © Emanuel Sterp Moga.

4.8.2. Retopología y generación de mapas de textura para la difusión de los modelos 3D

La retopología automática, llevada a cabo en el programa informático ZBrush, ha generado una malla de *quads* muy precisa y con unos polígonos muy bien ordenados y limpios. A pesar de que también existía la posibilidad de realizar la retopología de manera manual, esta se ha descartado debido al proceso tan laborioso que supone, sobre todo, en los modelos botánicos elegidos a modo de ejemplo. Se ha logrado reducir el número de polígonos de la malla de *quads* a 38.429 polígonos frente a los 4.365.478 de la malla original formada por triángulos (figura 165). La enorme reducción de polígonos y la alta calidad que se ha obtenido, han puesto en relieve la gran eficacia y potencial de la herramienta *Zremesher* (figura 166).

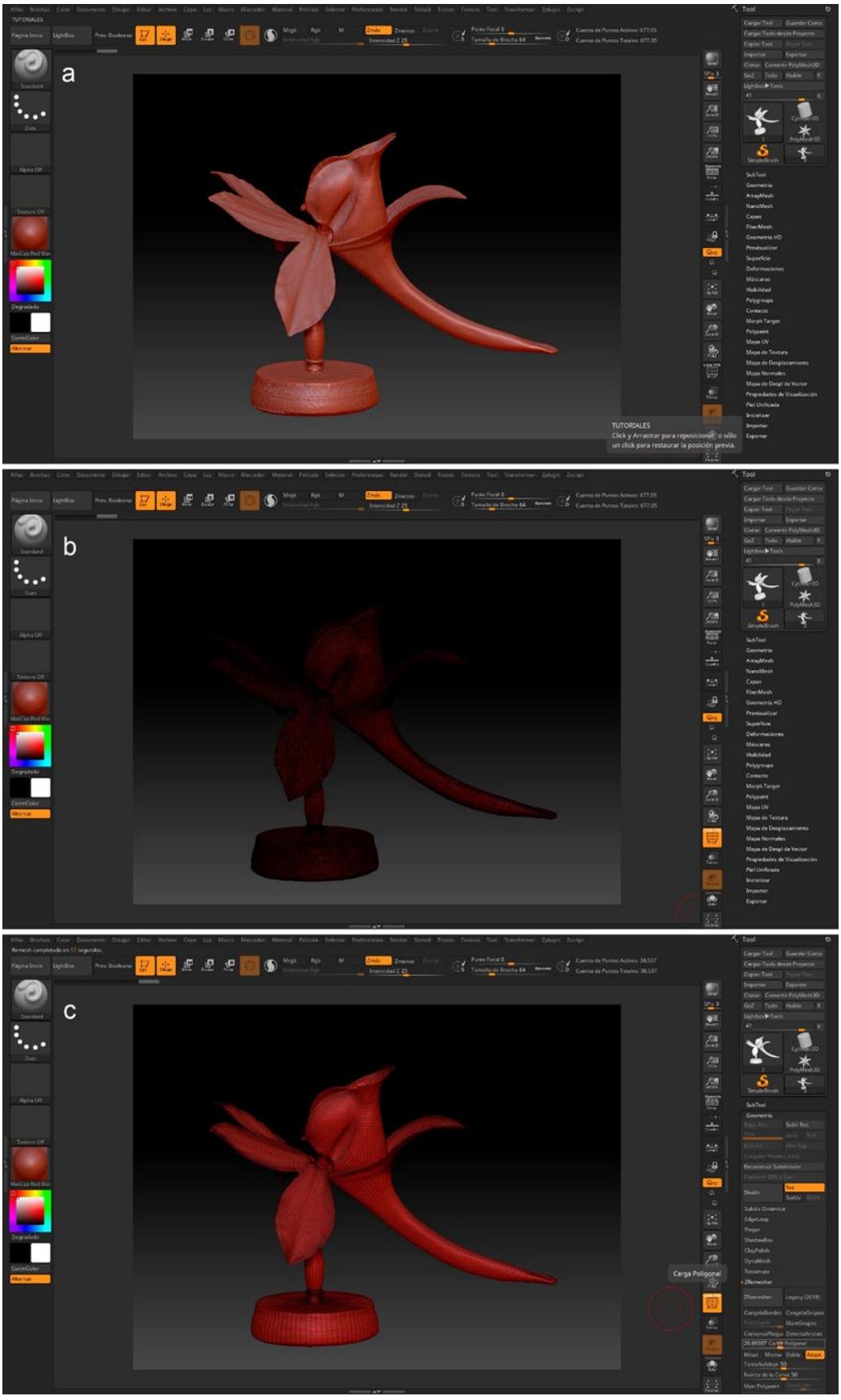


Figura 165. a) Modelo *Delphinium consolida* con malla original en triángulos. b) Visión alámbrica del modelo con malla original en triángulos. c) Visión alámbrica del modelo con malla de *quads*. © Emanuel Sterp Moga.

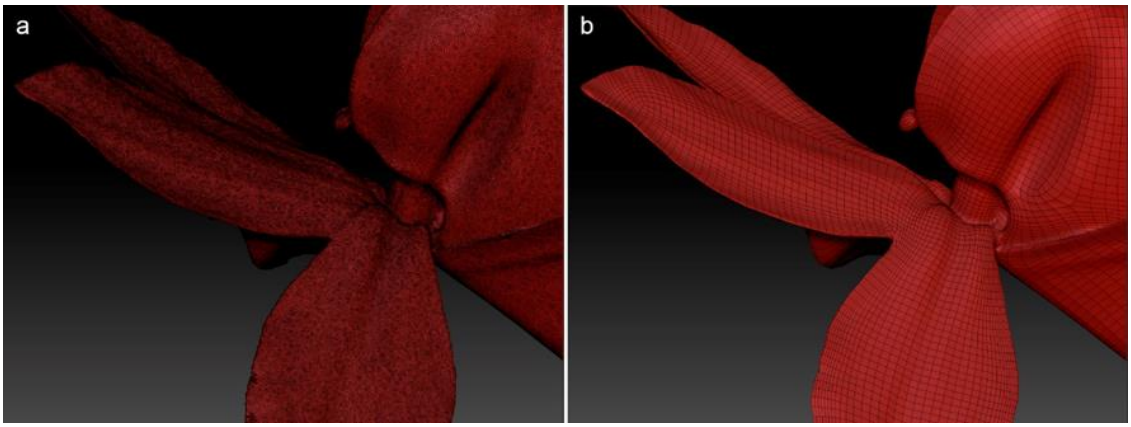


Figura 166. a) Detalle de la visión alámbrica del modelo con malla original en triángulos. b) Detalle de la visión alámbrica del modelo con malla de *quads.* © Emanuel Sterp Moga.

El proceso de *generación de mapas de textura* en Blender ha resultado ser bastante sencillo. Las funciones *copy location y copy scale* han facilitado la superposición de manera exacta entre los dos objetos y el ajuste de la escala (figura 167 a y b). Este paso ha sido determinante, ya que la superposición de la textura no se proyecta sobre la nueva malla con exactitud si existen pequeños errores de posición o escala. Los diferentes cortes realizados en la malla para crear el mapeado UV han dado lugar a una textura de color adaptada perfectamente a la nueva malla, sin apreciarse ninguna diferencia o posibles errores en relación con el modelo original (figura 167 c y d).

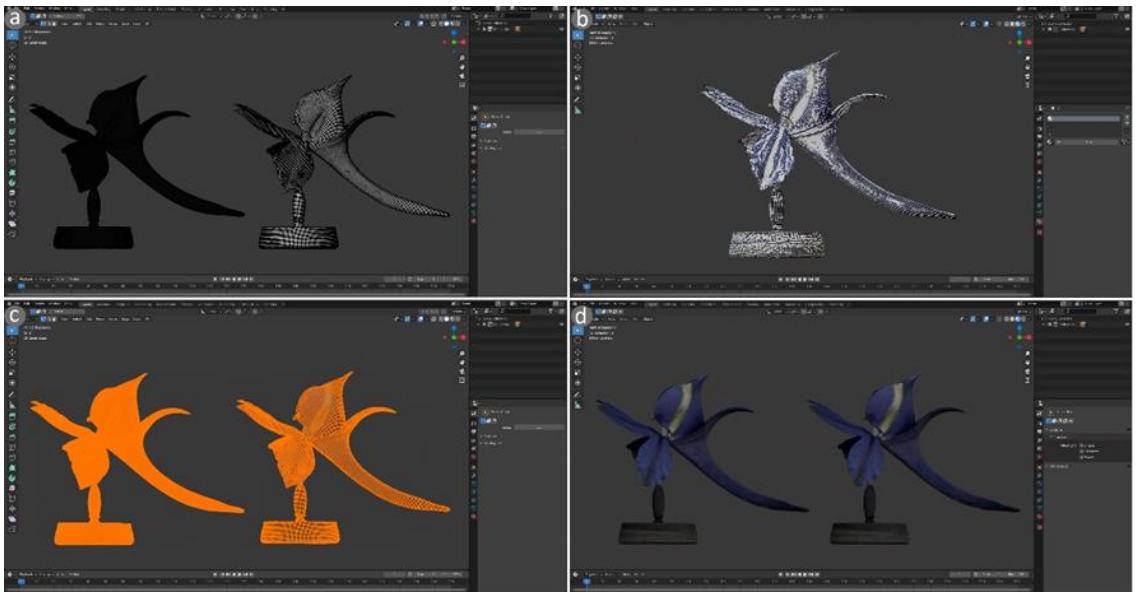


Figura 167. Proceso de *generación de mapas de textura*. a) Diferencias entre las mallas de triángulos a la izquierda y *quads* a la derecha. b) Superposición de los dos modelos para la *generación de mapas de textura*. c) Finalización de la *generación de mapas de textura*. d) Resultados finales. © Emanuel Sterp Moga.

Finalmente, la aplicación de las texturas PBR han dotado al modelo virtual de una apariencia física bastante fiel a la del modelo real, reflejando las características de cada uno de sus materiales constituyentes (figura 168). Todas estas herramientas han proporcionado un mayor volumen de información de cara a la difusión por medio de la plataforma web Sketchfab.

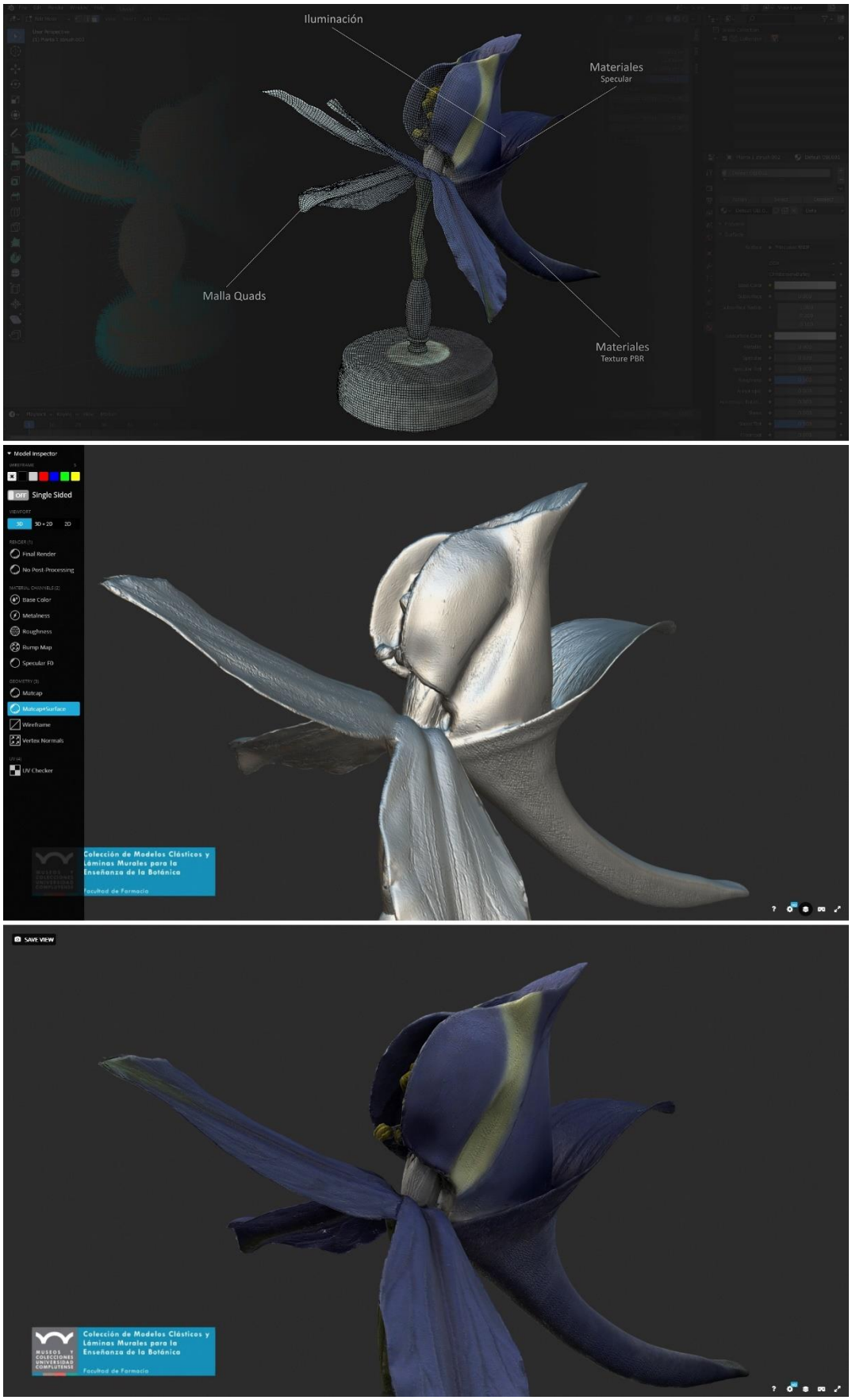


Figura 168. Modelo 3D optimizado para poder verlo en la plataforma web Sketchfab.com (Ver modelo 3D). © Emanuel Sterp Moga.

A continuación, en la figura 169 se recoge el modelo de protocolo de actuación desarrollado para la difusión de los resultados hallados en los diferentes tratamientos virtuales mediante el renderizado 2D fotorealista y la optimización 3D.

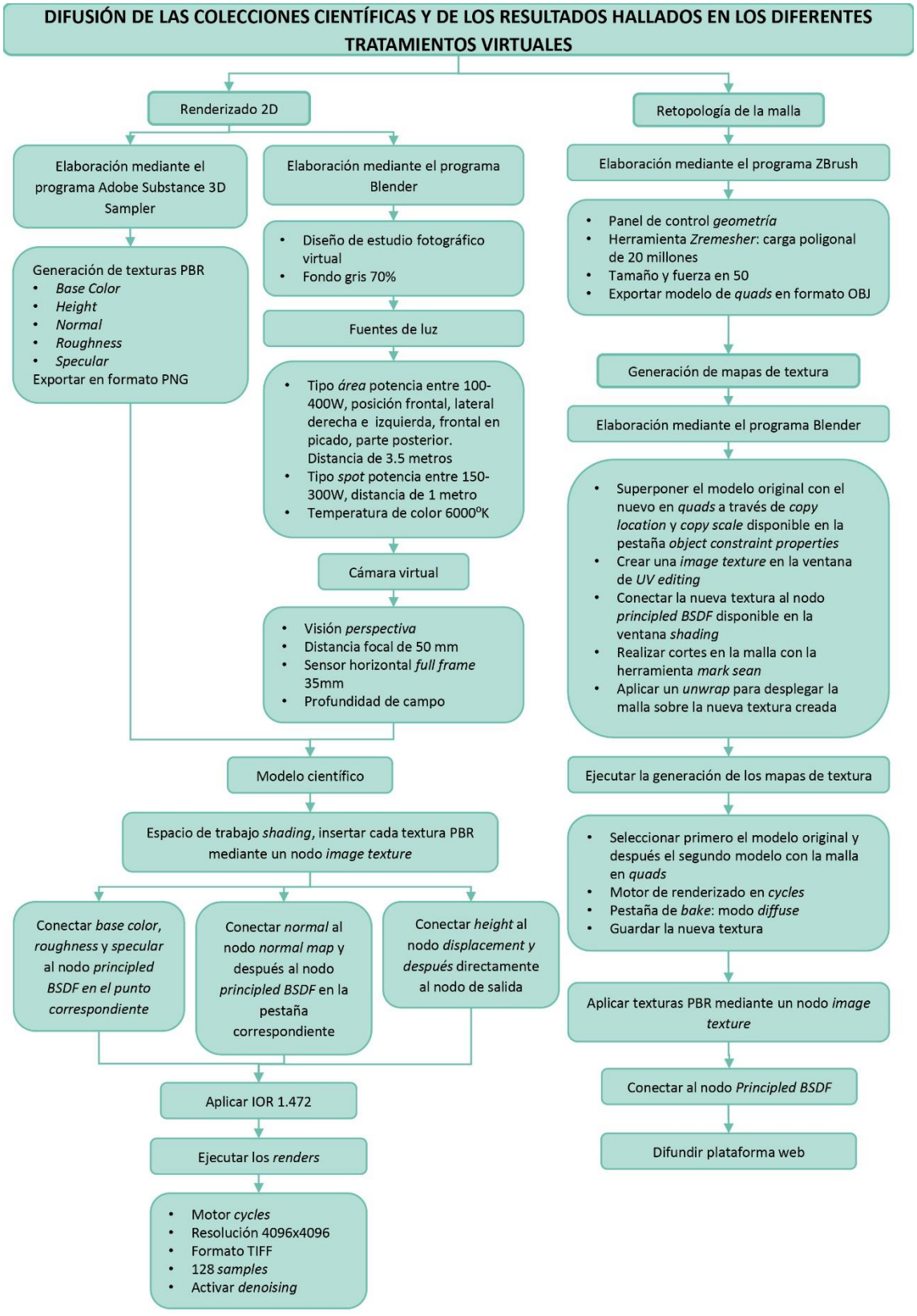


Figura 169. Protocolo de difusión de las colecciones anatómicas científicas. © Emanuel Sterp Moga.

4.9. Caracterización de materiales de impresión 3D para la fabricación de moldes y obtención de positivos

4.9.1. Análisis de los materiales y posiciones de fabricación aditiva

4.9.1.1. Impresión 3D FDM

Los ensayados centrados en hallar la mejor posición en horizontal y vertical según su eje principal y con su base formando diferentes ángulos 0º, 45º y 90º con la plataforma de impresión (figura 170), mediante el material PLA, han ofrecido resultados muy significativos (figura 171) (Sterp Moga et al., 2022a). A priori, las posiciones horizontal y vertical han influido en la calidad de los acabados superficiales debido a la orientación de la deposición del filamento en el eje X durante la impresión.

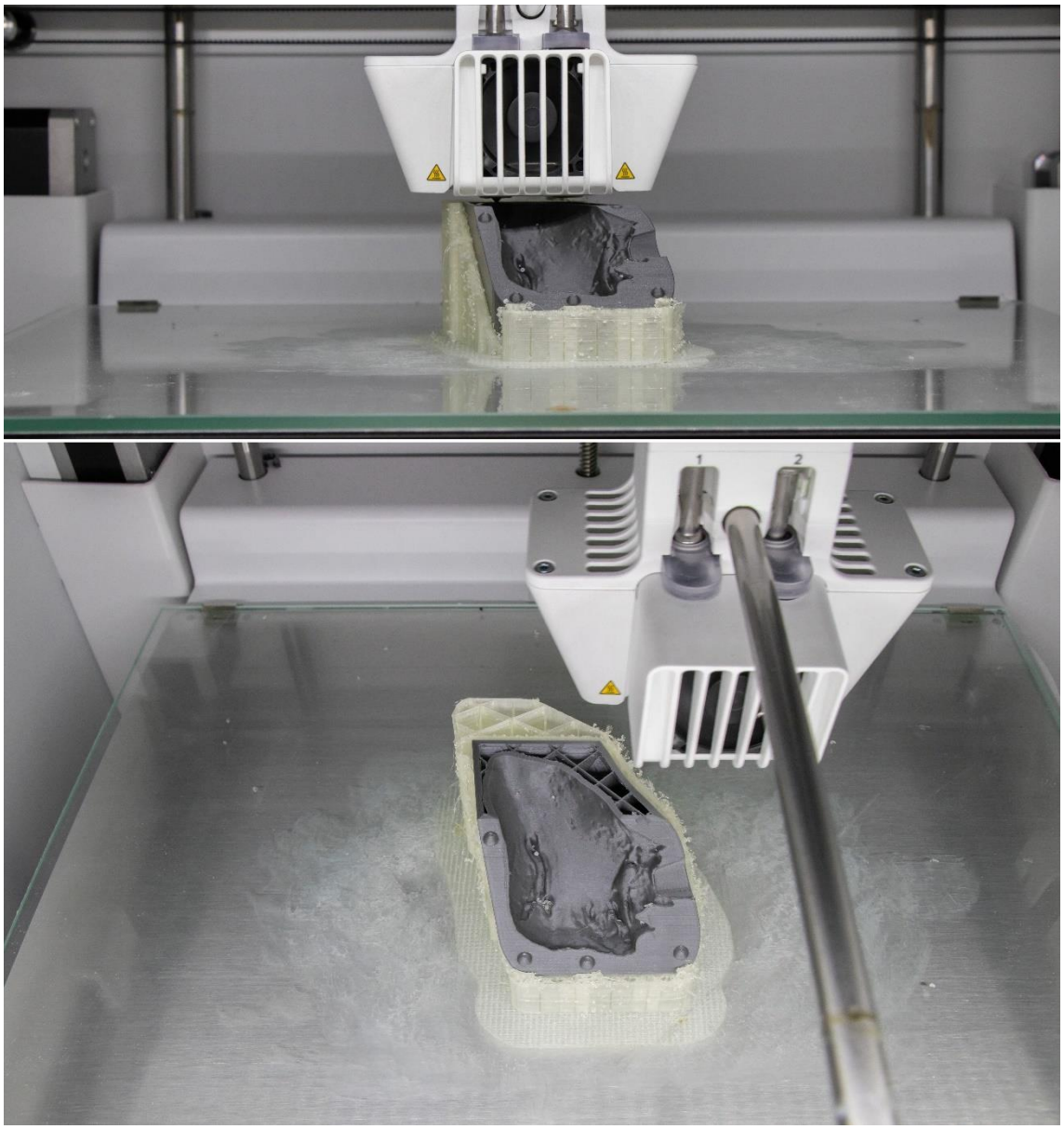


Figura 170. Proceso de impresión de los moldes. © Emanuel Sterp Moga.

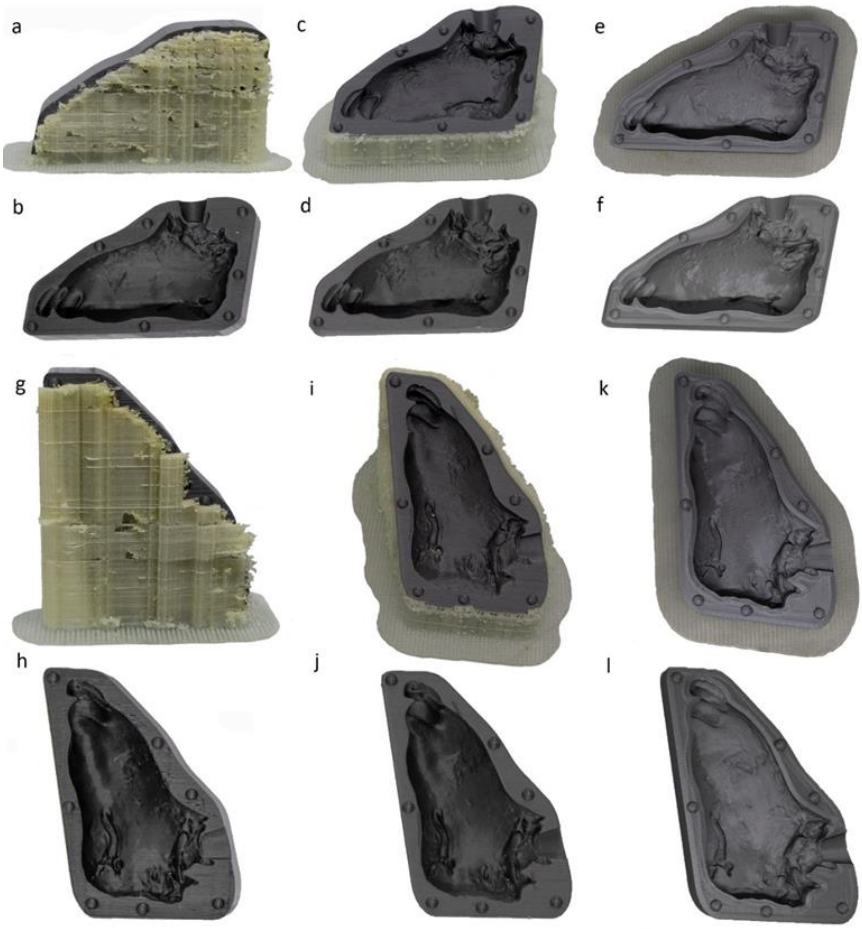


Figura 171. Impresión 3D de los moldes en diferentes ángulos mediante el material PLA. a) Posición horizontal 0º soportes. b) Posición horizontal 0º. c) Posición horizontal 45º soportes. d) Posición horizontal 45º. e) Posición horizontal 90º soportes. f) Posición horizontal 90º. g) Posición vertical 0º soportes. h) Posición vertical 0º. i) Posición vertical 45º soportes. j) Posición vertical 45º. k) Posición vertical 90º soportes. l) Posición vertical 90º. © Emanuel Sterp Moga.

La posición horizontal, con la base a 0º respecto a la plataforma de impresión, ha ofrecido unos resultados regulares en los detalles ubicados en determinadas zonas complejas del molde (figura 172 a), siendo varios los hilos que no se han terminado de depositar y fundir correctamente (figura 173 a). No obstante, en gran parte del molde, las capas se han colocado correctamente sin apreciarse apenas las líneas de unión entre ellas (figura 173 d).

El molde ubicado en la posición horizontal con la base de 45º en relación con la plataforma de impresión, ha ofrecido mejores resultados. Este ángulo de fabricación ha permitido depositar el filamento con gran precisión, evitando las alteraciones sufridas en determinadas zonas, como en el caso anterior (figuras 172 b y 173 b). Respecto a las líneas de impresión de cada capa, han quedado correctamente dispuestas, siendo casi inapreciables en toda la superficie (figura 173 e).

En cuanto a la posición horizontal con la base a 90º de la plataforma de impresión, los resultados de los detalles en zonas comprometidas han sido buenos. Sin embargo, el hilo se ha depositado en la mayor parte del molde perpendicularmente. Ello ha generado que las líneas de unión entre capa y capa sean muy evidentes (figura 172 c), con la consecuente pérdida de los detalles superficiales (figura 173 c y f).

Respecto a la posición vertical a 0º según su base de impresión, los resultados han sido muy similares a los obtenidos en la colocación horizontal. No obstante, se han podido detectar algunas imperfecciones más que afectan a la calidad del molde (figuras 172 d y 174 a). En cuanto a la posición vertical con la base a 45º, ha proporcionado buenos resultados, pero la deposición del hilo en esta ubicación ha evidenciado más las diferentes capas del filamento, con ligeras imperfecciones (figuras 172 e y 174 b). Por último, en relación con la posición vertical con la base de 90º respecto a la plataforma de impresión, se han logrado los mismos resultados que en la orientación horizontal, quedando muy evidente la deposición de los hilos por capas (figuras 172 f y 174 c).

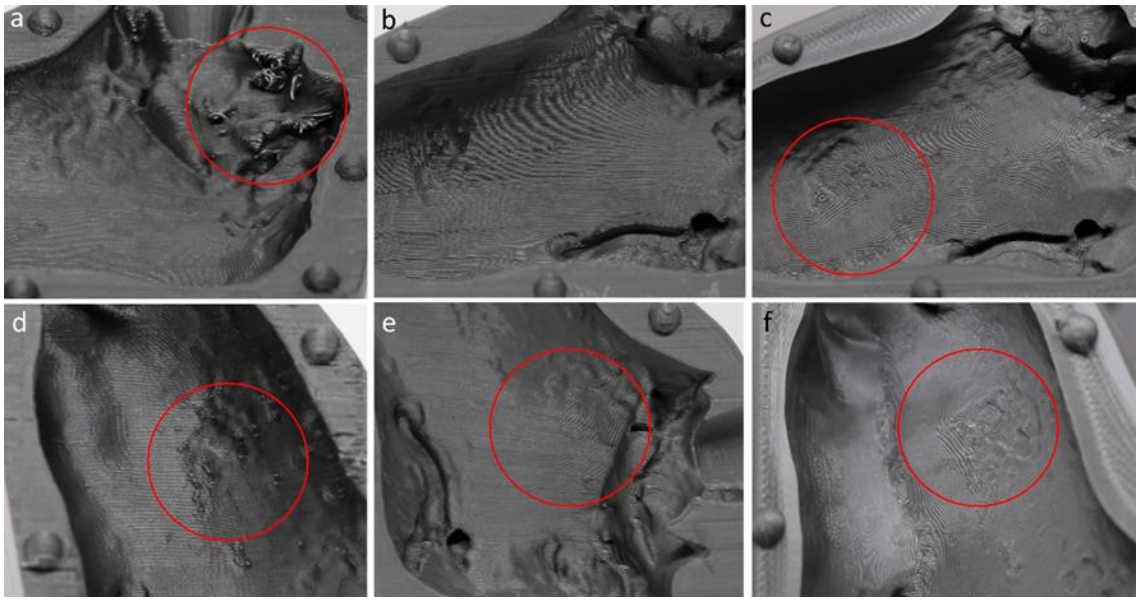


Figura 172. Análisis de los detalles de la impresión 3D de los moldes en diferentes posiciones y ángulos. a) Posición horizontal 0º. b) Posición horizontal 45º. c) Posición horizontal 90º. d) Posición vertical 0º. e) Posición vertical 45º. f) Posición vertical 90º. © Emanuel Sterp Moga.

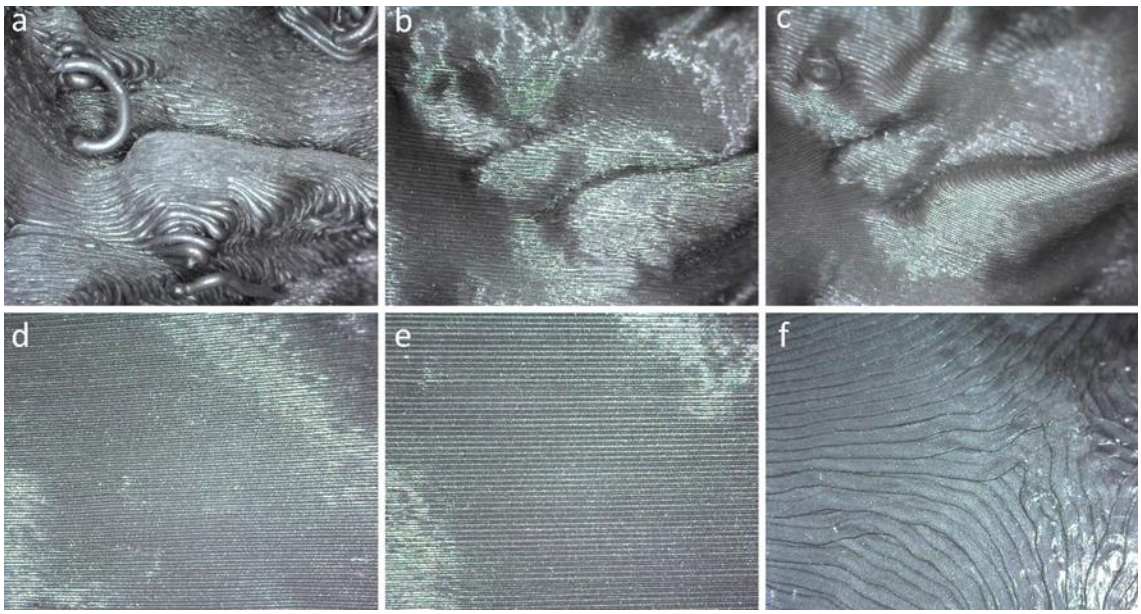


Figura 173. Análisis de los detalles de la impresión 3D de los moldes en diferentes posiciones y ángulos mediante el microscopio digital Dino-Lite. a) Posición horizontal 0º. b) Posición horizontal 45º. c) Posición horizontal 90º. d) Posición horizontal 0º. e) Posición horizontal 45º. f) Posición horizontal 90º. © Emanuel Sterp Moga.

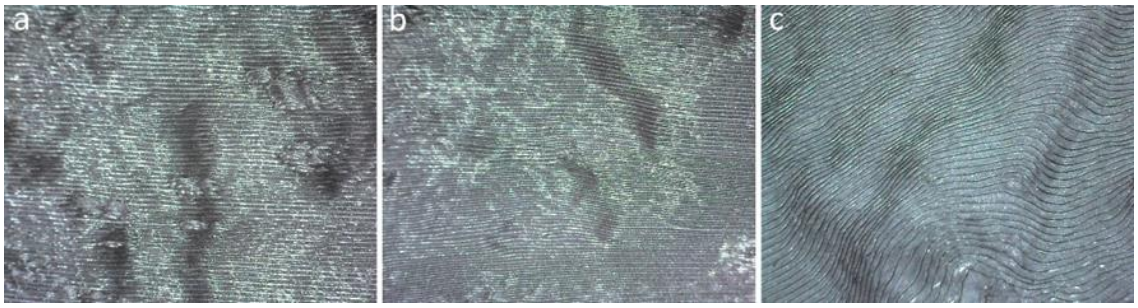


Figura 174. Análisis de los detalles de la impresión 3D de los moldes en diferentes posiciones y ángulos mediante el microscopio digital Dino-Lite. a) Posición vertical 0º. b) Posición vertical 45º. c) Posición vertical 90º. © Emanuel Sterp Moga.

Por otro lado, las pruebas correspondientes al positivado de los moldes han revelado datos importantes para tener en cuenta a la hora de realizar un facsímil o elemento tridimensional a reintegrar. Comenzando con los ensayos correspondientes al pincelado de la cera en el molde (figura 175 a), durante la aplicación, se han formado numerosas láminas, ofreciendo finalmente un acabado un tanto irregular, sobre todo, en los detalles superficiales (figuras 176 a y 177 a). Esto ha sucedido debido al rápido enfriamiento de la cera. A pesar de haber proporcionado una temperatura superior a la de fusión, no ha sido suficiente para conseguir una unión estable en las diversas capas en un único bloque. Mediante esta técnica de aplicación se ha obtenido un volumen compuesto por múltiples láminas, no pudiendo garantizar que todas ellas estén perfectamente unidas.

En cuanto a la prueba llevada a cabo mediante el vertido de la cera (figura 175 b), los tiempos se redujeron con respecto al ensayo anterior. Por otro lado, se han obtenido unos resultados de mayor precisión y calidad, logrando un registro sin irregularidades en la superficie o pequeñas partes faltantes como sí se han producido en la técnica del pincelado (figuras 176 b y 177 b). Teniendo en cuenta estos primeros resultados, se ha decidido utilizar la práctica del vertido, ya que es un procedimiento mucho más rápido y proporciona mejores acabados.

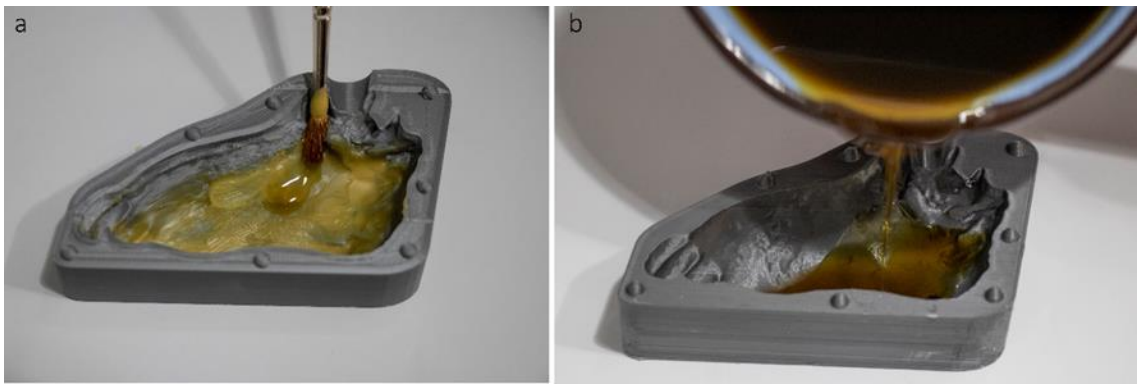


Figura 175. a) Proceso de pincelado de la cera en el molde. b) Proceso de vertido de la cera en el molde. © Emanuel Sterp Moga.

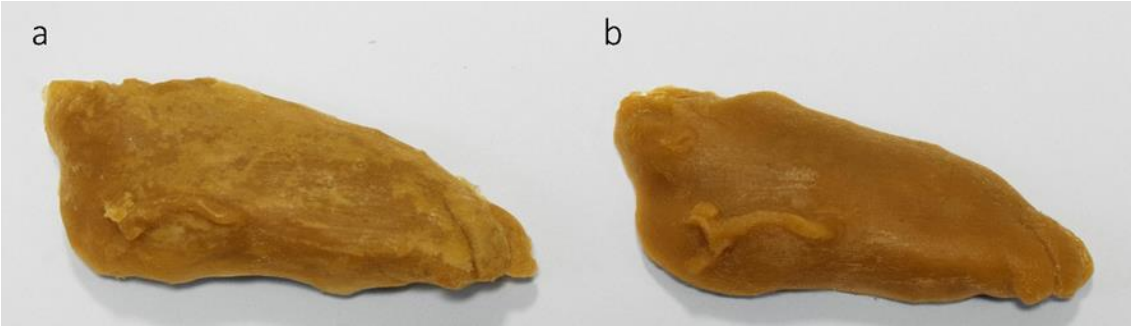


Figura 176. a) Resultado del positivo obtenido mediante el pincelado de la cera en el molde. b) Resultado obtenido del proceso de vertido de la cera en el molde. © Emanuel Sterp Moga.

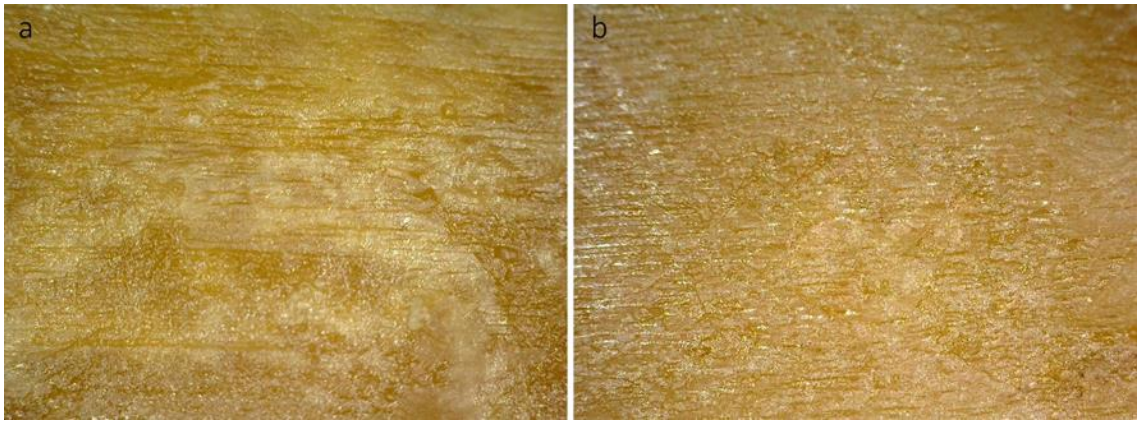


Figura 177. Análisis mediante el microscopio digital Dino-Lite. a) Resultado del positivo obtenido mediante el pincelado de la cera en el molde. b) Resultado obtenido del proceso de vertido de la cera en el molde. © Emanuel Sterp Moga.

Durante el proceso de extracción del positivo del molde, se han observado dificultades, pues fue inevitable que la pieza sufriera alteraciones (figura 178). Esto se debe a que durante el vertido o pincelado, la cera se ha quedado adherida al material termoplástico del molde, haciendo que fuese complicada la extracción de la misma. Se ha conseguido mejorar la operación mediante el empleo de una capa fina de vaselina. Ello ha permitido una extracción fácil y rápida del modelo sin que sufriera ningún daño. Es importante mencionar que la aplicación de la vaselina se tiene que realizar sobre toda la superficie de modo uniforme, ya que de haber alguna zona carente de este material favorecerá la adhesión de la cera al molde y, por tanto, se podrían producir alteraciones en el transcurso del proceso de desmoldeo. Por otro lado, se ha observado que el positivo sin la capa de vaselina registra las líneas del molde (figura 179 a) y con ella se tapan mínimamente (figura 179 b) reproduciendo de manera más fiel el modelo con detalles de alta calidad. Este factor ha sido muy importante para lograr un aspecto lo más parecido posible al modelo original.



Figura 178. Alteración del positivo tras extraerlo del molde sin aplicar una capa de vaselina a modo de desmoldeante. © Emanuel Sterp Moga.

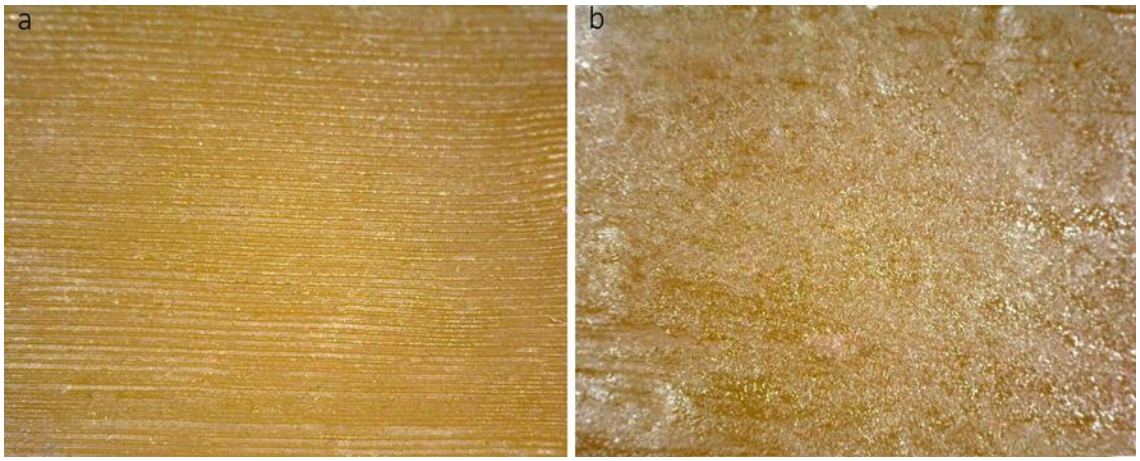


Figura 179. Análisis mediante el microscopio digital Dino-Lite. a) Positivo en cera sin aplicar vaselina como material desmoldeante PLA. b) Positivo en cera tras aplicar la vaselina en el molde PLA. © Emanuel Sterp Moga.

Tras concluir estos primeros resultados en los positivos de cera, se ha procedido a positivar los moldes elaborados en la posición horizontal y vertical con la base a 0º, 45º y 90º respecto a la plataforma de impresión, a fin de corroborar los datos derivados de los moldes.

Como se observa en las figuras 180 y 181, el positivo obtenido con un ángulo de 0º correspondiente a la posición horizontal, ha plasmado las diferentes irregularidades del molde. Ello ha registrado las líneas de impresión del molde modificado los acabados superficiales (figuras 180 a y 181 a). En el caso del positivo conseguido a 45º en la posición horizontal, ha ofrecido un resultado uniforme en toda la superficie (figuras 180 b y 181 b). Se han registrado con gran precisión cada uno de los detalles del modelo. Respecto al positivo logrado con un ángulo de 90º en la posición horizontal, los resultados han revelado una considerable pérdida de los detalles superficiales a causa de las líneas marcadas generadas durante la impresión perpendicular (figuras 180 c y 181 c). Teniendo en cuenta los resultados hallados, el ángulo a 90º queda totalmente descartado, ya que se reducen mucho los detalles superficiales del modelo. En cuanto a las tres posiciones verticales (figura 180 d, e, y f) han registrado las imperfecciones de los moldes en mayor o menor medida. Como era de esperar, los ángulos a 0º y 90º han sido los que más irregularidades han tenido. Las líneas marcadas de cada capa generadas durante la impresión, a pesar del empleo de la vaselina, estos defectos tan evidenciados no se han visto matizados (figura 181 d y f). El positivo obtenido a 45º ha sido el que mejores resultados ha logrado de entre las tres posiciones verticales. No obstante, se han detectado algunos desperfectos en los detalles (figura 181 e). A partir de los resultados alcanzados en las ubicaciones verticales, se ha descartado dicha posición con sus respectivos ángulos, ya que no se han obtenido los acabados esperados.

En las seis muestras, la extracción del positivo del molde se ha logrado con gran facilidad gracias al empleo de la vaselina, evitando tener que hacer fuerza u otras operaciones que pudieran causar pequeños daños o roturas durante la extracción del positivo.

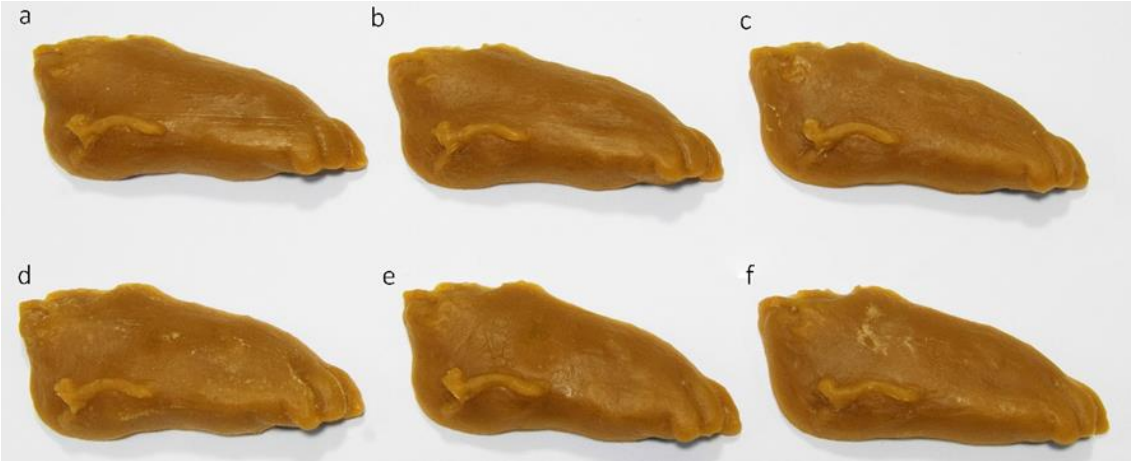


Figura 180. Positivo en cera de los moldes impresos en 3D con diferentes ángulos. a) Posición horizontal 0º. b) Posición horizontal 45º. c) Posición horizontal 90º. d) Posición vertical 0º. e) Posición vertical 45º. f) Posición vertical 90º. © Emanuel Sterp Moga.

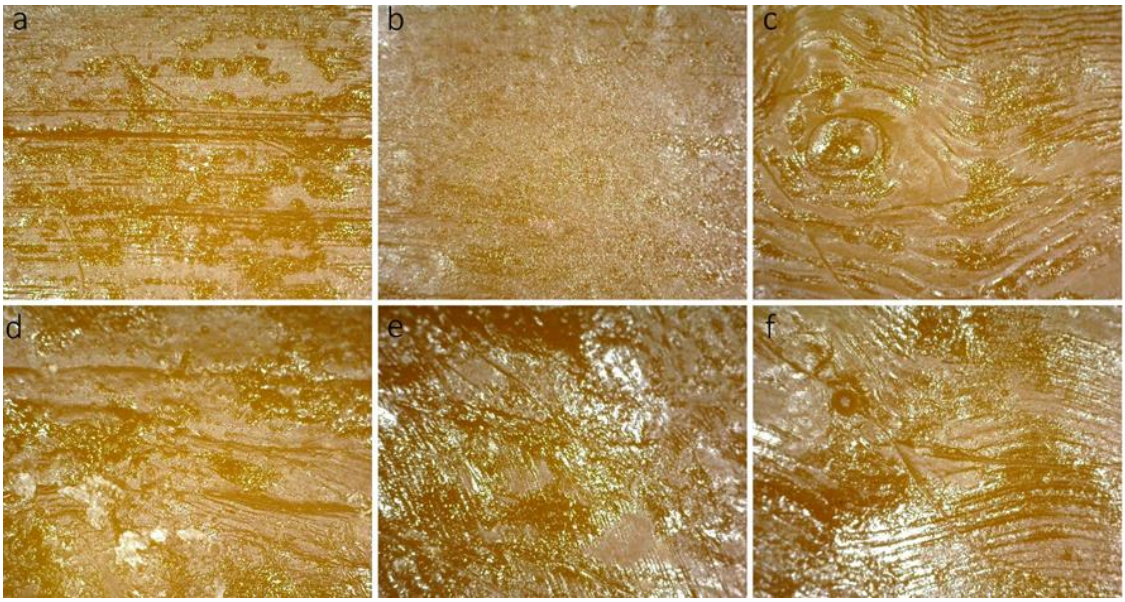


Figura 181. Análisis mediante el microscopio digital Dino-Lite. Positivo en cera de los moldes impresos en 3D con diferentes ángulos. a) Posición horizontal 0º. b) Posición horizontal 45º. c) Posición horizontal 90º. d) Posición vertical 0º. e) Posición vertical 45º. f) Posición vertical 90º. © Emanuel Sterp Moga.

A continuación, en la tabla 8, se recogen los datos aplicados para la impresión de los diferentes moldes, los detalles alcanzados en los mismos y en los positivos de cera, así como las dificultades encontradas durante la extracción de las figuras de los modelos.

Posición	Ángulo	Tiempo de impresión	Tiempo de elaboración	Detalle de posición del filamento por capas	Dificultad de desmoldeo con vaselina	Nivel de detalle positivo cera
Horizontal	0º	888 min	4 min	Medio-Alto	Baja	Medio
Horizontal	45º	1.051 min	4 min	Alto	Baja	Alto
Horizontal	90º	651 min	4 min	Bajo	Baja	Bajo
Vertical	0º	956 min	4 min	Bajo	Baja	Bajo
Vertical	45º	1.156 min	4 min	Medio-Alto	Baja	Medio
Vertical	90º	695 min	4 min	Bajo	Baja	Bajo

Tabla 8. Características de la impresión FDM de los moldes en PLA, análisis del proceso de desmoldeo y calidad en los positivos en cera. © Emanuel Sterp Moga.

Los datos obtenidos tanto de los análisis de las diferentes posiciones y ángulos de fabricación en los moldes como de los positivos en cera indicaron que la mejor orientación para la impresión de los moldes de estas características era la horizontal con un ángulo de 45º. De este modo, se ha logrado una gran calidad en los detalles y una buena precisión en la deposición del filamento por capa. Por todo ello, se ha estimado oportuno ensayar los diferentes materiales termoplásticos con la posición horizontal a 45º respecto a la plataforma de impresión (figura 182).

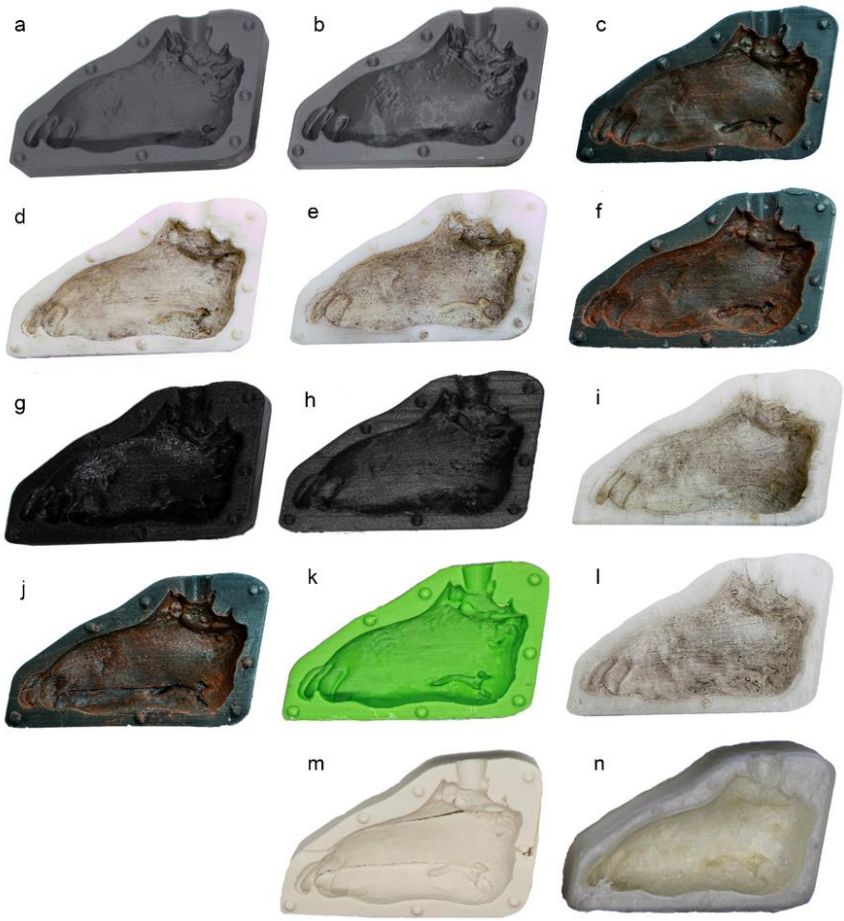


Figura 182. Impresión horizontal a 45º de los moldes con diversos materiales. a) ABS. b) PLA. c) PLA Tough*. d) PA HT*. e) HIPS*. f) PP*. g) TPU 95A. h) FLEX 93A. i) PETG*. j) PLA 3D870*. k) ASA. l) POLYCARBONATE*. m) NYLSTRONG. n) PVA. *(Se ha aplicado un esmalte de color oscuro en los materiales más blancos y otro rojizo en los materiales más oscuros con el fin de apreciar mejor las irregularidades y la línea de cada capa). © Emanuel Sterp Moga.

El molde obtenido en el material ABS, ha ofrecido unos óptimos resultados en general (figura 183 a), pese a que ciertos detalles no se han conseguido plasmar con la calidad necesaria. No obstante, el molde en PLA sí que ha logrado reproducir mejor los pequeños acabados a diferencia del ABS. La deposición del filamento prácticamente no se aprecia, registrando los detalles de la superficie con gran precisión (figura 183 b). Un material muy parecido, el PLA 3D870, ha alcanzado buenos resultados, a excepción de alguna pequeña imperfección (figura 183 j). En cuanto al material PLA Tough, en comparación con los otros de la misma familia PLA y PLA 3D870, ha permitido lograr aún mejores acabados en los detalles, sobre todo en determinadas zonas complejas, con una gran resolución (figura 183 c).

En lo que respecta al material PA HT, en general, ha plasmado el relieve con una buena calidad. No obstante, suele generar ciertas imperfecciones durante la deposición del filamento en zonas pequeñas con una superficie fina, no logrando representar todos los detalles existentes (figura 183 d). Por otro lado, el material HIPS ha conseguido, en general, unos buenos acabados, pero de nuevo los detalles se han visto algo reducidos debido a la deposición del filamento, pues estos se han marcado, aunque mínimamente (figura 183 e).

Un material un tanto diferente, como es el caso del PP, ha dado unos resultados regulares en cuanto a los detalles. Al ser un material semirrígido, durante la deposición del filamento estas líneas no han conseguido un acabado muy uniforme, con lo que ha provocado una mayor pérdida en los detalles. Asimismo, también ha producido cierto *stringing* (figura 183 f). El *stringing*, a menudo, se genera porque durante los movimientos de impresión, el *hotend* gotea un poco de material y ello crea hilos finos en el modelo. A pesar de establecer la temperatura y la velocidad de retracción recomendada por el fabricante, este problema ha sido constante.

Respecto a los materiales flexibles, el TPU 95A, se consideró oportuno emplearlo para facilitar la extracción del positivo. A pesar de ello y dadas las características del filamento, la deposición de este ha quedado muy marcada y, a su vez, se ha producido bastante *stringing*, (figura 183 g). Como consecuencia de estas circunstancias, la calidad de los detalles se ha reducido drásticamente. En esta misma línea, el material FLEX 93A, ha ofrecido peores resultados aún que el producto anterior. Durante la impresión se ha generado mucho *stringing*, aun habiendo establecido los parámetros de temperatura y velocidad de retracción recomendados por el fabricante. Los resultados muestran una considerable pérdida de los detalles (figura 183 h).

Por otro lado, con el material PETG, en general, se han logrado unos buenos acabados, pero la deposición de los hilos nuevamente en cada capa se ha marcado, lo que ha provocado la pérdida de detalles (figura 183 i). Otro de los materiales ensayados, ASA, ha conseguido unos resultados muy parecidos al PETG. A pesar de lograr una buena calidad en su conjunto, algunos de los detalles se han perdido, ya que queda muy evidente la deposición del filamento (figura 183 k). En cuanto al material POLYCARBONATE, ha proporcionado resultados regulares, puesto que la aplicación del filamento una vez más ha quedado muy evidenciada (figura 183 l).

Respecto al NYLSTRONG, es uno de los materiales que ha logrado unos acabados realmente buenos (figura 183 m), si bien, durante la impresión en sucesivas ocasiones se generaba *cracking*, delaminación entre capas. Esto ha podido suceder por la diferencia de temperatura en ciertas zonas, a pesar de que la temperatura de fusión establecida por el fabricante genera una fusión perfecta entre cada capa de filamento. Sin embargo, la posible diferencia de temperatura que se produce a ciertas alturas de impresión provoca la delaminación y, por tanto, la ruptura. Pese a los buenos resultados que ha ofrecido en los detalles superficiales, la dificultad de impresión encontrada ha sido alta.

Por último, el material PVA ha proporcionado acabados regulares, ya que la deposición del filamento queda marcada. Además, requiere de unas condiciones de almacenamiento muy específicas para no alterar los detalles impresos. Se ha observado que cualquier variación de temperatura o humedad modifican ligeramente los acabados superficiales (figura 183 n).

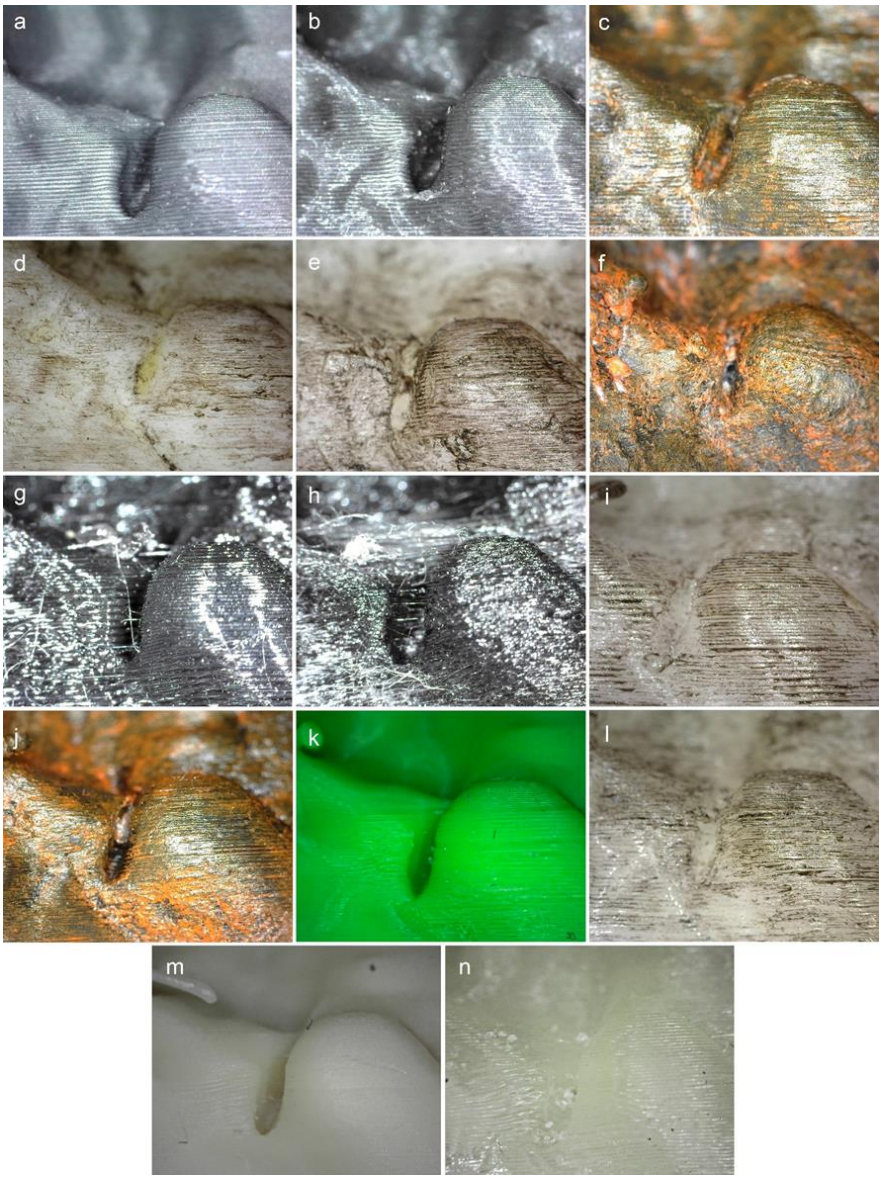


Figura 183. Análisis mediante el microscopio digital Dino-Lite. Detalle de la calidad de la impresión horizontal a 45º de los moldes con diversos materiales. a) ABS. b) PLA. c) PLA Tough*. d) PA HT*. e) HIPS*. f) PP*). g) TPU 95A. h) FLEX 93A. i) PETG*. j) PLA 3D870*. k) ASA. l) POLYCARBONATE*. m) NYLSTRONG. n) PVA. *(Se ha aplicado un esmalte de color oscuro en los materiales más blancos y otro rojizo en los materiales más oscuros con el fin de apreciar mejor las irregularidades y la línea de cada capa). © Emanuel Sterp Moga.

Durante la elaboración del positivo en cera sobre cada molde, se han podido corroborar los resultados obtenidos anteriormente (figura 184). Los materiales ensayados, PLA (figuras 184 b y 185 b), PLA Tough (figuras 184 c y 185 c) y PLA 3D870 (figuras 184 j y 185 j), han proporcionado datos muy similares con pequeños matices en los detalles superficiales. De los tres tipos, el que mejores acabados muestra ha sido el PLA Tough, ya que no se han apreciado las líneas de impresión de cada capa y los detalles han adquirido una gran definición.

Por otro lado, materiales como ABS (figuras 184 a y 185 a), HIPS (figuras 184 e y 185 e), PETG (figuras 184 i y 185 i), ASA (figuras 184 k y 185 k) e POLYCARBONATE (figuras 184 l y 185 l), han reflejado de forma más o menos evidente la deposición por capas del filamento, lo que ha conducido a la pérdida de pequeños detalles y acabados superficiales. Otro material como

el PA HT (figuras 184 d y 185 d) ha ofrecido un registro general bien definido, a excepción de algunas partes más finas y complejas.

En cuanto a los materiales flexibles TPU 95A (figuras 184 g y 185 g) y FLEX 93A (figuras 184 h y 185 h), la constante generación del *stringing* ha provocado una pérdida de detalles importantes, debido a la notable marca del filamento de cada capa y de los hilos sueltos. Por ello, estos materiales han quedado descartados para este tipo de tareas. En el caso del PP, los resultados se asemejan un tanto a los obtenidos en los productos flexibles (figuras 184 j y 185 j).

Respecto al material NYLSTRONG, los detalles logrados han sido perfectos, pero la gran dificultad de imprimir las piezas sin generar *cracking*, como se ha mencionado anteriormente, hace descartar el uso de dicho material (figuras 184 m y 185 m).

Por último, en relación con el PVA, tras haber realizado varios positivos, la superficie del molde se ha ido desgastando progresivamente a causa de las temperaturas aplicadas durante el vertido de la cera y la humedad que aporta. Ello ha provocado una pérdida de detalles muy elevada (figuras 184 n, 185 n, y 186). Este material se ha utilizado con el fin de poder ensayar la técnica del molde perdido, ya que el PVA se disuelve en agua. Tras el rápido deterioro que sufre al efectuar pocas pruebas, este material se descartó para la realización de reproducciones por colada en cera.

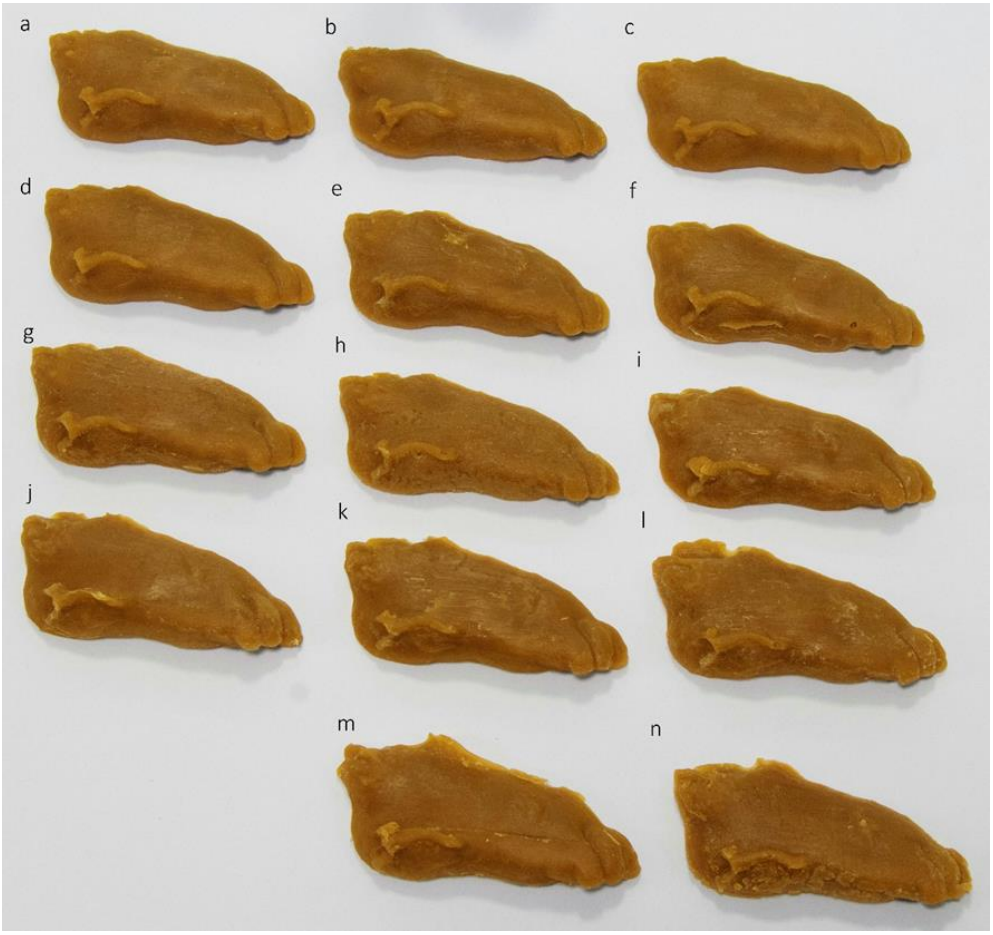


Figura 184. Positivo en cera de los moldes impresos en la posición horizontal a 45º en diferentes materiales. a) ABS. b) PLA. c) PLA Tough. d) PA HT. e) HIPS. f) PP. g) TPU 95A. h) FLEX 93A. i) PETG. j) PLA 3D870. k) ASA. l) POLYCARBONATE. m) NYLSTRONG. n) PVA. © Emanuel Sterp Moga.

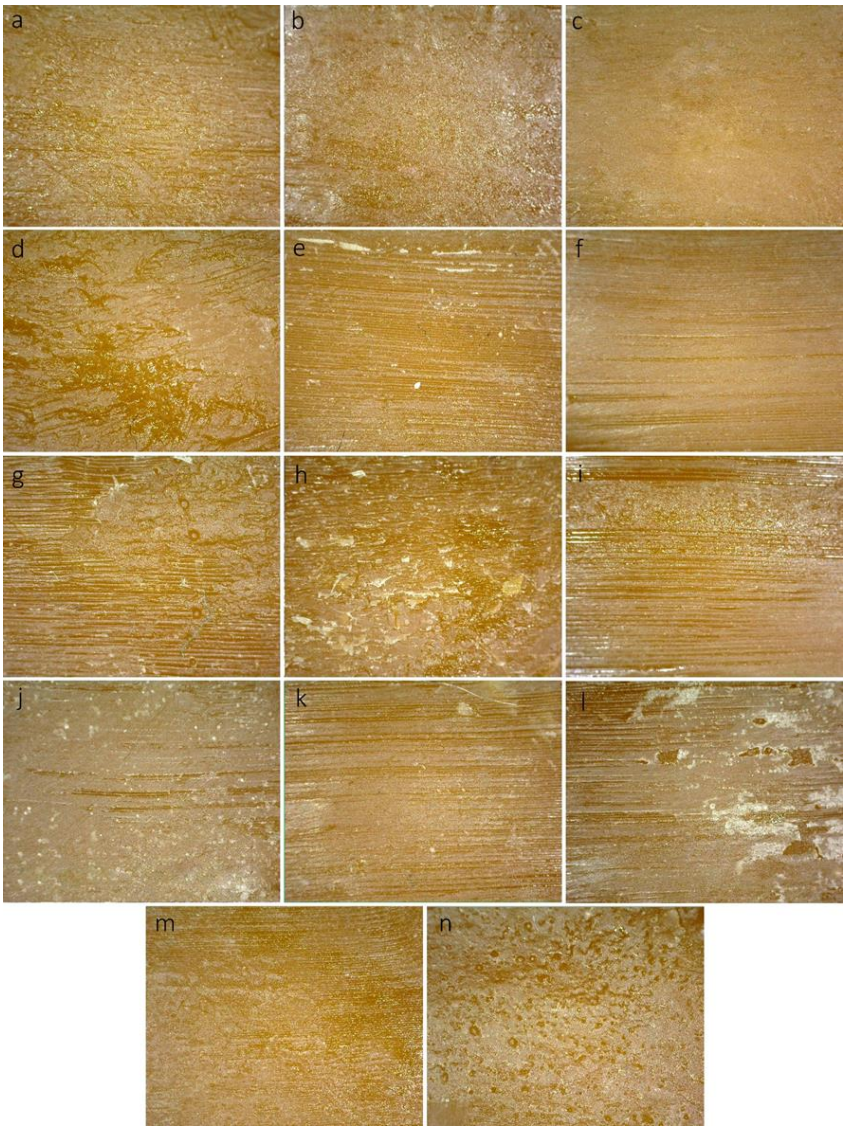


Figura 185. Análisis mediante el microscopio digital Dino-Lite. Detalle de los positivos en cera de los moldes impresos en la posición horizontal a 45º en diferentes materiales. a) ABS. b) PLA. c) PLA Tough. d) PA HT. e) HIPS. f) PP. g) TPU 95A. h) FLEX 93A. i) PETG. j) PLA 3D870. k) ASA. l) POLYCARBONATE. m) NYLSTRONG. n) PVA. © Emanuel Sterp Moga.

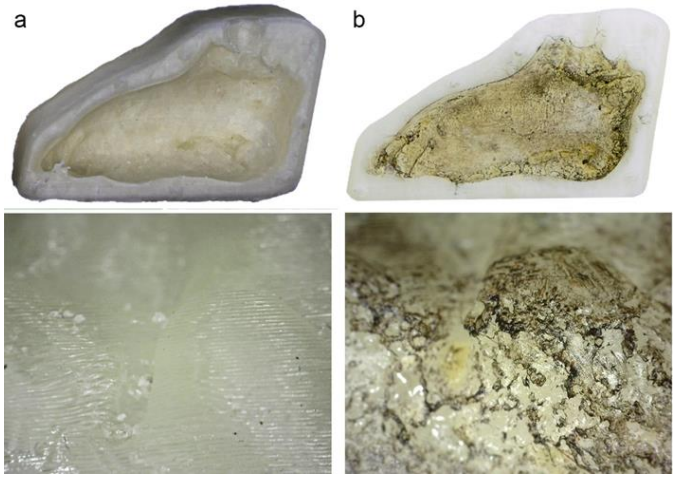


Figura 186. a) Superficie del PVA antes de la aplicación de la cera. b) Superficie del PVA después de la aplicación de la cera (se ha aplicado un esmalte oscuro para apreciar mejor los resultados). © Emanuel Sterp Moga.

En la tabla 9 se recogen los datos aplicados para la impresión de los diferentes moldes, los detalles obtenidos en los diversos positivos, así como la dificultad de extracción de cada uno de ellos.

Material de impresión	Tiempo de impresión	Tiempo de elaboración	Detalle de posición del filamento por capas	Dificultad de desmoldeo con vaselina	Nivel de detalle positivo cera
ABS	1.169 min	4 min	Alto	Baja	Alto
PLA	1.051 min	4 min	Alto	Baja	Alto
PLA Tough	1.051 min	4 min	Muy alto	Baja	Muy alto
PA HT	1.051 min	4 min	Medio-Alto	Baja	Medio
HIPS	1.051 min	4 min	Medio-Alto	Media	Medio
PP	747 min	4 min	Medio	Baja	Medio
TPU 95A	828 min	4 min	Bajo	Muy Baja	Bajo
FLEX 93A	828 min	4 min	Muy Bajo	Muy Baja	Muy Bajo
PETG	1.051 min	4 min	Medio	Media	Medio
PLA 3D	1.051 min	4 min	Alto	Baja	Alto
ASA	1.051 min	4 min	Medio	Baja	Medio
POLYCARBONATE	1.051 min	4 min	Medio	Media	Medio
NYLSTRONG	1.051 min	4 min	Alto	Baja	Alto
PVA	1.051 min	4 min	Bajo	Media	Bajo

Tabla 9. Características de impresión de los moldes fabricados con diversos materiales de impresión FDM, análisis del proceso de desmoldeo y calidad en los positivos en cera. © Emanuel Sterp Moga.

Los resultados conseguidos con los ensayados de los diferentes materiales determinan que la familia de los termoplásticos PLA proporciona los acabados más detallados en comparación con los materiales restantes. De entre los tipos PLA, PLA Thought y PLA 3D870, el que mejores calidades ha ofrecido, tanto en la impresión como en la obtención del positivo, ha sido el PLA Thought. Los detalles alcanzados en este material han asegurado una gran calidad y precisión en el volumen de cera a reproducir. Además, el PLA Thought también ha sido uno de los materiales que mayor facilidad ha presentado a la hora de retirar los positivos de su interior con ayuda de la capa de vaselina aplicada, respecto a los otros materiales.

Por último, se ha considerado necesario analizar con detalle el comportamiento térmico que experimenta en este caso el material PLA Thought a la hora de aplicar la cera. Se elaboraron tres probetas con distintos grosores en la pared de 0,5, 1 y 1,5 mm (este último es el que se estableció en la pared de los moldes), con el fin de determinar si el material termoplástico experimenta alguna anomalía o deterioro. Los resultados revelaron que el PLA Thought tras verter la cera a 75ºC, no ha sufrido ninguna deformación o degradación (figuras 187 y 188).

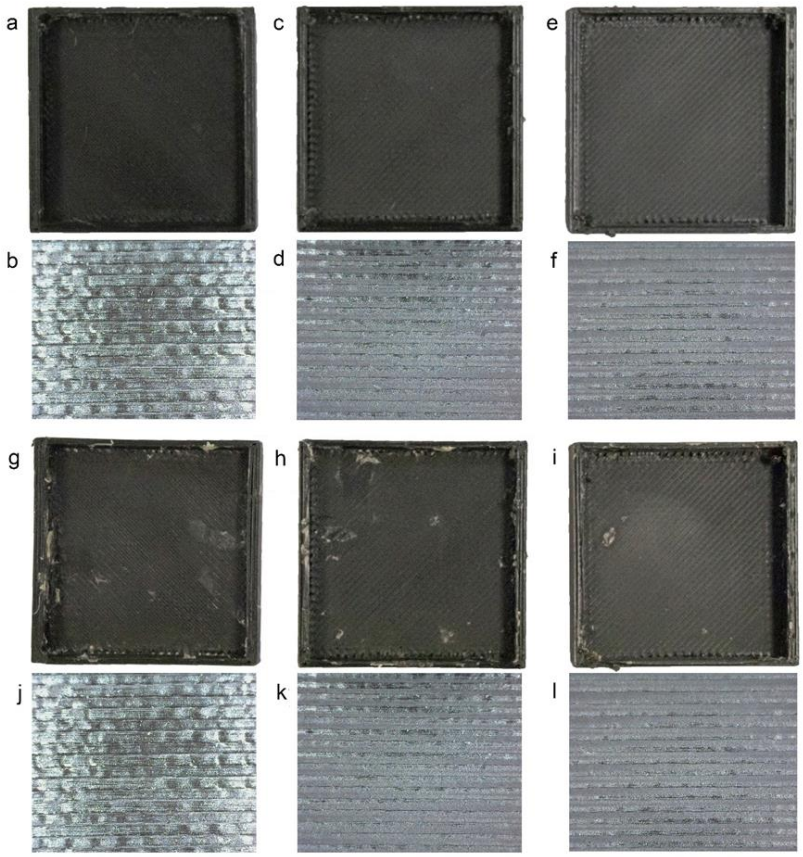


Figura 187. Análisis de las deformaciones o alteraciones del material PLA Thought. a) Antes de aplicar la cera, espesor 0,5 mm. b) Análisis mediante Dino-Lite antes de aplicar la cera, espesor 0,5 mm. c) Antes de aplicar la cera, espesor 1 mm. d) Análisis mediante Dino-Lite antes de aplicar la cera, espesor 1 mm. e) Antes de aplicar la cera, espesor 1,5 mm. f) Análisis mediante Dino-Lite antes de aplicar la cera, espesor 1,5 mm. g) Después de aplicar la cera, espesor 0,5 mm. h) Análisis mediante Dino-Lite después de aplicar la cera, espesor 0,5 mm. i) Después de aplicar la cera, espesor 1 mm. j) Análisis mediante Dino-Lite después de aplicar la cera, espesor 1 mm. k) Después de aplicar la cera, espesor 1,5 mm. l) Análisis mediante Dino-Lite después de aplicar la cera, espesor 1,5 mm. © Emanuel Sterp Moga.

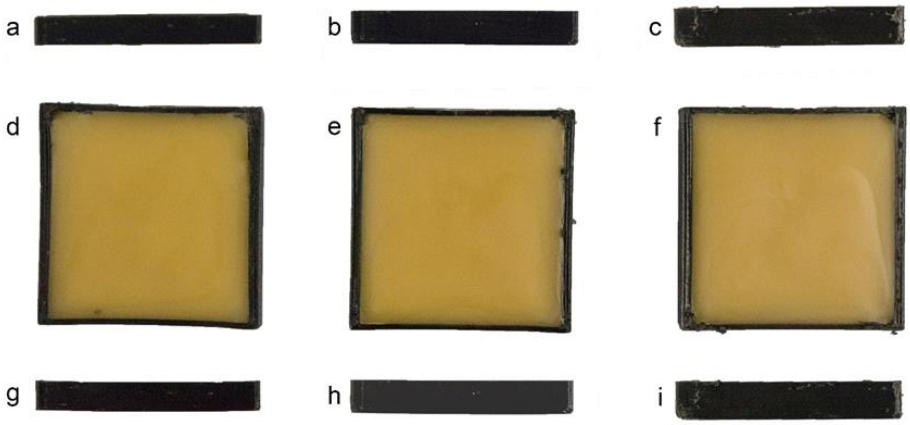


Figura 188. Análisis de las deformaciones o alteraciones del material PLA Thought. a) Canto de la probeta antes de la aplicación de la cera, espesor 0,5 mm. b) Canto de la probeta antes de la aplicación de la cera, espesor 1 mm. c) Canto de la probeta antes de la aplicación de la cera, espesor 1,5 mm. d, e y f) Aplicación de la cera. g) Canto de la probeta después de la aplicación de la cera, espesor 0,5 mm. h) Canto de la probeta después de la aplicación de la cera, espesor 1 mm. i) Canto de la probeta después de la aplicación de la cera, espesor 1,5 mm. © Emanuel Sterp Moga, Alicia Sánchez Ortiz y Óscar Hernández-Muñoz.

4.9.1.2. Impresión 3D LFS

Los moldes, analizados mediante la resina blanca V4, tanto en la posición horizontal como vertical según su eje principal respecto a la plataforma de fabricación con los ángulos establecidos a 0º, 45º y 90º (figura 189), han ofrecido unos interesantes resultados (figura 190). Como en el caso de la impresión FDM, la posición horizontal y vertical también ha repercutido en la calidad de los detalles superficiales debido a la laminación de las capas generadas por el láser durante la impresión.

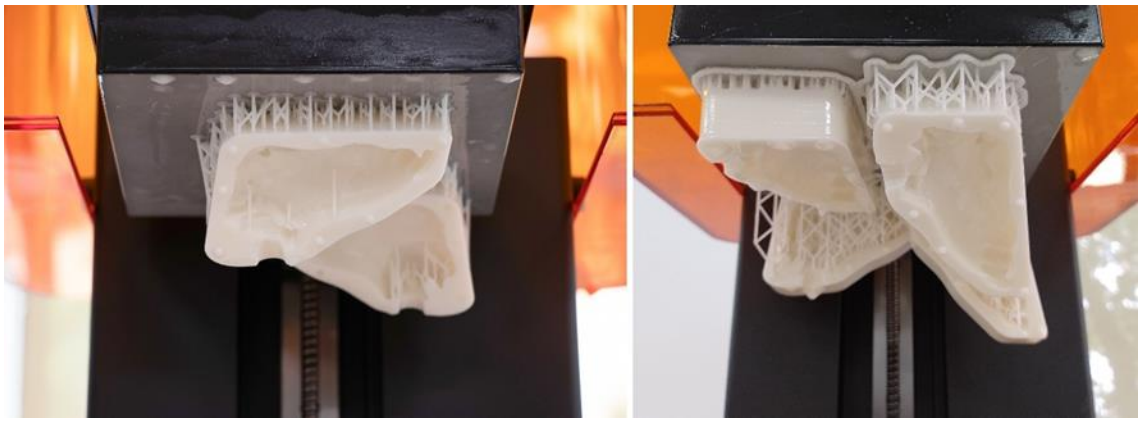


Figura 189. Proceso de impresión de los moldes en diferentes posiciones y ángulos. © Emanuel Sterp Moga.

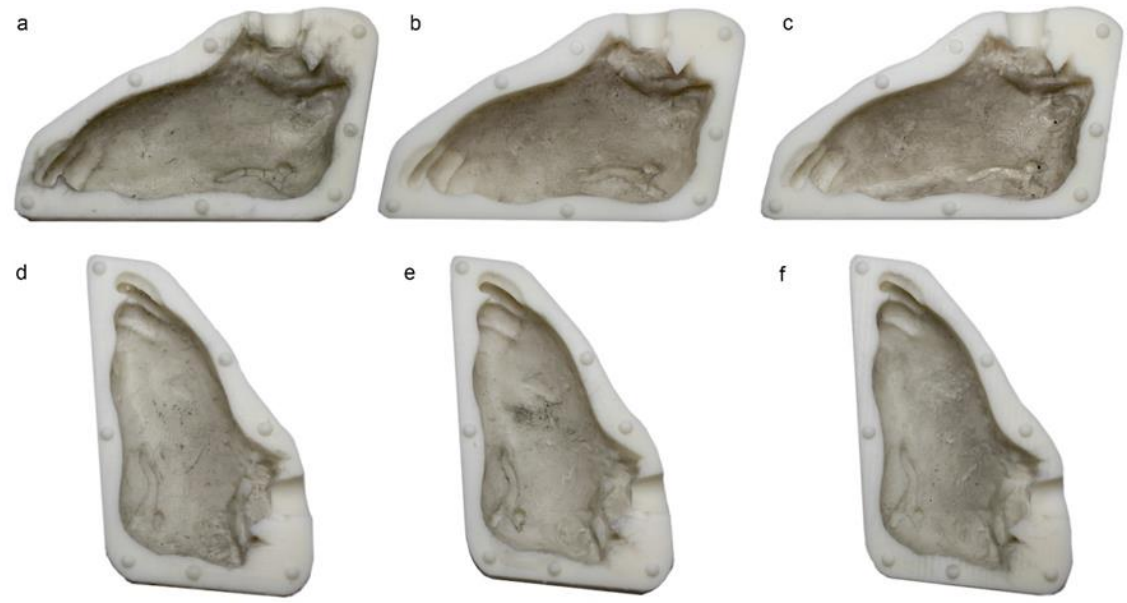


Figura 190. Impresión 3D de los moldes en diferentes posiciones y ángulos mediante la resina blanca V4. a) Posición horizontal 0º. b) Posición horizontal 45º. c) Posición horizontal 90º. d) Posición vertical 0º. e) Posición vertical 45º. f) Posición vertical 90º (se ha aplicado un esmalte oscuro sobre la superficie para apreciar mejor los resultados). © Emanuel Sterp Moga.

La posición horizontal a 0º respecto a la plataforma de impresión, en general, ha ofrecido una buena calidad, sin apreciar casi las líneas de cada capa generada por el láser. Sin embargo, debido a las características de la posición, la impresión ha requerido de muchos soportes ubicados automáticamente sobre la superficie correspondiente al volumen del modelo. Al retirar estos

soportes, los puntos de contacto han quedado muy evidentes en dichas zonas (figuras 191 a y 192 a).

En el caso de la ubicación horizontal con un ángulo de 45º respecto a la plataforma de impresión, los resultados mejoraron en cuanto al ángulo anterior. Al colocar el molde a 45º, los soportes necesarios se han ubicado en el exterior del modelo, siendo las partes interiores prácticamente exentas de estos elementos, salvo en dos zonas muy concretas. Respecto a las líneas que genera el láser en cada capa, en este caso en áreas determinadas también se han apreciado ligeramente (figuras 191 b y 192 b).

En cuanto al tercer ángulo analizado con la posición horizontal a 90º, los detalles superficiales se han visto muy reducidos. Esto se debe a la propia orientación, ya que el haz de láser ha ido uniendo cada capa en dirección perpendicular a la forma del molde y, por ello, los detalles superficiales no se han registrado con calidad prácticamente en toda la superficie (figuras 191 c y 192 c).

Respecto a la posición vertical, los tres ángulos 0º, 45º y 90º según la plataforma de impresión, los resultados fueron muy similares a la ubicación horizontal. El ángulo a 0º ha plasmado mayor evidencia de las líneas de unión entre cada capa, aparte de los puntos de adherencia de los soportes sobre la superficie, aunque en este caso han sido más reducidos, ya que, la posición vertical no requirió de tantos soportes (figuras 191 d y 192 d). En cuanto al ángulo 45º, los resultados fueron casi idénticos a la posición horizontal, salvo que la evidencia de las líneas de unión entre capa y capa es ligeramente más llamativa (figuras 191 e y 192 e). Por último, el ángulo a 90º ha generado la misma cantidad de líneas destacadas en la posición horizontal (figuras 191 f y 192 f).

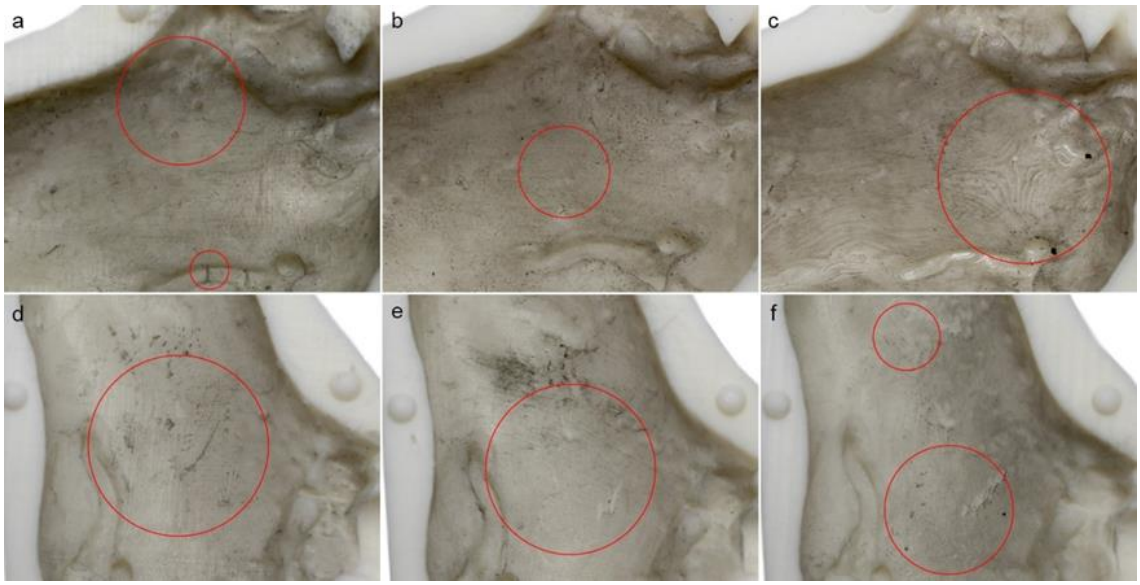


Figura 191. Detalles de la impresión 3D de los moldes en diferentes posiciones y ángulos. a) Posición horizontal 0º. b) Posición horizontal 45º. c) Posición horizontal 90º. d) Posición vertical 0º. e) Posición vertical 45º. f) Posición vertical 90º (se ha aplicado un esmalte oscuro sobre la superficie para apreciar mejor los resultados). © Emanuel Sterp Moga.

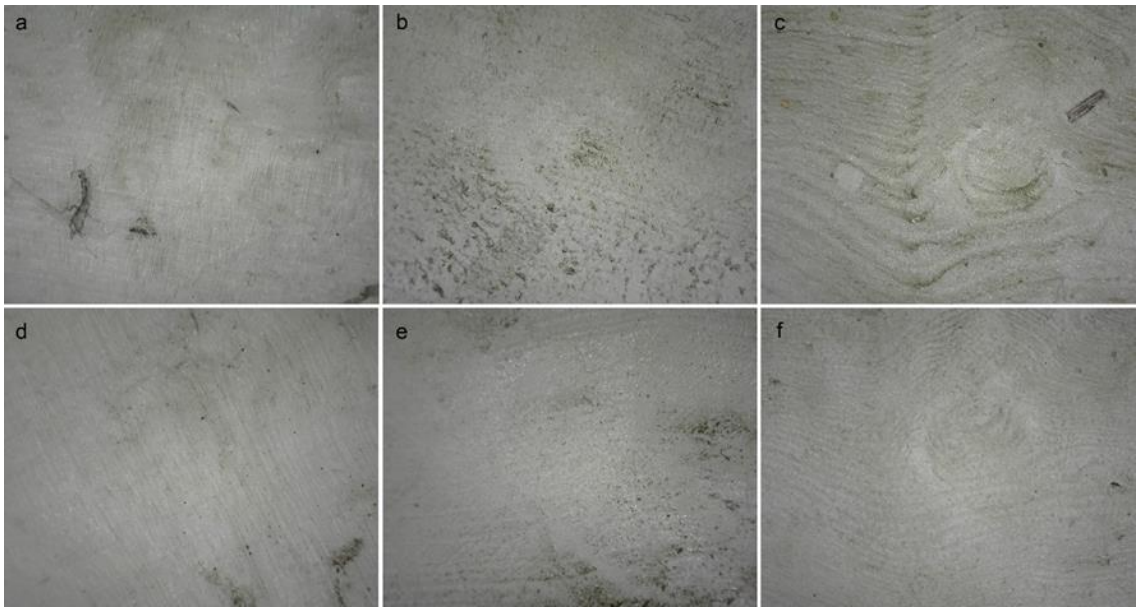


Figura 192. Análisis mediante el microscopio digital Dino-Lite de la impresión 3D de los moldes en diferentes posiciones y ángulos. a) Posición horizontal 0º. b) Posición horizontal 45º. c) Posición horizontal 90º. d) Posición vertical 0º. e) Posición vertical 45º. f) Posición vertical 90º (se ha aplicado un esmalte oscuro sobre la superficie para apreciar mejor los resultados). © Emanuel Sterp Moga.

Comenzando con la parte correspondiente a los positivos en cera de cada uno de los moldes, en primer lugar, cabe mencionar que se ha probado, como en el caso de los moldes FDM, a obtener positivos mediante la técnica del pincelado y también el vertido. En segundo lugar, se ha experimentado sin aplicar previamente una capa de vaselina sobre el molde para ver el grado de dificultad durante la extracción del positivo en comparación con la impresión FDM. Los resultados no fueron los esperados, ya que la cera se ha adherido fuertemente al molde, no pudiendo extraer el positivo sin provocar graves daños. Con el fin de poder retirarlo con la mayor facilidad posible, en todos los ensayos se ha extendido sobre las paredes del molde una capa de vaselina. Se consiguió de ese modo mejorar los primeros resultados, pero en varias ocasiones la extracción del positivo en cera continuó resultando laborioso.

Los ensayos comparativos llevados a cabo respecto al pincelado por capas han dado un acabado irregular, sobre todo en los detalles superficiales. Ello ha generado un volumen prácticamente sólido, compuesto por diferentes láminas, en las que no todas mostraron una adherencia compacta. Además, se pudo observar diversas zonas con tonalidades diferentes debido al proceso de solidificación rápido que sufre la cera durante el proceso de pincelado en capas (figura 193 a y 194 a). Cabe mencionar que, en ocasiones, al extraer el positivo del molde, algunas de las capas formadas por diversas pinceladas pueden conllevar a la fractura de la pieza. Dicho proceso de extracción ha resultado ser menos eficiente que en el caso de los modelos FDM. Respecto a la técnica del vertido, estos inconvenientes no se han manifestado logrando un bloque totalmente sólido y uniforme en toda la pieza (figura 193 b y 194 b).

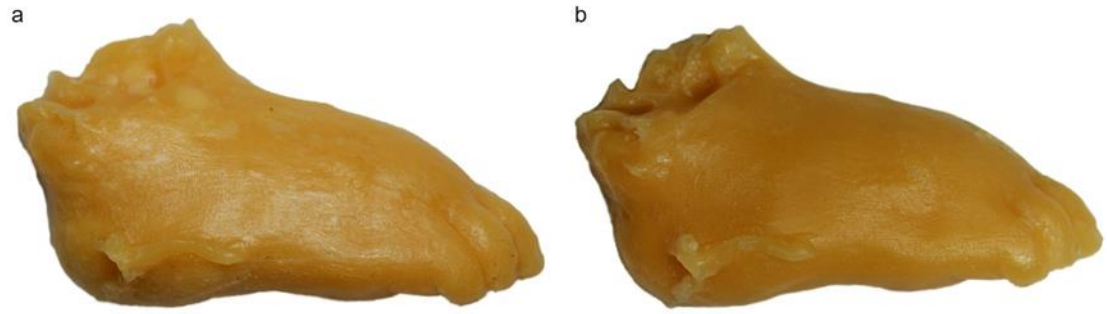


Figura 193. a) Resultado del positivo obtenido mediante el pincelado de la cera en el molde. b) Resultado obtenido del proceso de vertido de la cera en el molde. © Emanuel Sterp Moga.

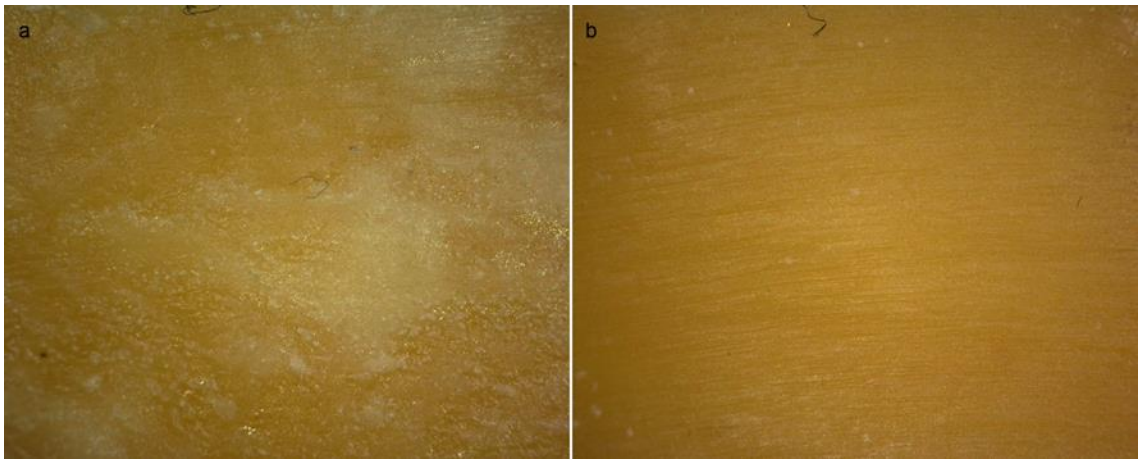


Figura 194. Análisis mediante el microscopio digital Dino-Lite. a) Resultado del positivo obtenido mediante el pincelado de la cera en el molde. b) Resultado obtenido del proceso de vertido de la cera en el molde. © Emanuel Sterp Moga.

Concluida la fase de análisis acerca de la metodología de aplicación de la cera, se ha procedido a positivar los moldes obtenidos en las posiciones horizontal y vertical con sus respectivos ángulos 0º, 45º y 90º (figura 195).

De los tres ángulos ensayados en ambas orientaciones, los resultados han manifestado un mayor grado de precisión en los detalles superficiales que en los hallados previamente en los moldes. Comenzando con la ubicación horizontal, el ángulo a 0º apenas ha plasmado las líneas que se han apreciado en los moldes (figuras 195 a y 196 a). Esto puede deberse a la aplicación de vaselina como desmoldeante, que ha cubierto algunos de los pequeños surcos entre capa y capa. No obstante, en las diferentes zonas correspondientes a la ubicación del contacto de cada uno de los soportes sobre las superficies del volumen, estos han resultado ser muy llamativos (figura 197 a). Este aspecto en la impresión FDM no se ha producido debido a la alta reversibilidad del material PVA utilizado para los soportes. En cuanto al ángulo 45º, el positivo en cera carece prácticamente en todo el volumen del registro de líneas, salvo zonas muy puntuales (figuras 195 b y 196 b). Al no presentar casi soportes sobre la superficie de la forma a reproducir, el modelo se ha logrado con gran fidelidad y calidad. Respecto al ángulo a 90º, todas las líneas generadas se han plasmado en el positivo, reduciendo los detalles superficiales (figuras 195 c y 196 c).

En cuanto a la posición vertical con sus respectivos ángulos, se han corroborado los resultados hallados en los moldes. El positivo obtenido con un ángulo a 0º, ha evidenciado algo más las

líneas entre capa y capa respecto a la posición horizontal (figuras 195 d y 196 d). Asimismo, la unión de los soportes en el interior del molde también se ha registrado, aunque en un área menor. No obstante, los detalles superficiales se han visto más reducidos con respecto a la posición horizontal (figura 197 b). El ángulo a 45º ha ofrecido un positivo casi idéntico a la orientación horizontal, salvo en determinadas zonas donde las líneas de unión entre capas se han visto algo más acentuadas (figuras 195 e y 196 e). Por último, el positivo a 90º ha registrado las líneas llamativas de unión entre las capas debido a la impresión perpendicular respecto al volumen del molde (figuras 195 f y 196 f).

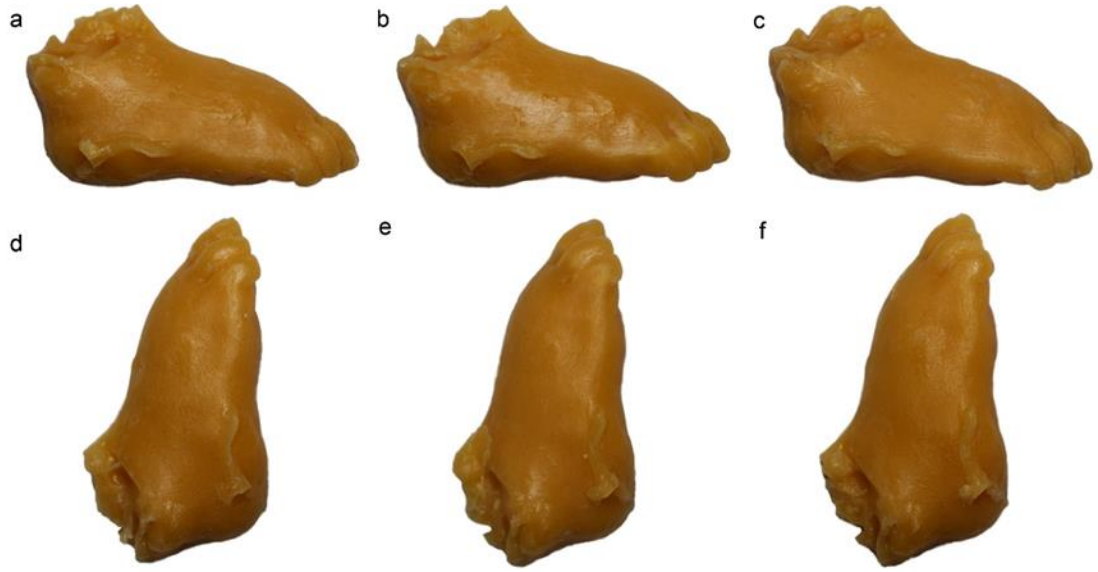


Figura 195. Positivo en cera de los moldes impresos en 3D con diferentes ángulos. a) Posición horizontal 0º. b) Posición horizontal 45º. c) Posición horizontal 90º. d) Posición vertical 0º. e) Posición vertical 45º. f) Posición vertical 90º. © Emanuel Sterp Moga.

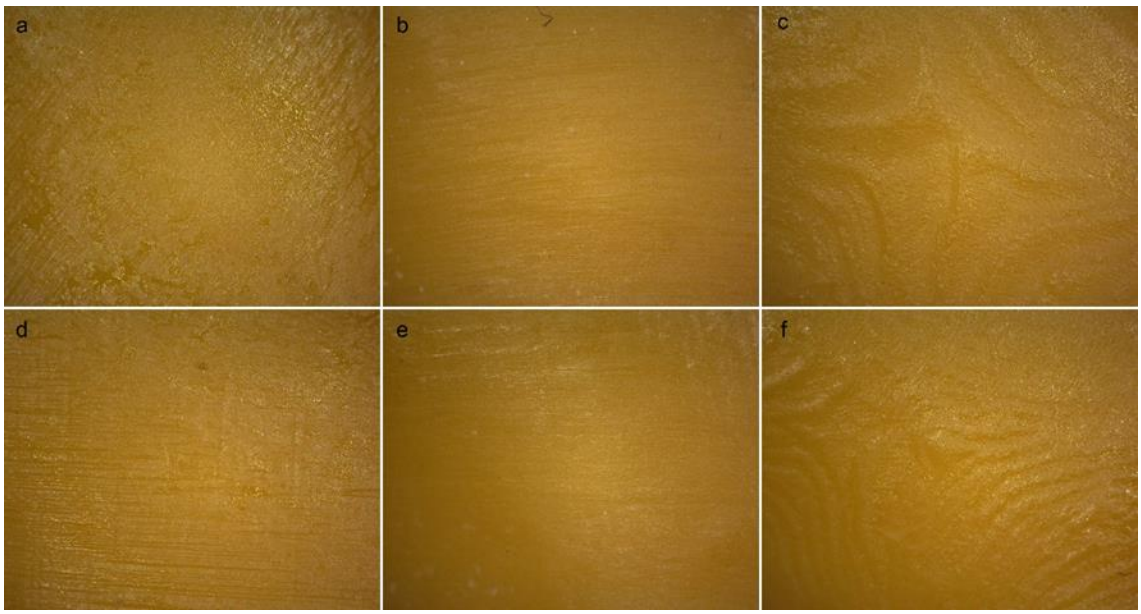


Figura 196. Análisis mediante el microscopio digital Dino-Lite. Positivo en cera de los moldes impresos en 3D con diferentes ángulos. a) Posición horizontal 0º. b) Posición horizontal 45º. c) Posición horizontal 90º. d) Posición vertical 0º. e) Posición vertical 45º. f) Posición vertical 90º. © Emanuel Sterp Moga.

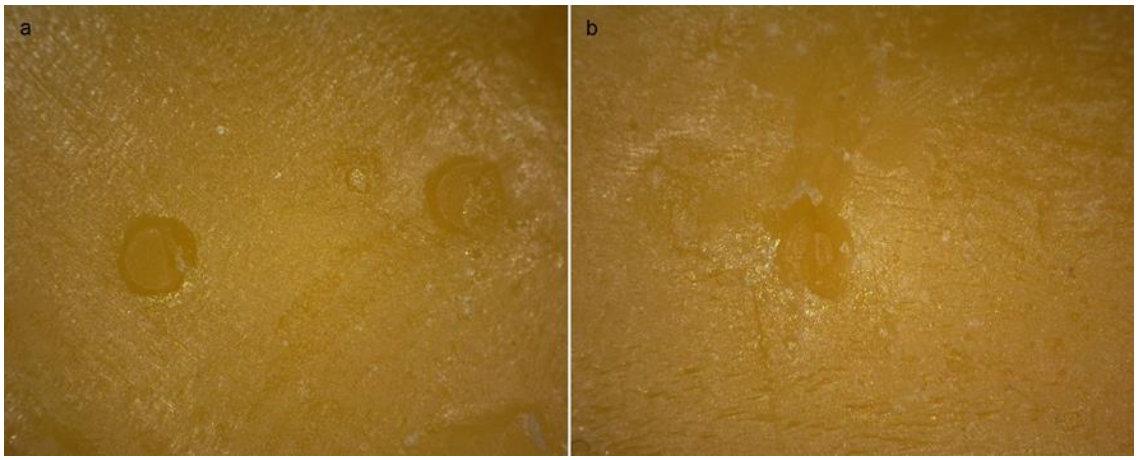


Figura 197. Análisis mediante el microscopio digital Dino-Lite. Detalles de los puntos de unión de los soportes. a) Posición horizontal 0º. b) Posición vertical 0º. © Emanuel Sterp Moga.

Según los resultados obtenidos, de las dos posiciones horizontal y vertical, tanto en la impresión de moldes como en la obtención del positivo de cera, finalmente la orientación vertical ha quedado descartada. En esta disposición los detalles se han visto ligeramente más alterados con respecto a la posición horizontal. En cuanto a los tres ángulos analizados 0º, 45º y 90º, la orientación que mayor calidad ha ofrecido en los acabados superficiales ha sido a 45º. En la tabla 10, se recogen los datos de impresión de los moldes, los detalles alcanzados tanto en los moldes como en el positivo de cera y la dificultad hallada durante la extracción del mismo.

Posición	Ángulo	Tiempo de impresión	Tiempo de elaboración	Detalle de unión de las capas	Dificultad de desmoldeo con vaselina	Nivel de detalle positivo cera
Horizontal	0º	507 min	4 min	Medio	Medio-Bajo	Medio
Horizontal	45º	530 min	4 min	Alto	Medio-Bajo	Alto
Horizontal	90º	323 min	4 min	Bajo	Medio-Bajo	Bajo
Vertical	0º	619 min	4 min	Medio	Medio-Bajo	Medio
Vertical	45º	619 min	4 min	Alto	Medio-Bajo	Alto
Vertical	90º	364 min	4 min	Bajo	Medio-Bajo	Bajo

Tabla 10. Características de impresión de los moldes en la resina V4, análisis del proceso de desmoldeo y calidad en los positivos en cera. © Emanuel Sterp Moga.

4.9.2. Análisis del material ceroso y posiciones de fabricación mediante la máquina sustractiva: Mecanizado CNC

Los ensayos realizados con el bloque de cera orientado en una posición horizontal al 90º respecto a la plataforma base, han aportado unos resultados inesperados alejados de las expectativas iniciales.

La posición vertical fija del cabezal que sustenta la fresa perpendicular a la pieza ha retirado el material con gran precisión en las áreas que ha podido acceder (Figura 198 a y c). En la primera fase de *desbastado*, se ha logrado un acercamiento al volumen final del objeto (Figura 198 b), y en el periodo de *acabado* se han resaltado todos los detalles superficiales del modelo (Figura 198 d).

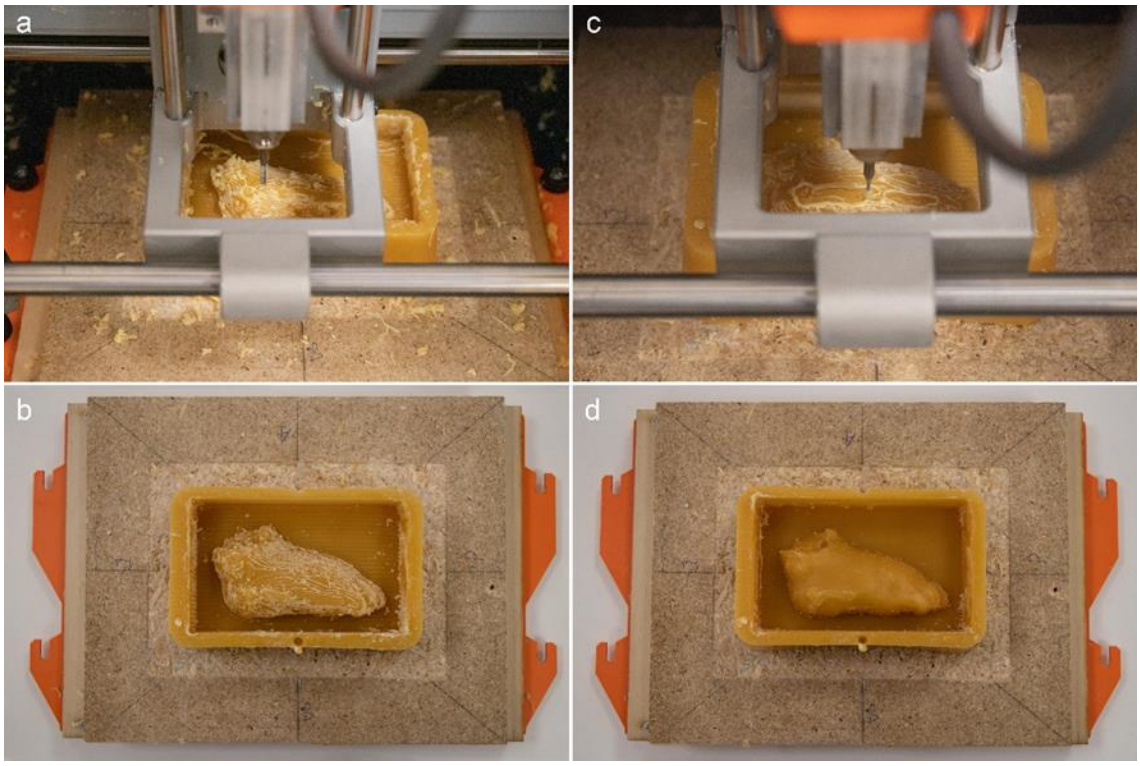


Figura 198. Proceso de sustracción del material céreo cara superior. a) Proceso de desbastado. b) Proceso de desbastado finalizado. c) Proceso de acabado. d) Proceso de acabado finalizado. © Emanuel Sterp Moga.

Sin embargo, dada la única técnica viable para trabajar este tipo de modelos mediante la sustracción a doble cara, al establecer 1.4 cm de desbastado en la superficie superior y 1.6 cm en la inferior, gran parte de la zona, correspondiente al ecuador de la pieza, no se han visto reproducidos. Esto se ha debido a lo que ya se ha comentado, puesto que la fresadora, al trabajar únicamente en vertical perpendicular a la pieza, no ha podido acceder a diversas cavidades que presenta el elemento anatómico. Para reproducir fielmente todo el volumen del pie, aunque parece relativamente sencilla la pieza, es necesario al menos ubicar el bloque de cera en tres o cuatro posiciones para que la fresadora acceda a todos los recovecos que tiene el modelo. Con este tipo de maquinaria dichas operaciones serían prácticamente imposibles. Además, la diferencia de 2 mm entre el desbastado de la superficie superior respecto a la inferior ha generado una rebaba en toda la pieza que se ha eliminado de manera manual. Esta separación ha resultado imprescindible para poder fresar el modelo a doble cara. Los detalles que no ha logrado reproducir la fresadora en la zona del ecuador, no solo comprenden eso 2 mm, sino aproximadamente 10 mm en altura debido a la forma curva del modelo. Esto ha causado que se redujesen los detalles del volumen en determinadas zonas (figura 199).



Figura 199. Zonas donde la fresadora ha alcanzado la profundidad máxima y, por tanto, no ha reproducido los detalles volumétricos. © Emanuel Sterp Moga.

Pese a estos inconvenientes, cabe mencionar que se ha logrado reproducir gran parte del volumen real destacando, sobre todo, detalles superficiales muy pequeños en ciertos puntos, que ni los moldes FDM ni los LFS han conseguido reproducir con tanta calidad (figura 200). No obstante, como en el caso de los moldes, el recorrido de la fresa sobre la superficie ha dejado mínimamente el rastro de las líneas pertenecientes a los cambios de altura.

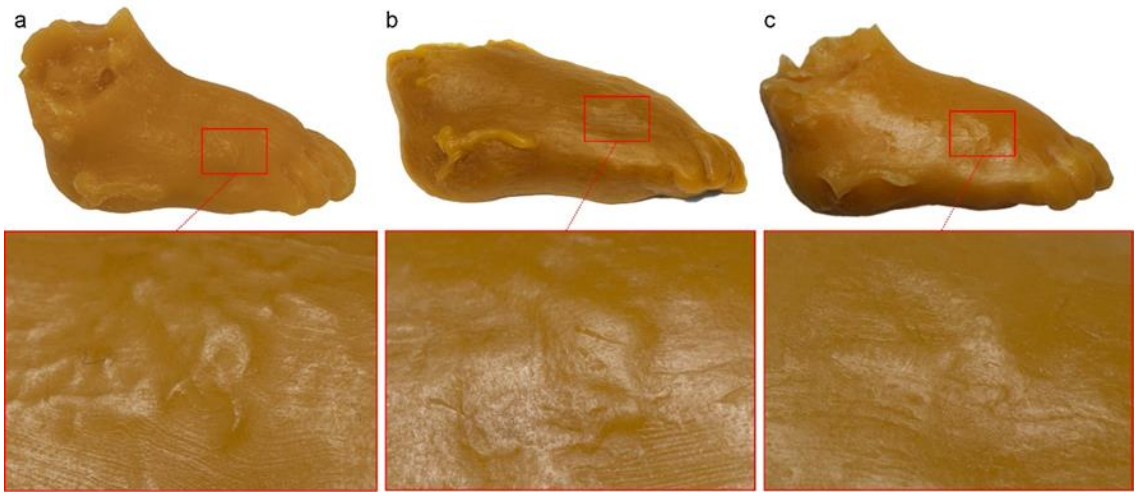


Figura 200. Análisis de los acabados con distintas técnicas de impresión 3D. a) CNC. b) FDM. c) LFS. © Emanuel Sterp Moga.

Con el fin de poder lograr unos datos cuantitativos de las diferencias dimensionales y detalles superficiales de cada uno de los positivos obtenidos con las tres técnicas analizadas FDM, LFS y CNC, se ha procedido a calcular los volúmenes. Para ello, se han superpuesto cada uno de manera individual sobre el modelo original mediante los *mapas de distancias* y se ha establecido un rango de 1 mm de altura que permitirá apreciar con precisión las discrepancias (figura 201).

En el caso del modelo FDM superpuesto con el modelo original ha mostrado un rango de error de entre -0.5 mm y +0.8 mm, siendo el error prácticamente en el 90% de la pieza de entre 0.01 mm y 0.21 mm. Respecto al modelo LFS, el rango de error oscila de -1.2 mm hasta +1.4 mm, en general, revelando un error de entre 0.01 y 0.34 mm en el 90% de la superficie. Por último, el análisis de la figura obtenida por medio de CNC ha presentado un rango de error de entre -0.8 mm y +3.1 mm, en gran parte de la pieza. Solamente el 50% del volumen ha mostrado un error de entre -0.31 mm y +0.43 mm.

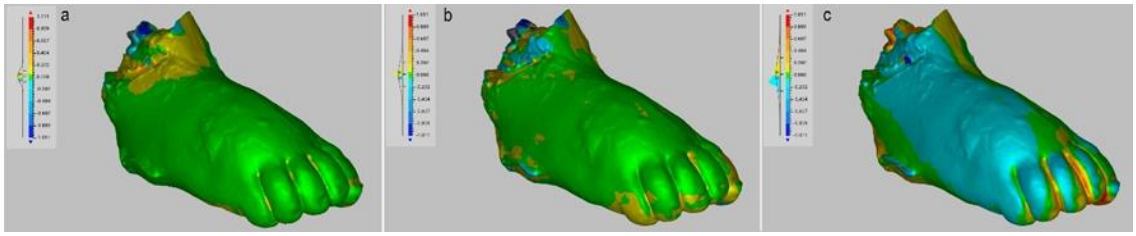


Figura 201. Superposición de los modelos digitalizados obtenidos por distintas técnicas de impresión 3D sobre el modelo original. a) FDM. b) LFS. c) CNC. Distancia 1 mm. © Emanuel Sterp Moga.

Los pequeños errores volumétricos hallados mediante el análisis por medio de los *mapas de distancias* entre FDM y LFS con el original, han revelado que posiblemente se deban a una pequeña merma que sufre la cera durante su enfriamiento.

En el caso de la máquina CNC, la discrepancia dimensional hallada se debe al proceso tan complejo de configuración y sistema de fresado a doble cara. Se ha deducido que durante este proceso en el ecuador de la pieza se pierden pocos milímetros y, como resultado, repercute en toda la figura. Por otro lado, si mediante los sistemas anteriores, la cera se mermaba mínimamente, la gran ventaja del mecanizado CNC es que se parte de un bloque sólido y, por tanto, estas pequeñas diferencias dimensionales no se producirían. Teniendo en cuenta todos estos aspectos y, sobre todo, el tiempo de preparación y trabajo hasta obtener este modelo en CNC (aproximadamente 750 minutos), esta técnica se ha descartado para la reproducción de elementos tridimensionales anatómicos relativamente complejos como el pie. Además, cada tipo de fragmento requerirá de una configuración específica y, por tanto, el tiempo se verá incrementado. Sin embargo, con otro fragmento, por ejemplo, un dedo o piezas más planas, incluso con espesores más finos, estos inconvenientes no se manifestarían.

Volviendo a las dos técnicas de impresión FDM y LFS, ambas han registrado de manera eficiente los volúmenes generales a reproducir, aunque con diversos matices en cuanto a los detalles superficiales.

De entre las dos técnicas, los resultados apuntan a que los moldes son muy similares. En los dos casos, se han obtenido calidades que superaron las expectativas iniciales. Si hubiese que decantarse por una técnica, la impresión LFS con la resina V4 analizada ha mostrado mayor dificultad para retirar los positivos de cera respecto al PLA Thought de FDM. Por otro lado, el precio de los materiales de fabricación también es un factor para valorar, sobre todo, cuando el volumen del trabajo es abundante. Las resinas pueden alcanzar un precio, dependiendo del tipo empleado, desde 4 hasta 16 veces más respecto a los filamentos convencionales de FDM.

Por todo ello, por su eficacia, calidad, volumen de trabajo, precisión, facilidad de extracción de los positivos en cera y precio, la técnica de impresión FDM resulta ser una gran alternativa

para obtener moldes con una formidable calidad y precisión del elemento volumétrico a reproducir empleando el material PLA Thought.

A continuación, en la figura 202 se recoge el modelo de protocolo de actuación desarrollado para la obtención de moldes y positivos en cera mediante la impresión FDM.

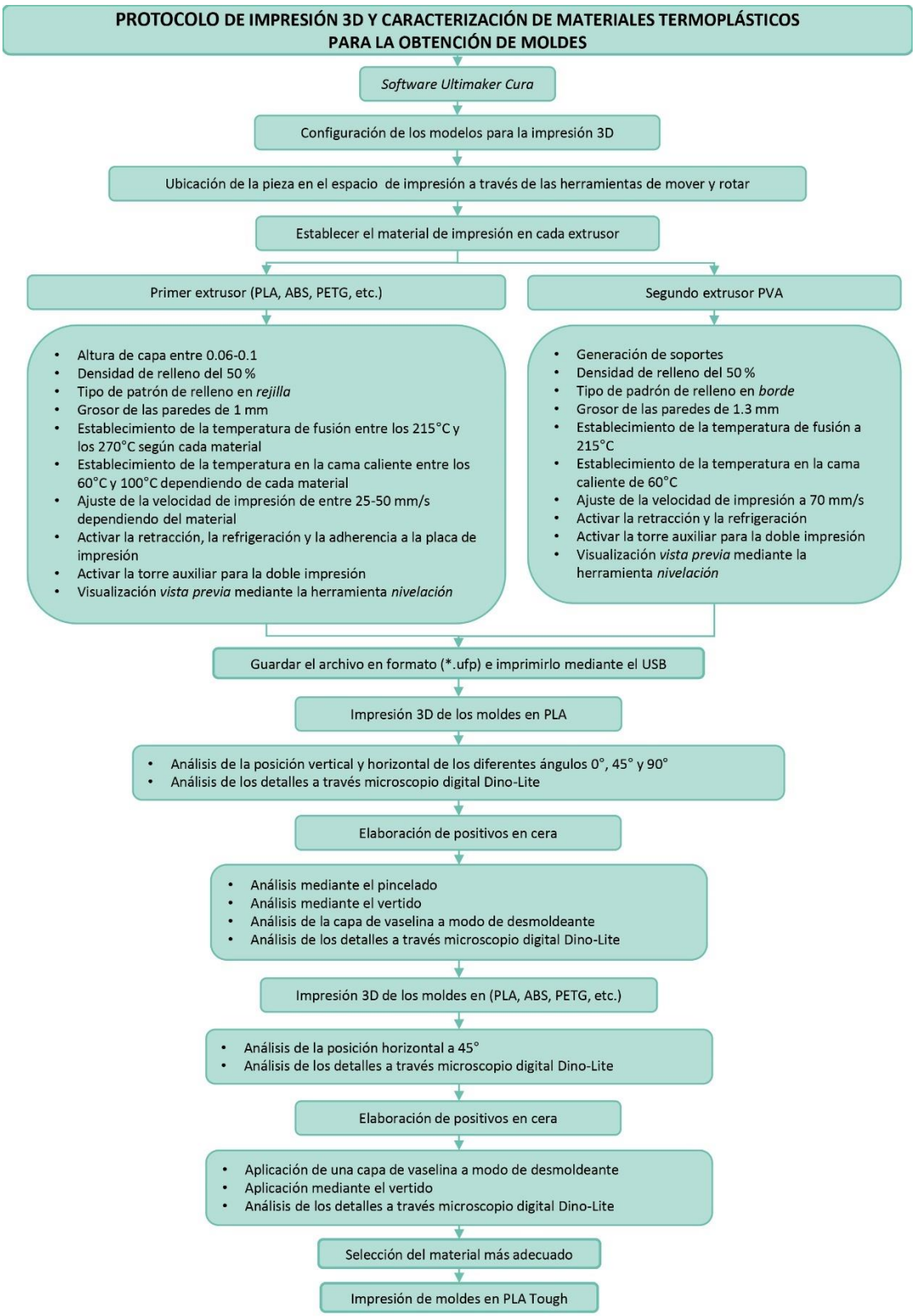


Figura 202. Protocolo de aplicación para la impresión 3D de moldes. © Emanuel Sterp Moga.

4.10. Ensayos mecánicos de tracción y flexión en materiales termoplásticos para la impresión 3D de estructuras auxiliares

4.10.1. Pruebas de tracción

4.10.1.1. Análisis de la posición y densidad de las probetas

Prácticamente, todas las probetas examinadas (figura 203 a) han fracturado de manera limpia en el plano perpendicular a la dirección de impresión con un corte transversal (figuras 203 d y 204). Ello nos indica que las fibras presentan una buena adhesión. Cada muestra tiene un comportamiento diferente, no homogéneo y, por tanto, no se puede predecir el punto de fractura ni la actuación exacta. Las probetas en la posición vertical (PV50) y dos de las probetas verticales (PV10), se han roto con cierta irregularidad en la parte ancha por donde se ha sujetado la muestra (figura 205). Ello ha ofrecido unos parámetros poco fiables, puesto que la rotura no se ha producido en la parte más estrecha de la probeta, es decir, la zona central.

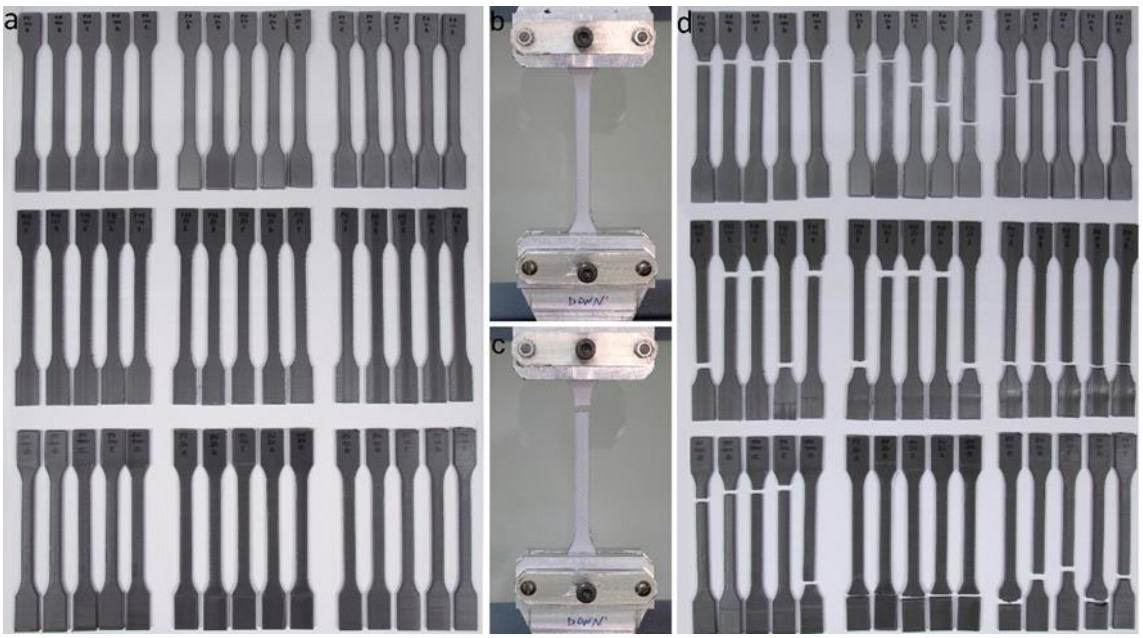


Figura 203. Probetas de tracción de diferentes posiciones y densidades en PLA. a) Antes de realizar los ensayos de tracción. b) Antes de realizar el ensayo de tracción en la máquina. c) Después de efectuar el ensayo de tracción en la máquina. d) Después de efectuar los ensayos de tracción. © Emanuel Sterp Moga.

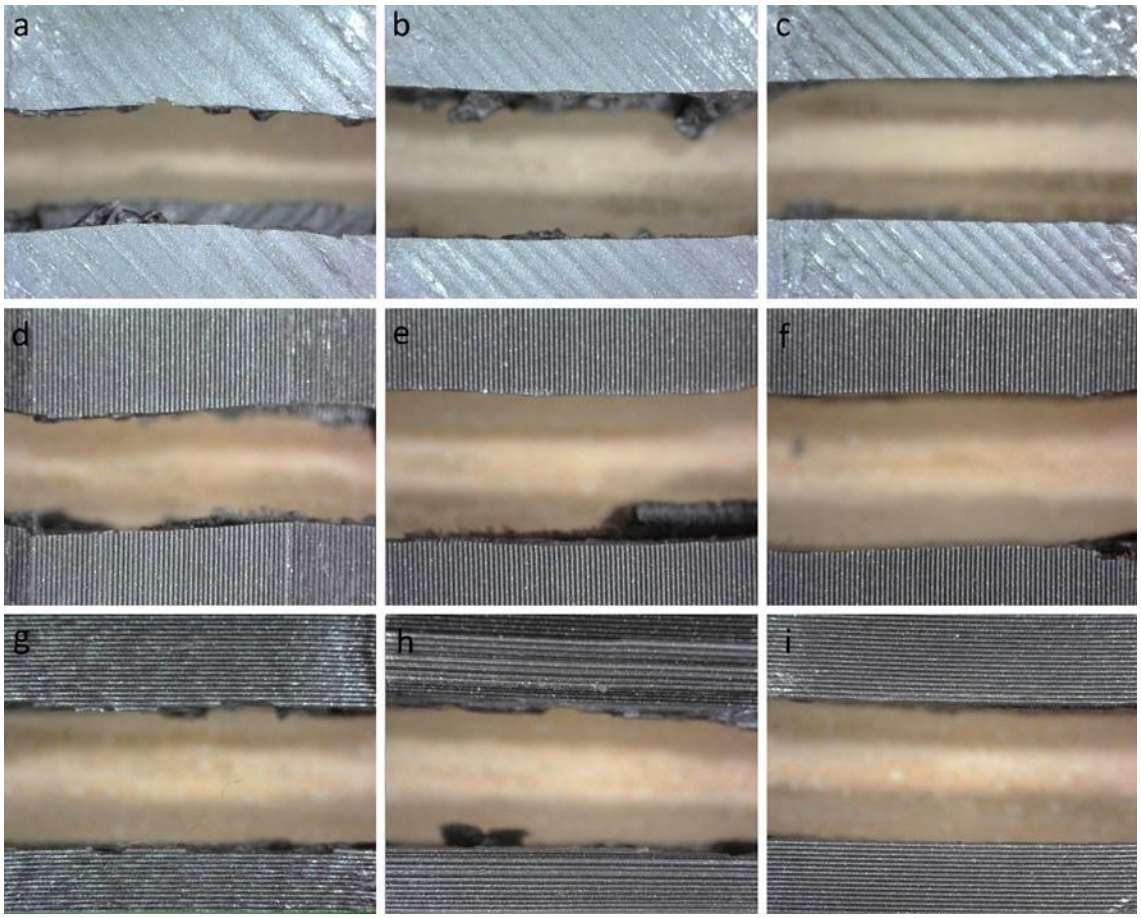


Figura 204. Análisis mediante el microscopio digital Dino-Lite. Fracturas de las probetas en PLA. a) Posición horizontal 0º densidad 10%. b) Posición horizontal 0º densidad 50%. c) Posición horizontal 0º densidad 100%. d) Posición horizontal 90º densidad 10%. e) Posición horizontal 90º densidad 50%. f) Posición horizontal 90º densidad 100%. g) Posición vertical 0º densidad 10%. h) Posición vertical 0º densidad 50%. i) Posición vertical 0º densidad 100%. © Emanuel Sterp Moga.



Figura 205. Fractura inadecuada de algunas probetas en la posición vertical. © Emanuel Sterp Moga.

Los resultados muestran que tanto la posición como la densidad de relleno desempeñan un papel crucial. Se observa que la densidad de relleno aumenta las propiedades mecánicas de la probeta según se eleva su porcentaje. Se ha detectado un incremento de aproximadamente un 50%

en el módulo y el límite de elasticidad cuando se pasa de una densidad de relleno de un 10% a otra de un 100% (tabla 11).

Probeta	Material de impresión	Orientación	Densidad de relleno	Tiempo de impresión por muestra	Módulo de elasticidad en tracción [MPa]	Límite elástico σ0.2% [MPa]	Deformación en límite elástico σ0.2%	Resistencia a la tracción [MPa]
PH10	PLA	Horizontal 0º	10%	109min	1305	32	0,028	38
PH50	PLA	Horizontal 0º	50%	117min	1450	36	0,028	44
PH100	PLA	Horizontal 0º	100%	172min	1944	49	0,028	62
PHC10	PLA	Horizontal 90º	10%	169min	1392	34	0,028	38
PHC50	PLA	Horizontal 90º	50%	180min	1412	32	0,026	36
PHC100	PLA	Horizontal 90º	100%	259min	2066	52	0,028	62
PV10	PLA	Vertical 0º	10%	161min	544	23	0,047	28
PV50	PLA	Vertical 0º	50%	168min	740	25	0,035	27
PV100	PLA	Vertical 0º	100%	258min	802	19	0,020	46

Tabla 11. Resultados de los ensayos de tracción. Propiedades y caracterización de cada una de las probetas. © Emanuel Sterp Moga.

La posición vertical a 0º es la más débil, ya que muestra un *módulo de elasticidad en tracción* y un *límite elástico* muy bajo en comparación con las posiciones horizontales a 0º y 90º (tabla 11). Ello se debe a que, durante la impresión de la probeta en la posición horizontal, la deposición del filamento está orientada en la dirección del esfuerzo, es decir, se distribuye a lo largo de toda la forma de la probeta. Sin embargo, en la posición vertical el filamento solo comprende el ancho de la probeta, dicho de otro modo, la parte transversal respecto a la dirección de impresión. Debido a la escasa superficie de impresión en la dirección vertical, teniendo en cuenta los huecos entre capa y capa del filamento depositado, estas zonas son más débiles y, por tanto, susceptibles de romperse con facilidad.

Como se puede apreciar en el gráfico de la figura 206 se agrupan las curvas tensión nominal-deformación nominal de las diversas orientaciones y densidades. En el caso de los gráficos de la figura 207 se puede observar la dependencia tanto del *módulo de elasticidad en tracción* como del *límite elástico* en relación con la densidad de relleno de las tres orientaciones ensayadas. De las dos posiciones horizontales a 0º y 90º con una densidad de relleno del 100% (PH100 y PHC100), ambas presentan la misma *resistencia a la tracción* de 62 MPa. Sin embargo, en el caso de la posición a 90º presenta un *módulo de tracción* de 2066 MPa y un *límite elástico* de 52 MPa aproximadamente a unos 520 kg/cm^2, ligeramente superiores a las propiedades mecánicas de 0º con un *módulo de tracción* de 1944 MPa y un *límite elástico* de 49 MPa equivalente a unos 490 kg/cm^2. Los resultados muestran con claridad cómo las probetas impresas mediante FDM presentan características de anisotropía y según la dirección del filamento impreso variará su resistencia. Por tanto, según estos primeros resultados, los 10 materiales restantes seleccionados (tabla 12) se han ensayado en la posición horizontal a 90º, con una densidad de relleno del 100%, ya que han ofrecido los mejores resultados.

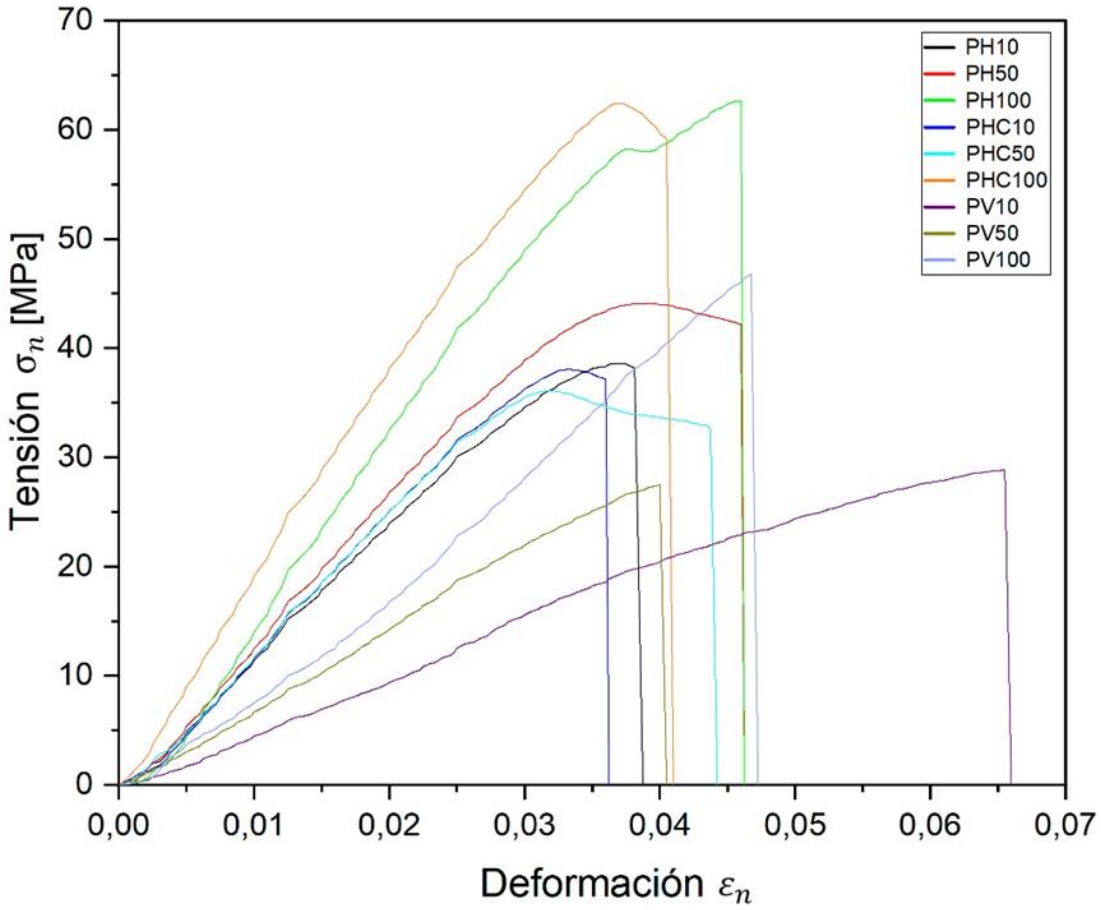


Figura 206. Pruebas de tracción PLA. Comparativa de curvas tensión nominal $\sigma_n = \frac{F}{A}$ deformación nominal $\varepsilon_n = \frac{\Delta L_0}{L_0}$ de las probetas impresas en diferentes posiciones y densidades. © Emanuel Sterp Moga.

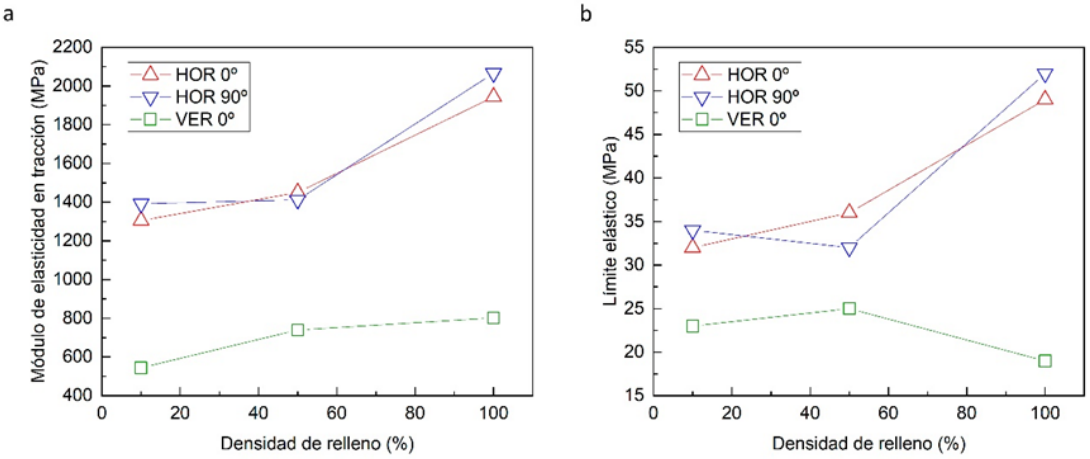


Figura 207. a) Relación entre el módulo de tracción y la densidad de relleno de las probetas con diferentes posiciones. b) Relación entre el *límite elástico* y la densidad de relleno de las probetas con diferentes posiciones. © Francisco Javier del Río Esteban.

4.10.1.2. Análisis de los diferentes materiales termoplásticos

Los resultados de los diversos materiales han revelado datos muy significativos, que deben tenerse en cuenta a la hora de imprimir las estructuras necesarias (figura 208). El punto de fractura de cada uno de los materiales ha variado debido a las diferentes características y propiedades fisicoquímicas.

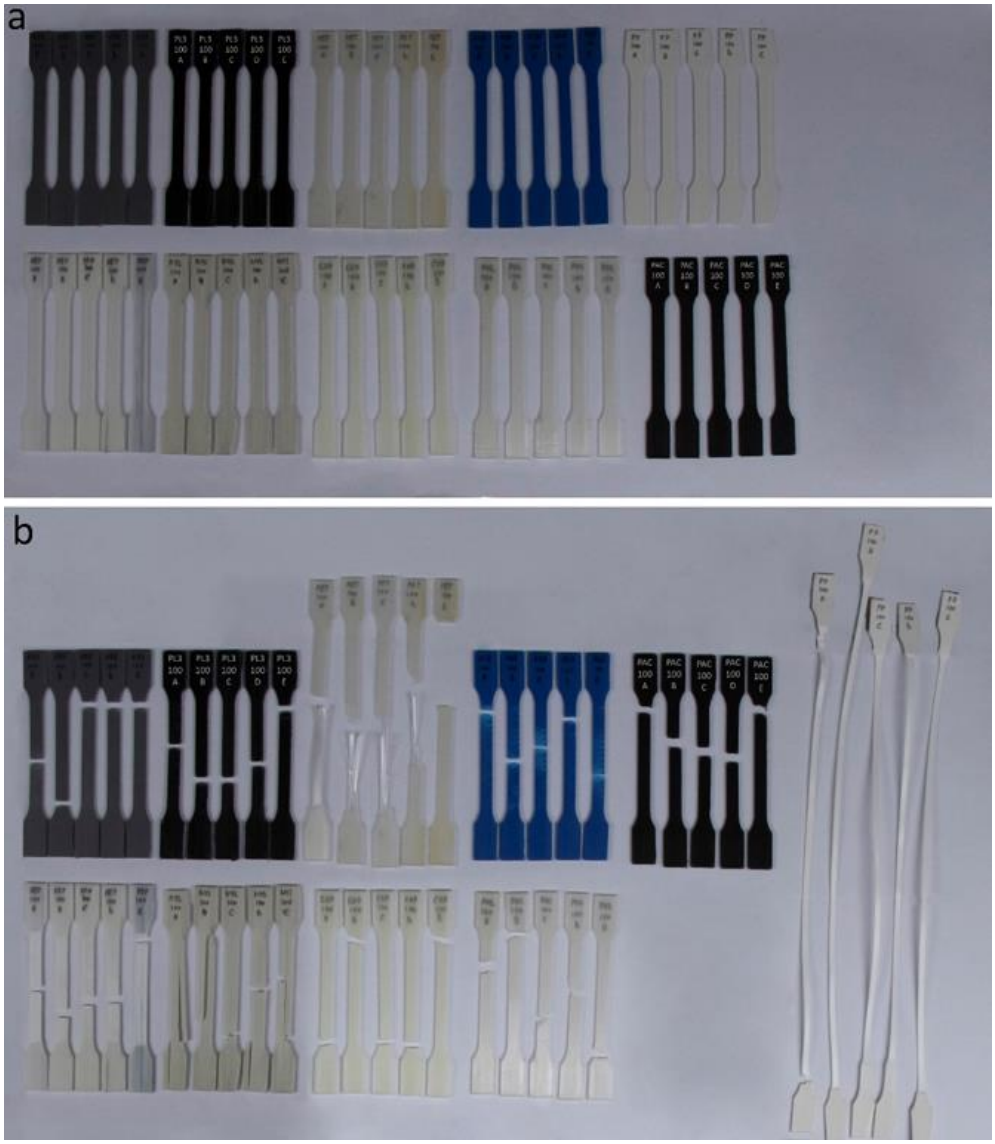


Figura 208. Probetas de tracción de diferentes materiales. a) Antes de realizar los ensayos de tracción. b) Después de efectuar los ensayos de tracción. © Emanuel Sterp Moga.

En la tabla 12 se muestran los resultados de forma detallada, agrupados en función del *módulo de elasticidad en tracción, límite elástico* y *resistencia a la tracción* de los 11 materiales ensayados.

Probeta	Material de impresión	Orientación	Densidad de relleno	Tiempo de impresión por muestra	Módulo de elasticidad en tracción (límite elástico) [MPa]	Límite elástico σ0.2% [MPa]	Deformación en límite elástico σ0.2%	Resistencia a la tracción [MPa]
ABS	ABS	Horizontal 90º	100%	280min	1437	37	0,032	45
PL3	PLA 3D870	Horizontal 90º	100%	259min	1730	40	0,030	54
PET	PETG	Horizontal 90º	100%	259min	1223	40	0,049	51
ASA	ASA	Horizontal 90º	100%	259min	1238	34	0,041	46
PP	PP	Horizontal 90º	100%	223min	379	9	0,046	16
HIP	HIPS	Horizontal 90º	100%	259min	1036	17	0,017	18
NYL	NYLSTRONG	Horizontal 90º	100%	259min	1726	28	0,026	52
COP	INNOVATEFIL CO-POLYESTER	Horizontal 90º	100%	259min	1443	16	0,014	25
POL	INNOVATEL POLYCARBONATE	Horizontal 90º	100%	259min	1180	14	0,016	27
PAC	PA CF	Horizontal 90º	100%	259min	3873	52	0,021	106
PLA	PLA	Horizontal 90º	100%	259min	2066	52	0,028	62

Tabla 12. Resultados de los ensayos de tracción. Propiedades y caracterización de cada una de las probetas conformadas en diversos materiales. © Emanuel Sterp Moga.

Los materiales CO-POLYESTER e POLYCARBONATE, han resultado ser muy frágiles, ya que su composición molecular ha ofrecido poca resistencia, pues su punto de la fractura se produjo con una tensión de 25 y 27 MPa respectivamente. Además, las deformaciones en los puntos de fractura fueron de hasta 0,018 (1,8%) en el caso del primer material y 0,021 (2,1%) en el segundo. Las fracturas se han producido de forma rápida con un corte transversal irregular en el punto de rotura sin experimentar apenas deformación (figura 209 a, b, c y d). De ello se deduce que presentan una menor adhesión entre las fibras.

Otros materiales, como ABS, PLA y PLA 3D870, han ofrecido unos cortes transversales limpios en el punto de rotura, ubicado en la sección central de la probeta (figura 209 e, f, g, h, i y j). Este tipo de fracturas indican que las fibras han tenido una buena adhesión entre las diferentes capas. Los tres materiales presentan una gran resistencia en el punto de la fractura, de 39 MPa en el ABS, 47 MPa en el PLA 3D870 y 59 MPa en el PLA, con una deformación de hasta 0,048 (4,8%) en el primero, 0,051 (5,1%) en el segundo y 0,040 (4%) en el último.

Por otro lado, en el material PA CF, al estar compuesto por partículas de fibra de carbono, los enlaces híbridos de unión y las diferentes cadenas (largas y cortas) han generado cortes desiguales y oblicuos durante la tracción (figura 209 k y l). Ello refleja la irregularidad en la adhesión de las fibras. Es uno de los materiales que mayor grado de resistencia ha ofrecido, que fue de 106 MPa en el punto de la rotura, con una deformación de hasta 0,052 (5,2%).

En cuanto al filamento de ASA, pese a que ha dado lugar a unas fracturas con cortes transversales, ha sufrido durante el proceso de tracción deformaciones de hasta 0,083 (8,3%)

(figuras 210 a y b, 209 m y n), con una tensión en la fractura de 40 MPa. Las roturas revelan que las fibras muestran una buena adhesión entre capas.

Respecto al material NYLSTRONG, al presentar en su composición fibra de vidrio ha provocado unas fracturas por laminación muy irregulares en diferentes puntos de la sección central de la probeta (figura 209 o y p). Ello nos indica que no presenta muy buenas propiedades mecánicas, ya que, sometidas varias probetas a fuerzas iguales, de 30 MPa, que producen deformaciones de hasta 0,071 (7,1%), el material responde de manera diferente. En este caso, la adhesión entre las fibras es bastante inferior a los otros materiales.

Un tanto distintos han sido los resultados del componente HIPS, pese a que su fractura limpia en el plano se ha producido a deformaciones de hasta 0,106 (10,6%), su resistencia ha registrado uno de los valores más bajos de los materiales ensayados de 13 MPa (figura 209 q y r). Las fracturas revelan la buena adhesión de las fibras en la sección de la probeta.

Respecto al componente PETG, sus probetas han sufrido importantes deformaciones durante el ensayo de tracción, generando una laminación del material en múltiples hilos (figura 209 s y t) llegando hasta 0,789 (78,9%) en el punto de rotura, con una resistencia de 21 MPa (figura 210 c y d). Es un material bastante resistente, pero las deformaciones que se han observado han sido muy grandes.

Por último, en el caso del material PP, la deformación ha sido sorprendente, llegando hasta 7,812 (781,2%) (figuras 210 e y f, 209 u y v). Solamente una de las cinco probetas ensayadas ha logrado fracturarse antes de alcanzar los valores máximos de deformación que permite la máquina. Esto nos indica que es un material súper flexible y con muy poca resistencia 12 MPa. Resulta ser un componente interesante cuyo empleo podría ser muy útil en otros sistemas.

Por tanto, las probetas PA CF, PLA, PLA 3D870, ABS y PETG, son materiales rígidos y resistentes, muy apropiados para la impresión de las estructuras auxiliares. Resultados similares en dichas características, aunque un tanto inferiores, se han obtenido en las probetas ASA y NYLSTRONG, por lo que también podrían ser aptos para su utilización en la construcción de estructuras de soporte. Sin embargo, materiales como CO-POLYESTER, POLYCARBONATE e HIPS, presentan peores resultados en los análisis realizados para determinar sus características mecánicas. Ello nos indica que poseen poca rigidez y flexibilidad en cuanto a la deformación y, por tanto, serían inapropiados para la impresión de las estructuras auxiliares. Por último, el material PP ha resultado ser el que mayor deformación ha sufrido, siendo el más blando también. Debido a esta característica y, sobre todo, a los niveles tan inferiores en cuanto al *límite elástico* y el *módulo de elasticidad en tracción*, este material se ha descartado.

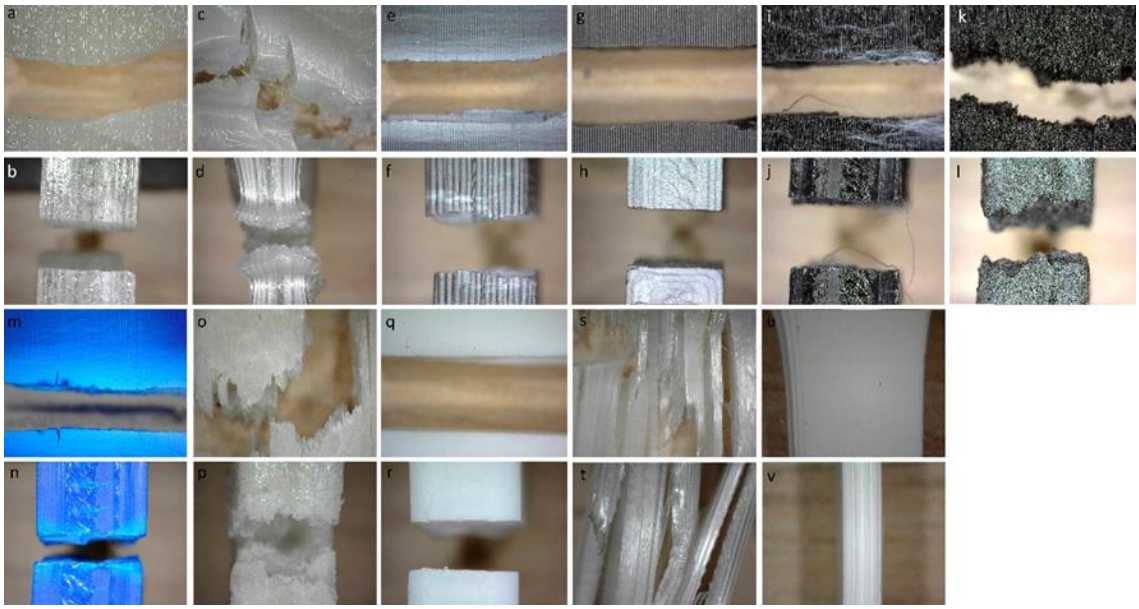


Figura 209. Análisis mediante el microscopio digital Dino-Lite. Fracturas de los diferentes materiales. a) CO-POLYESTER, vista planta. b) CO-POLYESTER, vista perfil. c) POLYCARBONATE, vista planta. d) POLYCARBONATE, vista perfil. e) ABS, vista planta. f) ABS, vista perfil. g) PLA, vista planta. h) PLA, vista perfil. i) PLA 3D870, vista planta. j) PLA 3D870, vista perfil. k) PA FC, vista planta. l) PA FC, vista perfil. m) ASA, vista planta. n) ASA, vista perfil. o) NYLSTRONG, vista planta. p) NYLSTRONG, vista perfil. q) HIPS, vista planta. r) HIPS, vista perfil. s) PETG, vista planta. t) PETG, vista perfil. u) PP, vista planta. v) PP, vista perfil. © Emanuel Sterp Moga.

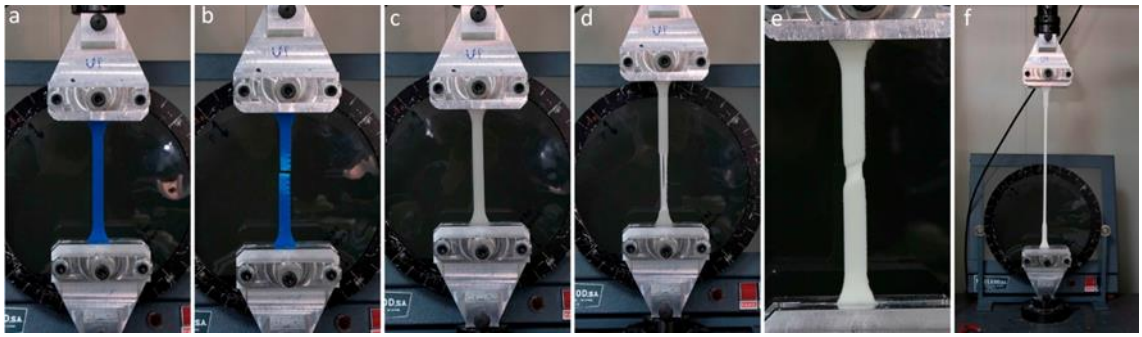


Figura 210. Proceso de tracción de diferentes probetas. a) ASA, antes del ensayo. b) ASA, después del ensayo. Se aprecia las marcas blancas que el material ha sufrido debido a diferentes tensiones hasta su rotura. c) PETG, antes del ensayo. d) PETG, durante el ensayo. Deformación y alargamiento de la probeta. e) PP, al inicio del ensayo. f) PP, durante el ensayo. Se observa la inmensa deformación y alargamiento del material sin romperse. © Emanuel Sterp Moga.

Los resultados recogidos en la tabla 12, se plasman con mayor detalle en las gráficas de las figuras 211 y 212, con sus respectivas curvas de tensión nominal-deformación nominal. Las curvas reflejan con claridad la fuerza (esfuerzo) de cada material, así como la línea recta que define el *módulo de elasticidad*, factor fundamental que se ha tenido en cuenta en todo momento.

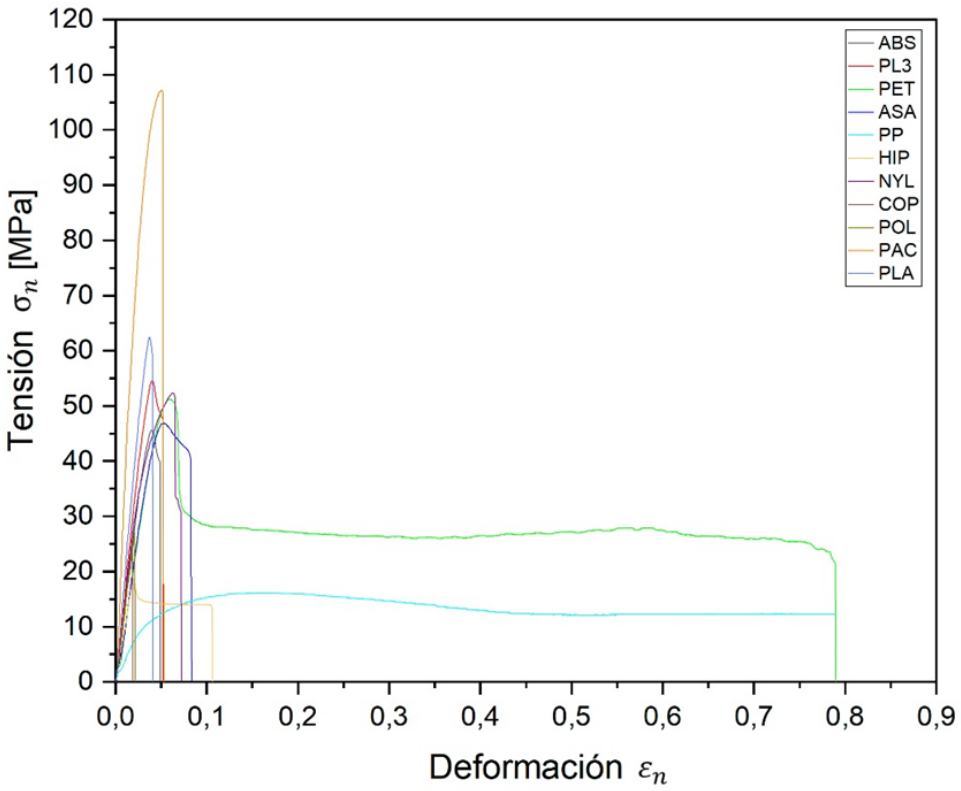


Figura 211. Pruebas de tracción. Comparativa de curvas tensión nominal $\sigma_n = \frac{F}{A}$ deformación nominal $\varepsilon_n = \frac{\Delta L_0}{L_0}$ de diferentes materiales. © Emanuel Sterp Moga.

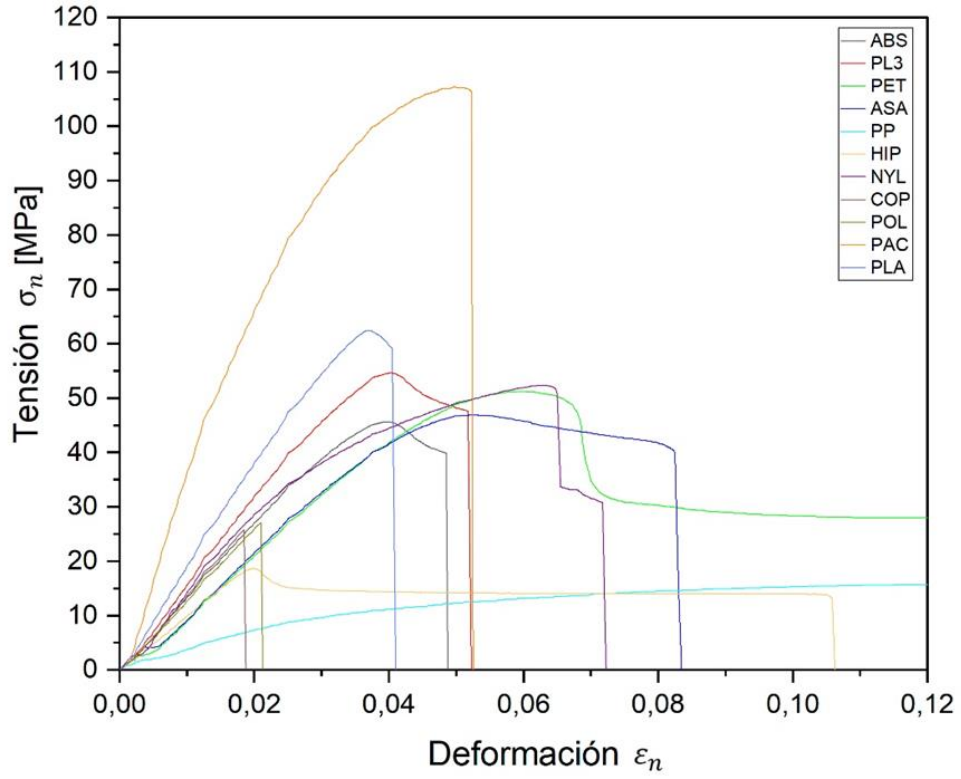


Figura 212. Pruebas de Tracción (vista ampliada). Comparativa de curvas tensión nominal $\sigma_n = \frac{F}{A}$ deformación nominal $\varepsilon_n = \frac{\Delta L_0}{L_0}$ de diferentes materiales. © Emanuel Sterp Moga.

Durante el ensayo de tracción, se ha realizado una minuciosa observación de las fuerzas de tensión generadas en el transcurso del estiramiento de la probeta, con el fin de analizar el comportamiento de cada material. La figura 213 ilustra mediante diversas curvas los niveles de ductilidad y fragilidad de los materiales ensayados.

Los componentes que presentan cierta ductilidad curvas 1 y 2 resultan ser los más apropiados para el empleo en las estructuras auxiliares. Esto es debido a que diversas líneas blancas y fisuras producidas por las tensiones han servido como indicadores y testigo de las deformaciones plásticas que experimenta antes de la rotura. Los materiales con cierta ductilidad permiten una deformación progresiva sin llegar a romper directamente como sí ocurre en el caso de la curva 3. La curva 3 representa un material frágil, caracterizado por la fractura inmediata sin sufrir una deformación en la zona plástica.

La presencia de un indicador dentro de la zona de deformación plástica sirve como medida preventiva contra posibles fracturas, un aspecto determinante para evitar causar daños en la obra durante las adhesiones por el fallo de dichas estructuras.

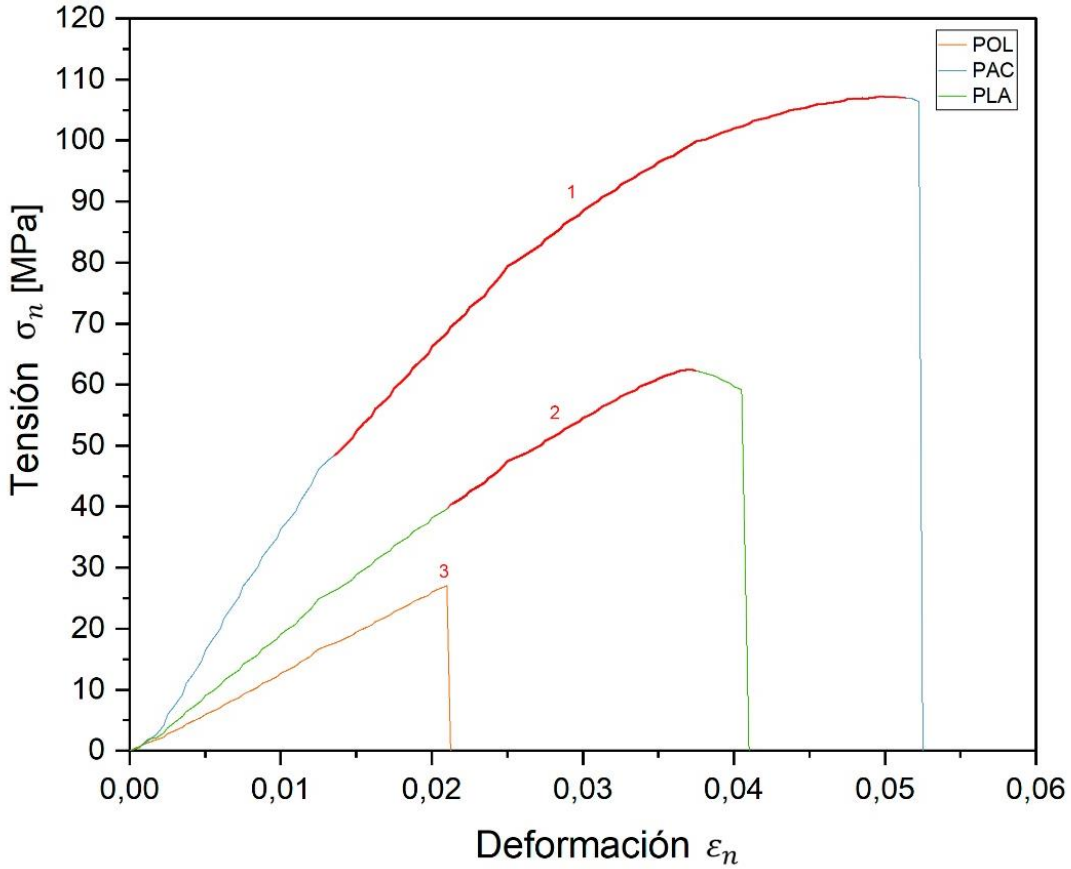


Figura 213. Curvas para analizar la ductilidad y fragilidad de los materiales. Ensayos de tracción. 1 y 2 deformación permanente en la zona plástica. 3 el material no experimenta deformación y fractura directamente. © Emanuel Sterp Moga.

4.10.2. Pruebas de flexión

4.10.2.1. Análisis de la posición y densidad de las probetas

Las diferentes probetas ensayadas (figura 214) han fracturado de manera limpia con ciertas irregularidades en la zona central de la probeta, donde se ha aplicado el punto de fuerza (figura 215). De ello se deduce que las fibras presentan una buena adhesión entre capas.

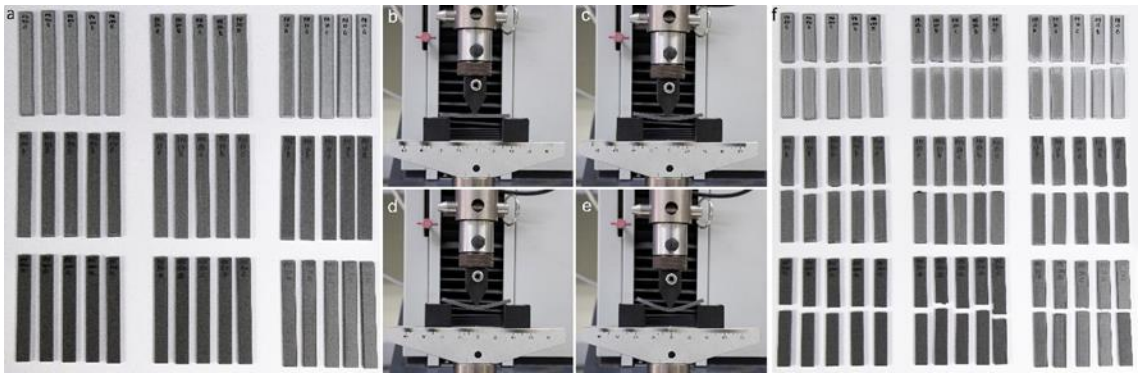


Figura 214. Probetas de flexión de diferentes posiciones y densidades en PLA. a) Antes de realizar los ensayos de flexión. b, c, d y e) Proceso del ensayo de flexión. f) Después de efectuar los ensayos de flexión. © Emanuel Sterp Moga.

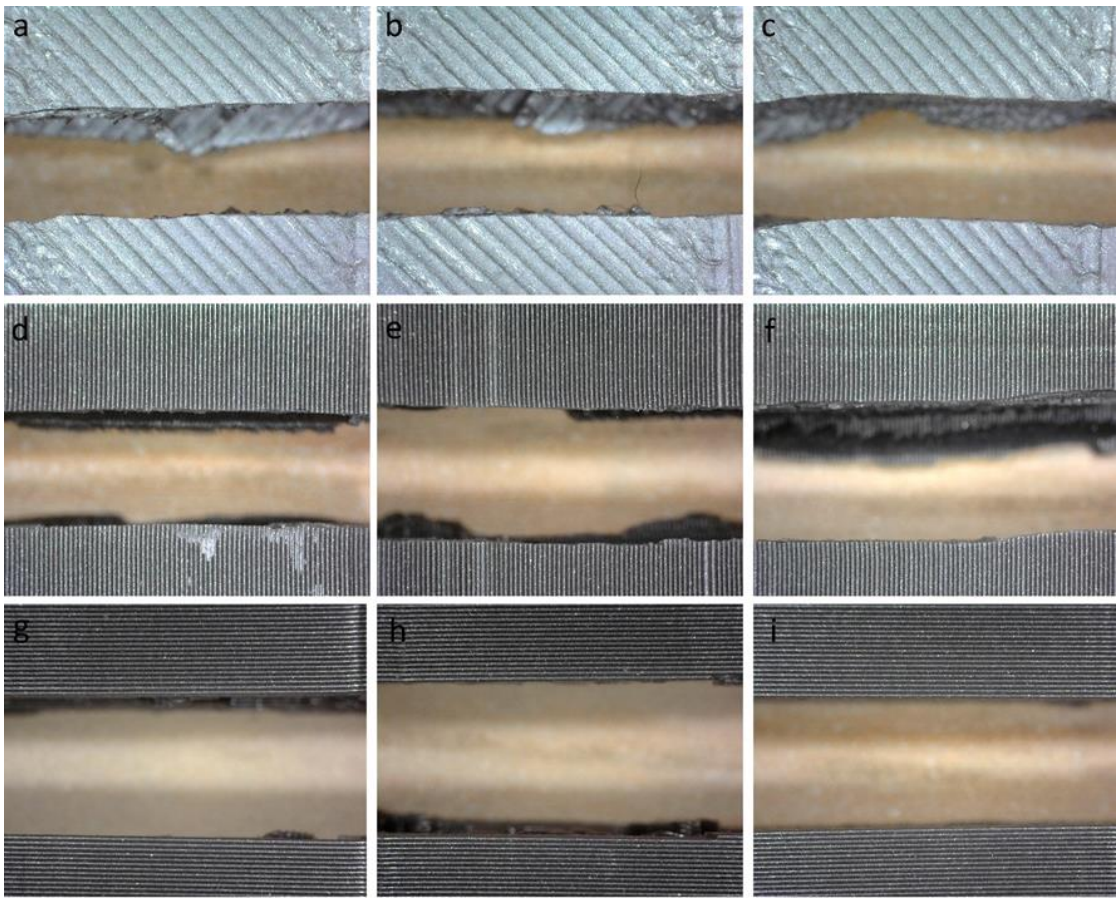


Figura 215. Análisis mediante el microscopio digital Dino-Lite. Fracturas de las probetas en PLA. a) Posición horizontal 0º densidad 10%. b) Posición horizontal 0º densidad 50%. c) Posición horizontal 0º densidad 100%. d) Posición horizontal 90º densidad 10%. e) Posición horizontal 90º densidad 50%. f) Posición horizontal 90º densidad 100%. g) Posición vertical 0º densidad 10%. h) Posición vertical 0º densidad 50%. i) Posición vertical 0º densidad 100%. © Emanuel Sterp Moga.

Los ensayos de flexión han corroborado que la densidad de relleno desempeña un papel clave en la resistencia mecánica de cada probeta. A mayor densidad de relleno, mayor resistencia mecánica se obtiene. Cuando pasa de una densidad de relleno del 10% al 100% las propiedades mecánicas aumentan en un 25% aproximadamente en el módulo y límite de elasticidad. Respecto a la orientación de las probetas, también se ha ratificado que las muestras en posición horizontal ofrecen mayor resistencia que las probetas orientadas verticalmente durante la impresión. Estos resultados coinciden con los hallados en los ensayos de tracción.

En la tabla 13 se recogen con detalle las características y resultados de cada una de las probetas examinadas en este apartado.

Probeta	Material de impresión	Orientación	Densidad de relleno	Tiempo de impresión por muestra	Deformación en flexión Límite elástico	Módulo de flexión [MPa]	Esfuerzo de Flexión [MPa]
PH10	PLA	Horizontal 0º	10%	54min	0,031	2216	80
PH50	PLA	Horizontal 0º	50%	58min	0,033	2405	86
PH100	PLA	Horizontal 0º	100%	81min	0,038	2604	107
PHC10	PLA	Horizontal 90º	10%	60min	0,032	2390	88
PHC50	PLA	Horizontal 90º	50%	62min	0,030	2664	94
PHC100	PLA	Horizontal 90º	100%	94min	0,035	2851	117
PV10	PLA	Vertical 0º	10%	71min	0,024	2347	67
PV50	PLA	Vertical 0º	50%	72min	0,024	2651	74
PV100	PLA	Vertical 0º	100%	97min	0,026	2691	81

Tabla 13. Resultados de los ensayos de flexión de las diferentes probetas ensayadas. © Emanuel Sterp Moga.

En la gráfica de la figura 216 se observan las diferentes curvas de tensión en flexión-deformación correspondientes a las probetas verticales y horizontales. Respecto a la posición vertical (PV10, PV50 y PV100), ha alcanzado un *módulo de flexión* y un *esfuerzo de flexión* un tanto inferior a la orientación horizontal. Ello ha provocado una fractura con deformaciones de hasta 0,035 (3,5%) aproximadamente en el punto de fractura con un *esfuerzo de flexión* comprendidos ente 67-81 MPa equivalente a 670-810 kg/cm^2 según los tres porcentajes de relleno examinados (tabla 13). Los resultados nos indican que las densidades con un 10% son frágiles, ya que no presentan una deformación en la zona plástica, sino que rompen directamente tras alcanzar el *esfuerzo de flexión*.

Sin embargo, las probetas horizontales a 0º y 90º, con una densidad de relleno del 100% (PH100 y PHC100), han sido las que mejores resultados han ofrecido. Los datos obtenidos en las gráficas de la figura 217 indican que la resistencia de estos materiales se ve incrementada conforme aumenta la densidad de relleno. En ambos casos, tanto el *módulo de flexión* como el *esfuerzo de flexión* han obtenido valores muy similares, entre 107-117 MPa para el *esfuerzo de flexión* equivalente a 1091-1193 kg/cm^2 y entre 2600-2850 MPa para el *módulo de flexión*. De las dos orientaciones, la que mejores resultados ha ofrecido ha sido la posición horizontal a 90º. Respecto al punto de la fractura, es mucho más grande en comparación con la posición vertical, llegando a una deformación de hasta 0,08 (8%). Ello nos indica que presenta mayor flexibilidad y deformación en la zona plástica.

De acuerdo con estos resultados se ha elegido para el ensayo de los diferentes materiales la posición horizontal a 90º con una densidad de relleno del 100%.

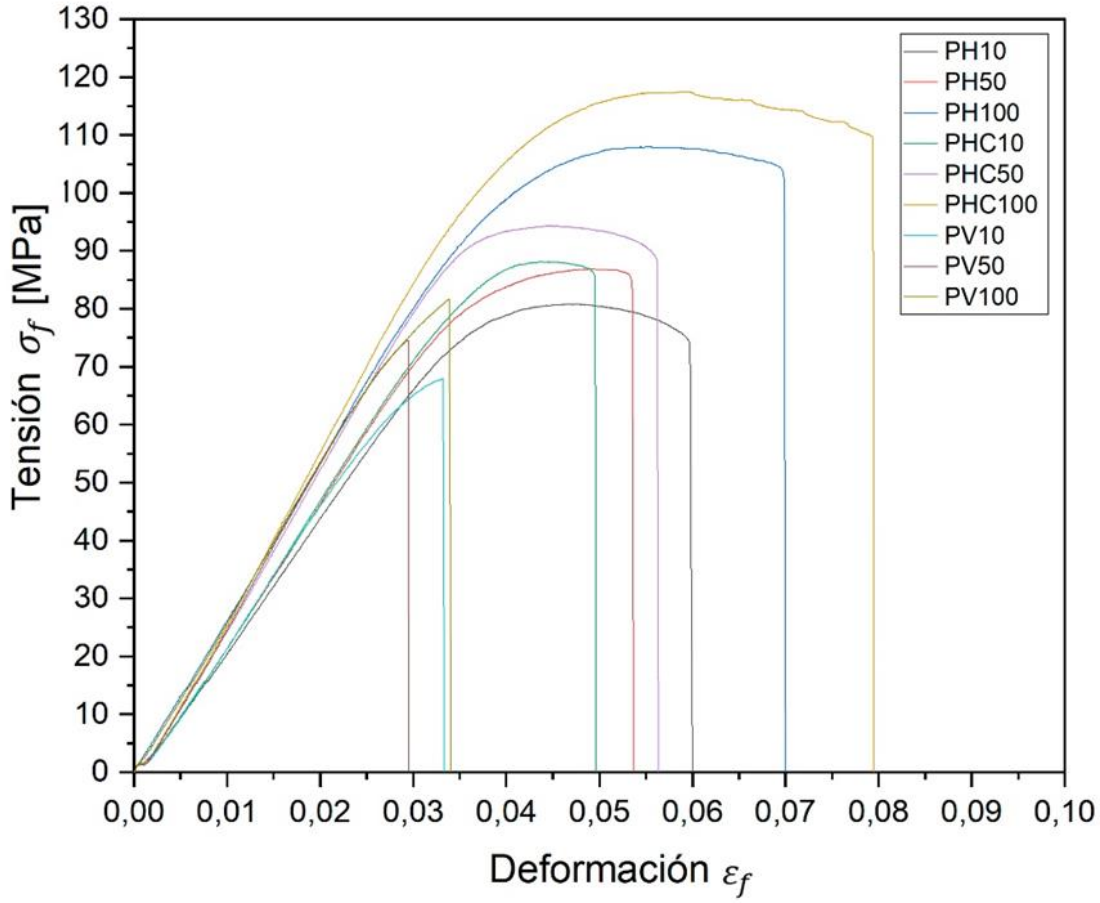


Figura 216. Pruebas de flexión PLA. Comparativa de curvas tensión en flexión $\sigma_f = \frac{3FL}{2bh^2}$ deformación en flexión $\varepsilon_f = \frac{6sh}{L^2}$ de las probetas impresas en diferentes posiciones y densidades. © Emanuel Sterp Moga.

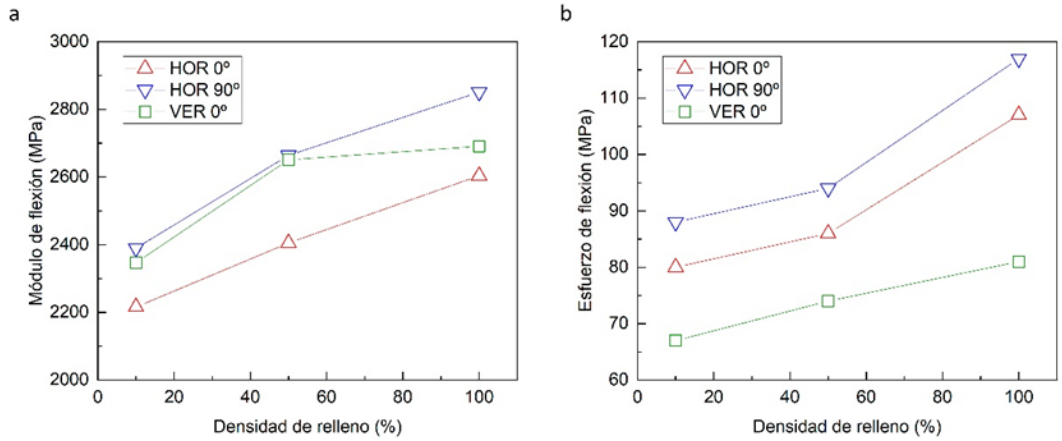


Figura 217. a) Relación entre el *módulo de flexión* y la densidad de relleno en las diferentes probetas. b) Relación entre el *esfuerzo de flexión* y la densidad de relleno en las diferentes probetas. © Francisco Javier del Río Esteban.

4.10.2.2. Análisis de los diferentes materiales termoplásticos

Los materiales ensayados han mostrado comportamientos distintos a causa de las propiedades fisicoquímicas que cada uno de ellos presenta (figura 218). Los resultados han permitido complementar y contrastar la información con los ensayos de tracción.



Figura 218. Probetas de flexión de diferentes materiales. a) Antes de realizar los ensayos de flexión. b y c) Después de efectuar los ensayos de flexión. © Emanuel Sterp Moga.

En la tabla 14 se recogen los resultados obtenidos de los 11 materiales examinados y su caracterización.

Probeta	Material de impresión	Orientación	Densidad de relleno	Tiempo de impresión por muestra	Deformación en flexión Límite elástico	Módulo de flexión [MPa]	Esfuerzo de Flexión [MPa]
ABS	ABS	Horizontal 90º	100%	91 min	0,038	1823	78
PL3	PLA 3D870	Horizontal 90º	100%	79 min	0,034	2700	105
PET	PETG	Horizontal 90º	100%	79 min	0,041	1793	84
ASA	ASA	Horizontal 90º	100%	79 min	0,041	1812	77
PP	PP	Horizontal 90º	100%	63 min	0,036	689	25
HIP	HIPS	Horizontal 90º	100%	79 min	0,022	1375	37
NYL	NYLSTRONG	Horizontal 90º	100%	79 min	0,034	2822	109
COP	CO- POLYESTER	Horizontal 90º	100%	79 min	0,016	2340	41
POL	POLYCARBONATE	Horizontal 90º	100%	79 min	0,031	2120	87
PAC	PA CF	Horizontal 90º	100%	79 min	0,032	7076	198
PLA	PLA	Horizontal 90º	100%	79 min	0,035	2851	117

Tabla 14. Resultados de los ensayos de flexión. Propiedades y caracterización de cada una de las probetas conformadas en diversos materiales. © Emanuel Sterp Moga.

Durante el ensayo de flexión, se ha observado que la fuerza aplicada en el centro de la probeta genera diferentes signos debidos a los esfuerzos de compresión y tracción. Los esfuerzos de compresión se han reflejado en la parte superior, en el punto en el que se aplica la fuerza. Según se ha ido combando la probeta, los esfuerzos de tracción han generado en la zona inferior de la misma, marcas blancas en algunos casos (figura 219).

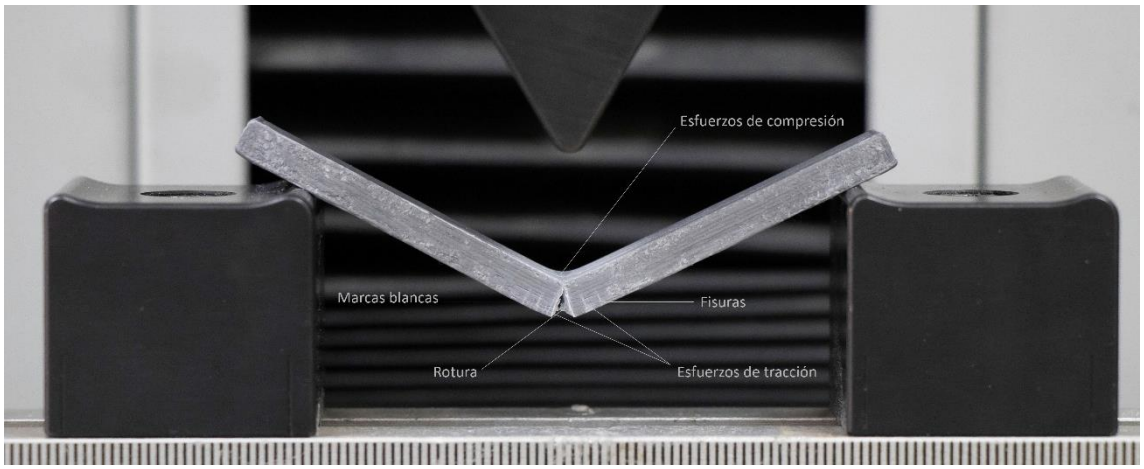


Figura 219. Diferentes modificaciones y alteraciones que el material experimenta durante el ensayo de flexión. © Emanuel Sterp Moga.

El material CO-POLYESTER, ha resultado ser extremadamente frágil, ya que las probetas de este material se han fracturado con una deformación de hasta 0,018 (1,8%) y con un esfuerzo de 41 MPa. La rotura ha sido prácticamente limpia en la sección central de la probeta, y siguiendo un plano perpendicular a su eje principal (figura 220 a y b). Con ello, se deduce que las fibras están correctamente adheridas entre capas.

Los materiales POLYCARBONATE y PA CF, han mostrado un comportamiento más flexible. La probeta POLYCARBONATE, ha experimentado una deformación de hasta 0,043 (4,3%) con un *esfuerzo de flexión* de 87 MPa; y una deformación de 0,040 (4%) en el caso de PA CF, con un esfuerzo bastante mayor de 176 MPa en el punto de rotura (figura 220 c, d, e y f). Las fracturas han sido irregulares y escalonadas, lo que refleja una menor adhesión en las fibras de cada capa.

Respecto al componente PLA, ha mostrado una mayor flexibilidad que los materiales anteriores, ya que ha fracturado a niveles de deformación de hasta 0,079 (7,9%), con un esfuerzo de 109 MPa. La rotura se ha generado de forma un tanto escalonada en la sección central de la probeta (figura 220 g y h). La adhesión de las fibras entre capa y capa es adecuada y dispone de cierta memoria plástica.

En cuanto a los materiales ABS, PLA 3D870 y NYLSTRONG, han tenido comportamientos muy similares. Durante los ensayos se han producido deformaciones irreversibles en el punto concreto donde se ha aplicado la fuerza, generando marcas blancas, fisuras y grietas, pero sin llegar a fracturar al llegar a una deformación de hasta 0,118 (11,8%) en el caso de ABS, con 24 MPa de esfuerzo; de 0,120 (12%) en el material PLA 3D870, con un esfuerzo de 30 MPa; y de 0,103 (10,3%) en el caso de NYLSTRONG, con 77 MPa de esfuerzo (figura 220 i, j, k, l, o y p). Estos datos indican que son materiales con cierta ductilidad y con una mínima memoria plástica tras retirar la fuerza de presión.

Durante el ensayo de flexión se ha observado que la presión aplicada sobre el material ASA ha generado deformaciones de hasta 0,158 (15,8%) con un esfuerzo de 22 MPa en el punto de presión, creando también marcas blancas, fisuras y grietas (figura 220 m y n). Ello nos indica que es un material bastante dúctil, pero su memoria plástica es limitada.

Por otro lado, los componentes PETG e HIPS han mostrado una flexibilidad muy alta, ya que han sufrido importantes deformaciones de hasta 0,181 (18,1%) con un esfuerzo de 39 MPa en el

caso de PETG; y 25 MPa en el HIPS. Durante los esfuerzos dichos materiales no han experimentado grietas ni fisuras (figura 220 q, r, s y t). En cuanto a la memoria plástica, ambos disponen de ella ligeramente, pero también conservan permanentemente parte de las deformaciones sufridas. Respecto al componente PP, de igual modo ha demostrado tener una flexibilidad muy alta, pues es un material extremadamente dúctil. Presenta una enorme memoria plástica, ya que después de aplicar la presión, la deformación sufrida, de hasta 0,181 (18,1%) con un esfuerzo de 17 MPa en el punto máximo, se ha recuperado en un 70%. Debido a estas características, el material no ha experimentado ninguna grieta ni fisura, pero sí que conserva una mínima deformación (figura 220 u y v). En el caso de los tres materiales PETG, HIPS y PP, todos ellos han llegado a los valores de flexibilidad máximos permitidos por la máquina, con deformaciones de hasta 0,181 (18,1%), equivalentes a los 28 mm de altura que presentaban los soportes.

Por tanto, los materiales PA CF, PLA, PLA 3D870 y NYLSTRONG han alcanzado unos valores muy elevados en el análisis de la *deformación en flexión*, el *esfuerzo de flexión*, y el *módulo de flexión*, lo que indica que estos materiales son apropiados para la impresión de estructuras auxiliares. Otros materiales, como POLICARBONATO, PETG, ABS y ASA, presentan unos valores un tanto inferiores respecto a los materiales mencionados anteriormente. No obstante, también podrían ser apropiados para el fin propuesto. Por último, materiales como CO-POLYESTER, HIP y PP han obtenido medidas muy inferiores en relación con las características indicadas con anterioridad, por lo que se han descartado para esa aplicación dado que los niveles alcanzados no son suficientes para asegurar una buena estabilidad en las estructuras.

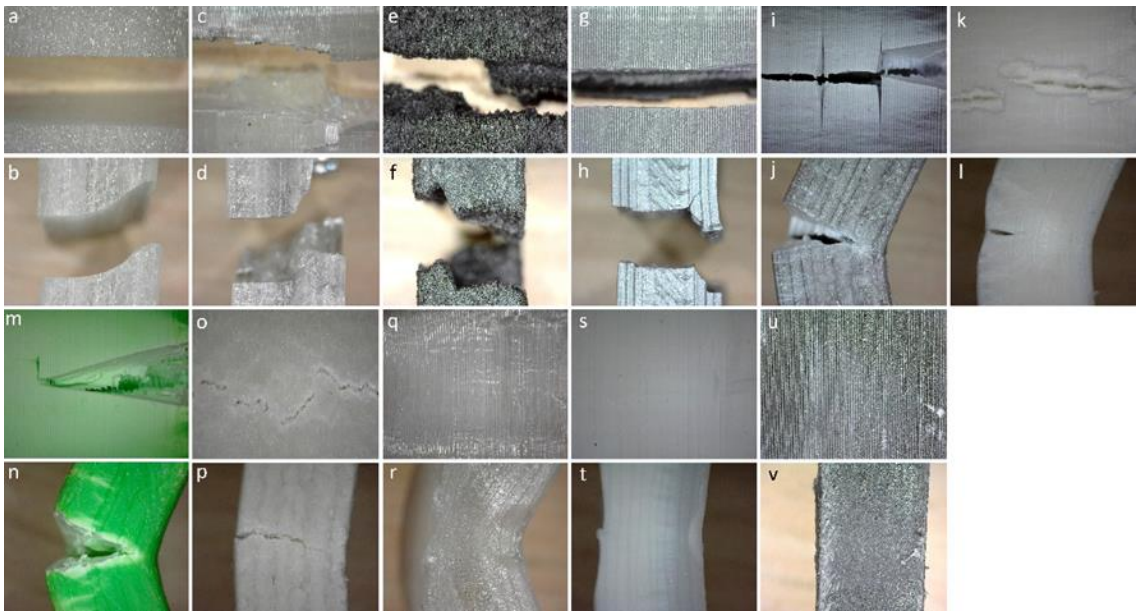


Figura 220. Análisis mediante el microscopio digital Dino-Lite. Deformación en el punto de presión. a) CO-POLYESTER, vista planta. b) CO-POLYESTER, vista perfil. c) POLYCARBONATE, vista planta. d) POLYCARBONATE, vista perfil. e) PA FC, vista planta. f) PA FC, vista perfil. g) PLA, vista planta. h) PLA, vista perfil. i) ABS, vista planta. j) ABS, vista perfil. k) PLA 3D870, vista planta. l) PLA 3D870, vista perfil. m) ASA, vista planta. n) ASA, vista perfil. o) NYLSTRONG, vista planta. p) NYLSTRONG, vista perfil. q) PETG, vista planta. r) PETG, vista perfil. s) HIPS, vista planta. t) HIPS, vista perfil. u) PP, vista planta. v) PP vista perfil. © Emanuel Sterp Moga.

En el gráfico de la figura 221 se recogen las curvas de tensión en flexión-deformación.

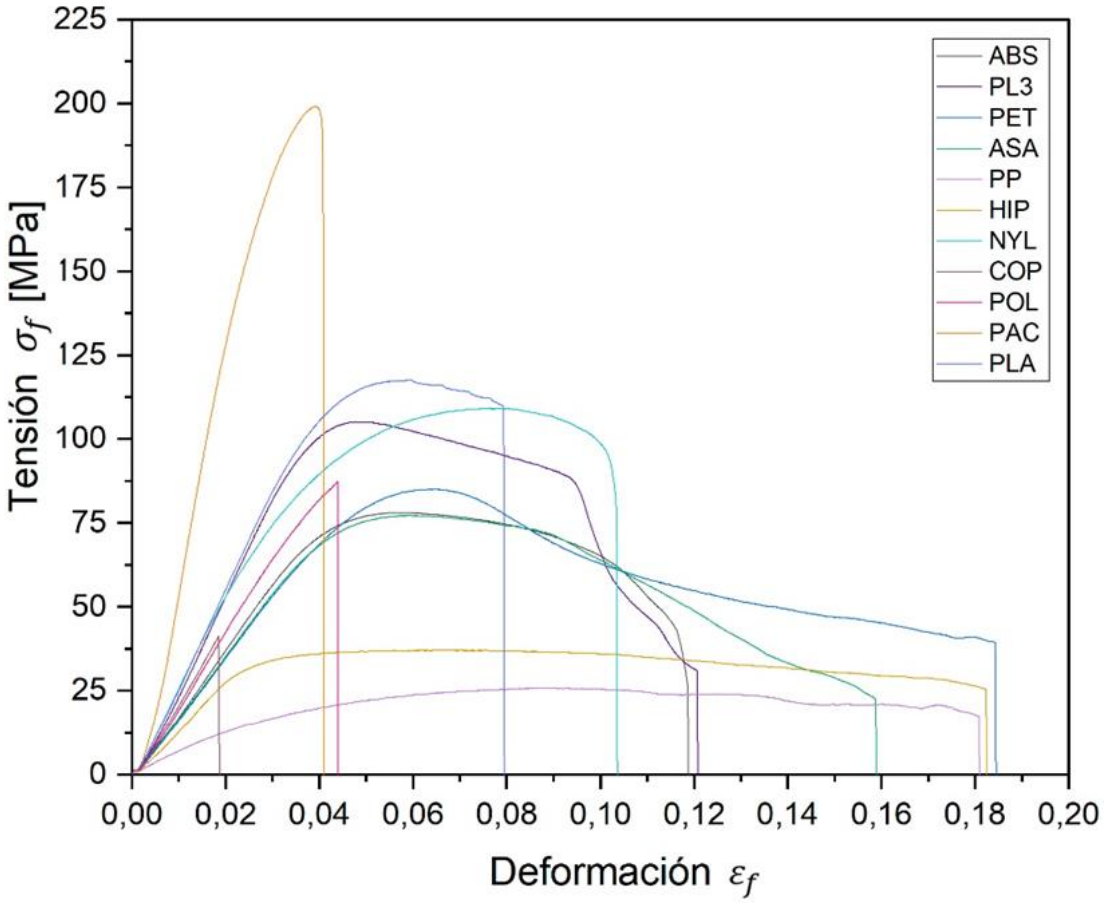


Figura 221. Pruebas de flexión. Comparativa de curvas tensión en flexión $\sigma_f = \frac{3FL}{2bh^2}$ deformación en flexión $\varepsilon_f = \frac{6sh}{L^2}$ de diferentes materiales. © Emanuel Sterp Moga.

Durante la aplicación de la fuerza en el centro de la probeta, se han podido observar los niveles de resistencia y flexibilidad de cada uno de los materiales examinados (figura 222).

Algunos materiales rígidos prácticamente no han experimentado deformaciones, ya que se han fracturado sin mostrar una mínima flexibilidad en la zona plástica. En aquellos cuya flexibilidad ha sido más elevada, el material ha experimentado deformaciones de pequeña magnitud en la zona plástica, pero su fractura se ha producido con rapidez.

Las probetas correspondientes a materiales con una flexibilidad media habían sufrido cierto grado de deformación en el punto concreto en el que se ha aplicado la presión, donde existían además pequeñas fisuras y marcas blancas debido a los esfuerzos de compresión y tracción que ha sufrido la muestra.

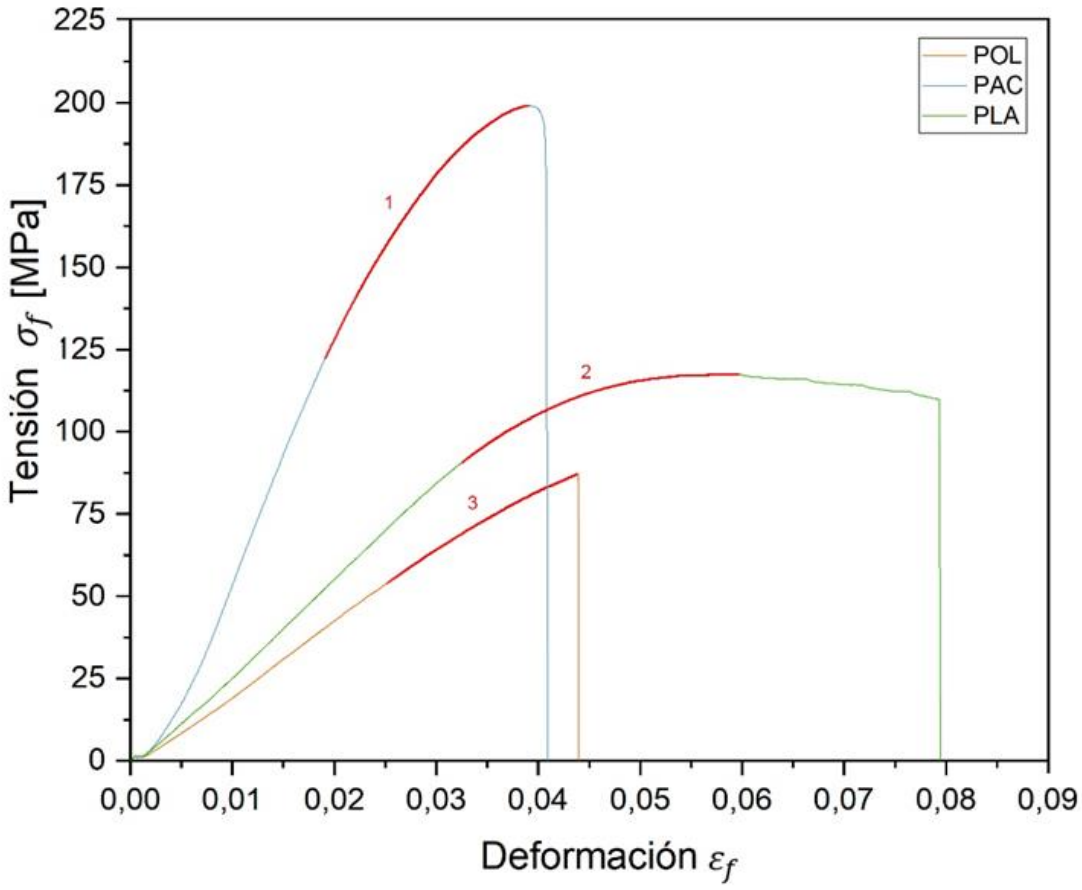


Figura 222. Curvas para analizar la ductilidad y fragilidad de los materiales. Ensayos de flexión. Curva 1 material rígido. Curva 2 material semirrígido. Curva 3 material frágil. © Emanuel Sterp Moga.

Los materiales de impresión termoplásticos FDM han demostrado en los diferentes ensayos de tracción y flexión cómo las características mecánicas se ven afectadas por el propio sistema de fabricación, reflejando su anisotropía en las muestras. Teniendo sobre todo esta premisa en cuenta a la luz de los diversos resultados de ambos ensayos, los dos materiales que mejores propiedades mecánicas han alcanzado han sido el PA CF y el PLA.

El componente PA CF ha ofrecido unas cualidades en cuanto al *módulo de tracción* de 3873 MPa, un valor más elevado que el PLA 2066 MPa. Respecto al *límite elástico*, ambos han conseguido el mismo parámetro de 52 MPa. Sin embargo, en la *resistencia a la tracción* el PA CF ha alcanzado 106 MPa equivalente a 1080 kg/cm^2 un valor bastante más elevado que el material PLA 62 MPa semejante a 625 kg/cm^2.

Respecto a los ensayos de flexión, el material PA CF ha logrado 7076 MPa en el *módulo de flexión*, un valor muy por encima del componente PLA 2851 MPa. En cuanto al *esfuerzo de flexión*, su parámetro ha sido de 198 MPa equivalente a 2019 kg/cm^2, algo más elevado que el PLA con 1178 MPa semejante a 1193 Kg/cm^2. Por último, la *deformación en flexión* ha alcanzado el valor de 0,032 (3,2%) un tanto más reducido que el material PLA 0,035 (3,5%).

Tras el análisis de las características de cada uno de los materiales, se ha podido determinar que ambos cumplen perfectamente con los requisitos mecánicos para el fin propuesto. El componente PA CF, al contener en su composición partículas de fibra de carbono, aporta unas cualidades mecánicas más altas en comparación con el PLA. No obstante, los valores hallados en

relación con las necesidades estructurales y el peso de cada fragmento para la adhesión son excesivamente altos. Su aplicación sería muy útil en intervenciones cuyas figuras a adherir tuvieran un peso mucho más elevado. Aparte de las propiedades físicas del material, cabe destacar otro factor importante, el proceso de impresión. La impresión de las probetas de PA CF ha sido en ocasiones un tanto compleja y engorrosa, con fallos frecuentes al obstruirse la boquilla durante la extrusión del filamento. Con este tipo de materiales no es recomendable trabajar con una boquilla de latón, sino con otras compuestas de aleaciones metálicas más fuertes o con puntas de diamante. Las características del material dificultan una buena impresión con las boquillas originales de la impresora, no consiguiendo siempre las mismas calidades en una pieza si se repitiera varias veces.

En definitiva, pese a las altas prestaciones mecánicas excesivamente altas para el fin propuesto, finalmente, el material PA CF se ha descartado debido a la dificultad de impresión. El material PLA seleccionado se ha considerado adecuado, ya que los valores obtenidos están muy por encima de los necesarios para la fabricación de estructuras de soporte auxiliares. Asimismo, el material ofrece unas óptimas cualidades en el proceso de impresión. Por otro lado, también se ha tenido en cuenta que es biodegradable, y, por tanto, un material muy amigable con el medio ambiente. Finalmente, en función de las pruebas realizadas, las diferentes piezas que conforman las estructuras auxiliares han de estar orientadas, en la medida de lo posible durante la impresión en una posición horizontal a 90º, y se recomienda una densidad de relleno del 100%.

A continuación, en la figura 223 se muestra el modelo de protocolo para llevar a cabo los ensayos mecánicos de tracción y flexión en materiales termoplásticos para la impresión 3D de estructuras auxiliares.

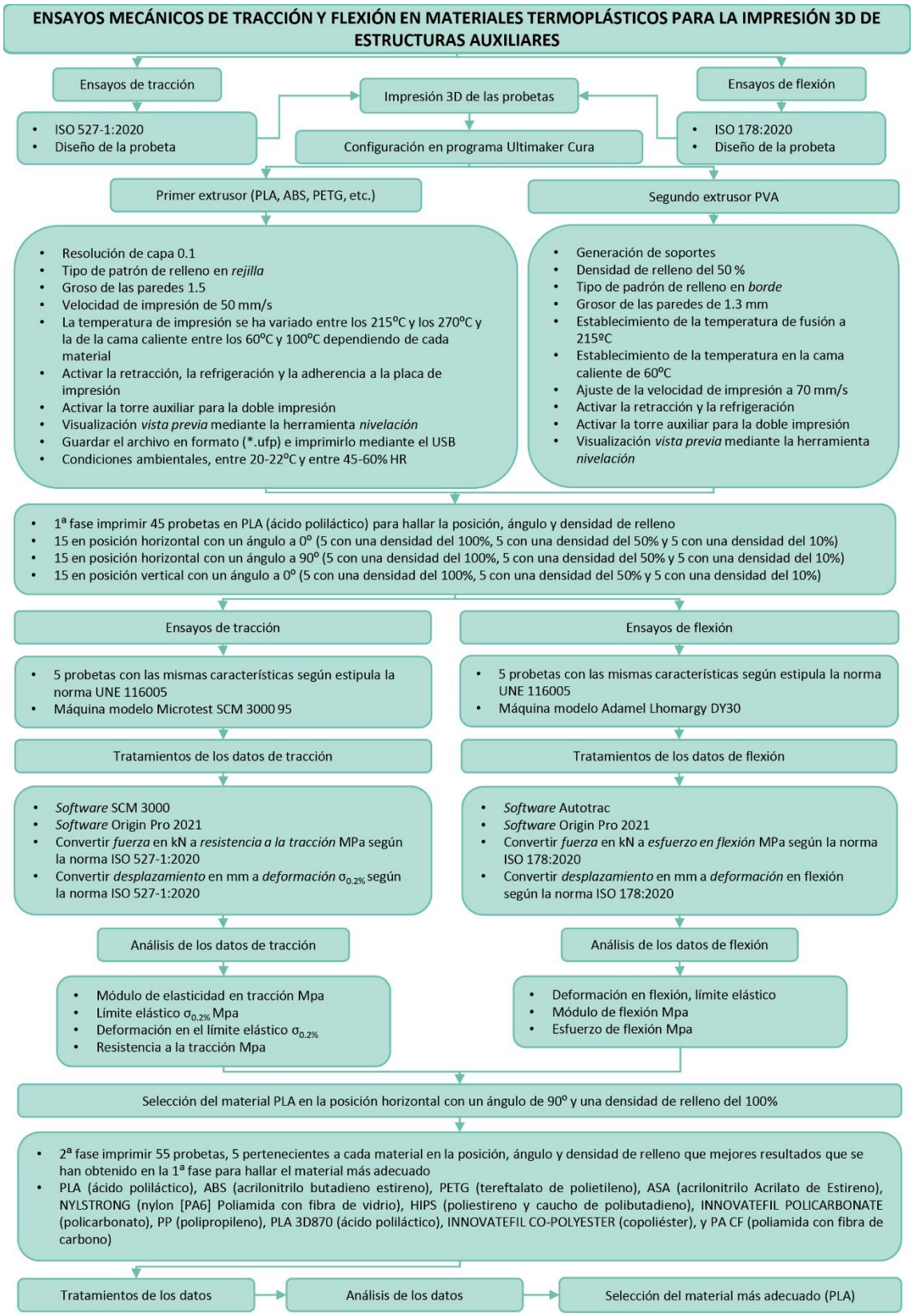
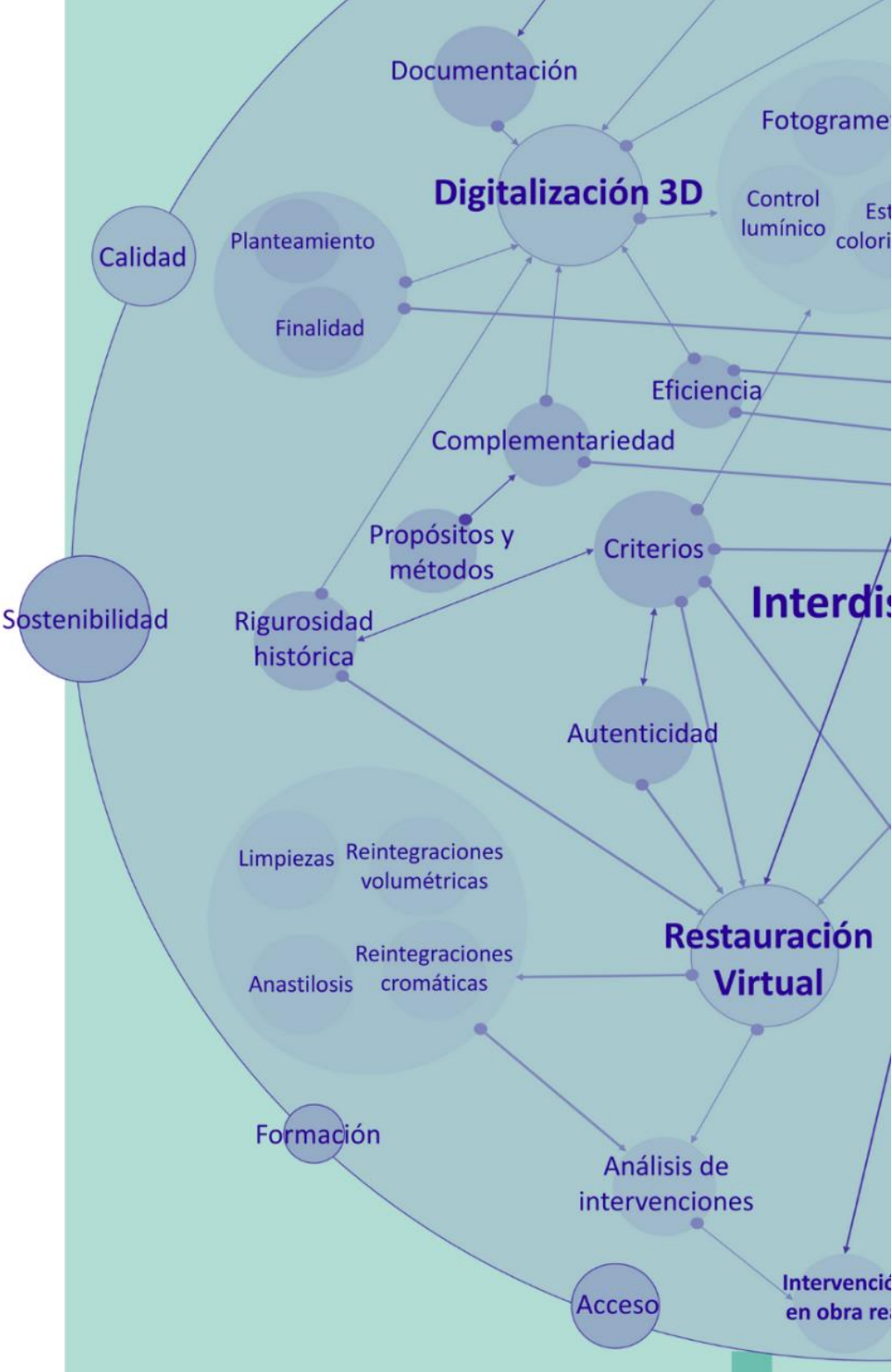


Figura 223. Protocolo de actuación para los ensayos mecánicos de tracción y flexión en materiales termoplásticos para la impresión 3D de estructuras auxiliares. © Emanuel Sterp Moga.

5. LEGISLACIÓN, NORMATIVAS Y RECOMENDACIONES



Para la documentación, virtualización e intervención del patrimonio cultural

5. LEGISLACIÓN, NORMATIVAS Y RECOMENDACIONES PARA LA DOCUMENTACIÓN, VIRTUALIZACIÓN E INTERVENCIÓN DEL PATRIMONIO CULTURAL

5.1. Criterios generales en procesos de conservación-restauración

Las legislaciones, normativas y recomendaciones en al ámbito del patrimonio cultural son muy extensas, por lo que en este capítulo se ha hecho únicamente hincapié en los documentos más relevantes y relacionados con el tema de estudio de la presente tesis doctoral.

La praxis y puesta en marcha de las metodologías basadas en las tecnologías 3D, requieren de una revisión acerca de los criterios y límites de intervención en obras de carácter general, extrapolable al ámbito escultórico, y específicamente al de los modelos tridimensionales didácticos para la enseñanza de la anatomía humana, animal y vegetal. Todo ello para poder relacionarlos con los criterios sobre el uso de las tecnologías 3D y aplicarlos con la mayor rigurosidad y precisión durante la documentación y estudio de las intervenciones necesarias.

El interés y la preocupación de conservar el patrimonio cultural han dejado numerosos testimonios a lo largo de la historia. Aunque las primeras noticias de afecto hacia la conservación se datan en la antigüedad en Egipto y Grecia, las evidencias de regulación y tratamiento jurídico se remontan a la época del emperador Constantino (272 d.C. – 337 d.C.) (Macarrón Miguel, 2013, pp.19-43). A partir de ese momento se van perfilando diferentes corrientes, teorías y criterios, muchos de ellos antagónicos, durante la Edad Media, Renacimiento, Barroco, Romanticismo y la Revolución Industrial. Sin embargo, no será hasta el siglo XX cuando se produzca una sensibilización hacia la conservación de los bienes culturales.

Ello se refleja en unas de las primeras medidas internacionales recogidas en la Carta de Atenas (Carta de Atenas, 1931) y un año más tarde en la Carta italiana (Carta del Restauro, 1932). En ellas se muestran las preocupaciones por los monumentos antiguos, anteponiendo la conservación a la restauración. Se destacan aspectos a considerar como los tratamientos de anastilosis o las adicciones con elementos neutros considerados necesarios para reintegrar fragmentos y asegurar la estabilidad estructural del conjunto, frente a otros tratamientos hipotéticos. Recalca que todo añadido ha de ser claramente discernible con el fin de no conducir a engaños y falsificaciones. Se estiman apropiados los materiales modernos para la consolidación y la conservación *in situ*, salvo en situaciones de peligro.

Tres décadas más tarde, Cesare Brandi (1906-1988) elaboró la *Teoría del Restauro* (Brandi, 1963), y a raíz de ella, un año después se creó la Carta de Venecia (Carta de Venecia, 1964). Dicho documento refleja una ampliación de la Carta de Atenas, destacando algunos aspectos relativos a los tratamientos de restauración que tiene como fin propio conservar y velar los valores históricos. En ella se establece el límite donde comienza la hipótesis. Recomienda las reintegraciones discernibles, pero armoniosas con el original, así como el mantenimiento de cualquier adicción histórica en la obra original, ya que “la unidad de estilo no es el fin de la restauración”.

Una década más tarde, Brandi amplió y concretó diferentes normas con la intención de llegar a unos criterios uniformes sobre la salvaguarda en monumentos arquitectónicos, bienes

arqueológicos, así como obras de carácter pictóricas y escultóricas, con la Carta de Restauro (Carta de Restauro, 1972). En ella refleja aspectos sobre las reintegraciones y reconstrucciones, las cuales tienen que estar efectuadas con materiales reversibles y compatibles con el original, así como reconstruir solamente intersticios de poca identidad, siempre con niveles diferentes al original y con técnicas diferenciables. Por otro lado, recalca que los nuevos materiales no se deben emplear sin plenas garantías para poder en el futuro realizar otras intervenciones de salvaguarda o restauración. Respecto a las limpiezas, establece dejar testigos, sin llegar nunca al esmalte del color, respetando la pátina y los barnices originales. Asimismo, se precisa documentar todos los procesos de restauración irreversibles, entre otras recomendaciones.

Si bien todos estos principios que se recogen en los documentos citados están destinados al patrimonio inmueble, pueden extrapolarse a los bienes de carácter mueble, en concreto, al ámbito escultórico relacionado con las colecciones seleccionadas para la tesis doctoral.

Los criterios de intervención en el campo de la conservación y restauración de escultura han ido evolucionando a lo largo de su historia, como consecuencia de la búsqueda de nuevas metodologías científicas que permitieran una mejor praxis enfocada al respeto del original. En paralelo, los avances han generado entre los profesionales un interés creciente hacia el empleo de nuevos materiales y la puesta a punto de tecnologías innovadoras que permitan reducir los posibles riesgos asociados a la manipulación y aplicación de productos durante los procesos de intervención sobre la obra real.

Aparte de los documentos precedentes consultados, otras normativas nacionales e internacionales referentes al patrimonio escultórico se pueden tomar como referencia. La Ley 16/1985 de Patrimonio Histórico Español (Ley 16/1985), en concreto, TÍTULO III De los bienes muebles, y TÍTULO IV Sobre la protección de los bienes muebles e inmuebles. Asimismo, la Carta de 1987 de la Conservación y Restauración de los objetos de Arte y Cultura, que pretenden renovar la Carta de Restauro de 1972, en particular el Anexo D Instrucciones para la ejecución de intervenciones de conservación-restauración de obras de carácter plástico, pictórico, gráfico y de artes aplicadas (Carta, 1987).

A medida que avanza la investigación, la especialización en casos concretos es cada vez más amplia, por lo que existe una necesidad de definir y plantear los criterios de intervención. En documentos específicos relativos a los criterios de intervención en escultura policromada, se han debatido y establecido diferentes consideraciones y recomendaciones (González López, 1995a, 1995b; Instituto del Patrimonio Cultural de España, 2017). Estas se recogen con carácter general en tres fases.

En una primera fase enfocada al estudio, análisis y diagnóstico de la obra escultórica y de cualquier bien patrimonial, se procederá mediante diferentes instrumentos llevar a cabo una rigurosa investigación histórica, documentación gráfica y métrica, análisis mediante diferentes fuentes de iluminación, caracterización de los materiales, examen radiográfico, tomografía computarizada, etc.

La segunda fase será relativa al estudio exhaustivo del entorno medioambiental, se relacionan los factores de deterioro con las alteraciones existentes en la obra mediante la observación

científica y se contrasta dicha información con los datos del laboratorio y la documentación técnica realizada.

En una tercera fase, centrada en los diferentes procesos de conservación-restauración, se destaca el criterio de "mínima intervención", ciñéndose solamente a lo estrictamente necesario, respetando al máximo la morfología de la obra. Este concepto está estrechamente relacionado con la reversibilidad. Dado que cualquier tratamiento de restauración dejará su impronta sobre una obra, por ello, es fundamental que la actuación sea la mínima necesaria, ya que de este modo se garantizará la integridad del modelo y será posible efectuar futuras actuaciones si fuese necesario (Appelbaum, 1987, pp.65-73). La metodología, los materiales y herramientas a emplear en los procesos de eliminación de materias ajenas, limpiezas, adhesiones, reintegraciones volumétricas, consolidaciones, fijación de estratos pictóricos, estucados, reintegraciones cromáticas, entre otros tratamientos, requieren de ensayos previos, y han de cumplir con los criterios de compatibilidad material, reversibilidad, discernibilidad y re-tratabilidad, con el fin de asegurar el máximo respeto por la obra. Asimismo, subraya la importancia de la intervención mediante un equipo interdisciplinar y la actuación sobre el bien desde la conservación preventiva, eliminando o reduciendo los posibles factores de riesgo (González López, 1995a, 1995b; Instituto del Patrimonio Cultural de España, 2017).

La mayoría de los criterios de intervención en bienes inmuebles y de carácter escultórico analizados, se han tomado como punto de partida para los tratamientos en las esculturas de anatomía didáctica. Sin embargo, algunos de ellos no son los más apropiados, ya que no se puede sistematizar los métodos y procedimientos para este tipo de artefactos ni en cualquier conjunto de obras similares, debido a que cada proceso requiere de un estudio y tratamiento individualizado.

5.2. Criterios específicos en procesos de conservación-restauración de modelos científicos

Las características materiales y el estado de conservación que muchos modelos anatómicos científicos presentan, los convierten en artefactos muy sensibles tanto a la manipulación como a los diversos procedimientos de conservación-restauración. Su delicadeza, calidad artística y científica, precisan que, a la hora de efectuar una posible intervención sobre ellos, esta se ajuste a tratamientos muy específicos bajo la premisa de la "mínima intervención".

Debido a la carencia de unos documentos regulados y concretos para abarcar las problemáticas tan complejas que presentan, se ha procedido a analizar una serie de recomendaciones basadas en diversas investigaciones y experiencias llevadas a cabo por diferentes expertos en la materia.

A nivel internacional destacan los trabajos desarrollados en las colecciones anatómicas del Museo de La Specola de Florencia (Poggesi, 2009; Gabbriellini et al., 2013; Afra et al., 2013), las recomendaciones recogidas por el Deutsches Hygiene-Museum de Dresden (Alemania) para las colecciones de dermatología (Baumer et al., 2010; Lang, 2011), las investigaciones realizadas en figuras de arte popular del siglo XIX del Museo Überseemuseum de Bremen (Alemania) (Fischer & Eska, 2011), los tratamientos en modelos clásticos de papel maché elaborados por Louis Thomas Jérôme Auzoux (c. 1797-c. 1880) (Dumont et al., 2011), junto a los trabajos llevados a cabo en las colecciones botánicas de Buenos Aires (Argentina) (Mayoni, 2016).

A nivel nacional destacan las investigaciones en la colección de modelos artificiales en cera policromada conservados en el Museo de Anatomía "Javier Puerta" de la Facultad de Medicina en la Universidad Complutense de Madrid (Sánchez Ortiz et al., 2012; Sánchez Ortiz & Micó Boró, 2012; Sánchez Ortiz, 2015; Sánchez Ortiz & Matia Martín, 2016) y la colección del Museo Veterinario Complutense (Sánchez Ortiz et al., 2018).

A continuación, se recogen diversas premisas orientadas a servir de guía a la hora de abordar tratamientos de conservación–restauración en este tipo de artefactos anatómicos:

- El análisis y las estrategias de intervención serán abordados por un equipo interdisciplinar.
- Cada modelo científico será analizado y diagnosticado individualmente, así como todos los factores intrínsecos y extrínsecos que han repercutido en su deterioro.
- La "mínima intervención" será imprescindible para asegurar la estabilidad material y conceptual.
- Cualquier metodología para aplicar evitará causar la más mínima modificación de las propiedades fisicoquímicas de cada uno de los materiales que constituye el modelo.
- Se precisará de análisis químicos para caracterizar los materiales de la obra. La identificación de los componentes inorgánicos se realizará mediante MO (Microscopía óptica) y SEM-EDX (Scanning Electron Microscopy - Energy Dispersive X-Ray spectroscopy / Microscopía Electrónica de Barrido - Espectroscopía de Rayos X de Energía Dispersiva), mientras que para la caracterización de los componentes orgánicos se recurrirá a la FTIR (Fourier Transform Infrared Spectroscopy - Espectroscopía de Infrarrojos por Transformada de Fourier), así como a la GC-MS (Gas Chromatography - Mass Spectrometry / Cromatografía de Gases - Espectrometría de Masas).
- Las posibles modificaciones que haya podido sufrir el objeto a lo largo de su historia se aceptarán como testimonio de la misma, siempre y cuando no altere la conservación de la pieza.
- Todos los tratamientos se han de realizar en entornos con condiciones climáticas de temperatura y humedad controladas según las necesidades de cada pieza o colección. Asimismo, se precisa de un control lumínico con fuentes que no emiten calor y proporcionen unos niveles de luxes adecuados y controlados.
- Los materiales elegidos para la consolidación han de ser ensayados previamente para valorar su compatibilidad, estabilidad y re-tratabilidad.
- Los adhesivos elegidos para unir fragmentos, así como los materiales seleccionados para las reconstrucciones volumétricas, han de ser ensayados previamente mediante ensayos mecánicos y ensayos de envejecimiento artificial para valorar su compatibilidad, estabilidad, reversibilidad y re-tratabilidad.
- Las reconstrucciones volumétricas de pérdidas solamente se aplicarán en la obra real cuando esté justificado lograr una estabilidad estructural.
- Se debe evitar la limpieza mecánica (bisturí) que requieran de sucesivas aplicaciones, ya que las superficies delicadas se ven erosionadas con facilidad. Se optará por una limpieza superficial con brochas de pelo suave para retirar las partículas de suciedad no adheridas.

- Previamente a la limpieza húmeda, se precisa de análisis acerca de la tensión superficial y la capacidad de humectación en diferentes superficies mediante el método de la gota Sésil. Acto seguido, se realizarán diversas mediciones de la conductividad eléctrica y pH, de cada una de las superficies a tratar, con el objetivo de establecer los valores medios en las diferentes disoluciones a aplicar.
- Se optarán por sistemas de limpieza, gelificados y tamponados cuando la superficie lo permita con el fin de tener un mayor control de la acción limpiadora. Se procederá a retirar todas las sustancias nocivas para la conservación de la obra.
- La limpieza de suciedad superficial adherida se abordará, en primer lugar, mediante un ensayo de solubilidad, valorando la acción que produce. Se optará, siempre y cuando el material lo permita, por medios acuosos, antes que, por los disolventes orgánicos, añadiendo (tensoactivos o quelantes) con el objetivo de modificar la acidez y la conductividad de la solución. Se precisa de análisis químicos para el seguimiento del proceso con el fin de detectar si se ha extraído alguno de los componentes de los materiales.
- La remoción de la película filmógena ha de realizarse mediante un ensayo de solubilidad con disolventes orgánicos sobre la superficie a tratar. Se precisa de análisis químicos para averiguar si durante este proceso se ha extraído alguno de los componentes de los materiales, así como detectar posibles residuos no volátiles.
- La reintegración cromática se llevará a cabo con materiales reversibles e inocuos y con una técnica discernible.
- La protección final de la superficie se efectuará con materiales estables, respetando su acabado original. Se precisan ensayados para analizar el nivel de brillos y acabados, así como ensayos de envejecimiento artificial para valorar su compatibilidad, estabilidad, reversibilidad y re-tratabilidad.
- A nivel preventivo, según las características volumétricas de la obra y su estado de conservación, y siempre y cuando se considere oportuno para asegurar la mejor estabilidad y seguridad, se procederá a elaborar soportes específicos que aseguren su estabilidad mediante materiales inocuos y transparentes.

A continuación, en la figura 224 se muestra la relación de los criterios y de las normativas de carácter general extrapolables al ámbito escultórico y estos, a su vez, adaptados a las necesidades y criterios de las colecciones anatómicas científicas.

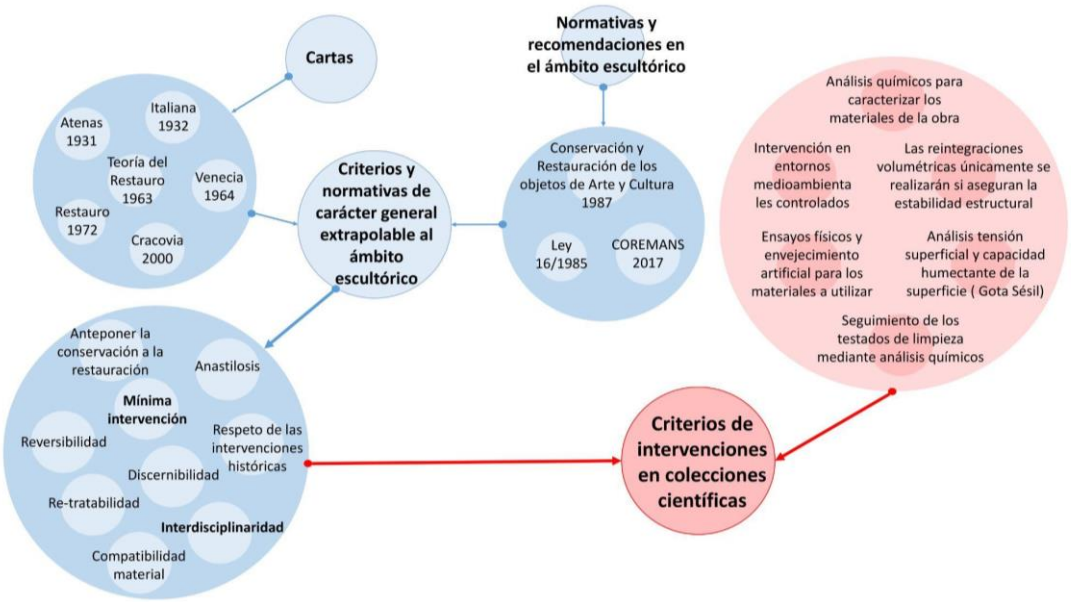


Figura 224. Relación de criterios y normativas de carácter general extrapolable al ámbito escultórico con los criterios de intervención en colecciones anatómicas científicas. © Emanuel Sterp Moga.

5.3. Criterios y usos de las tecnologías 3D en el patrimonio cultural

La evolución de los criterios desarrollados a lo largo de la historia evidencia el aumento de conciencia social y necesidad de plantear medidas y estrategias para la conservación y protección del patrimonio cultural.

En la Carta de Venecia, en concreto, en el art. 2 se recoge con claridad la necesidad de emplear nuevas herramientas para estudiar, documentar y complementar la salvaguarda del patrimonio cultural. Asimismo, en el art. 10 recalca que las nuevas tecnologías complementan los análisis e intervenciones tradicionales, y siempre y cuando las técnicas tradicionales no sean adecuadas, se recurrirá a todas las técnicas modernas basadas en una metodología científica (Carta de Venecia, 1964). En este sentido, los análisis virtuales en 3D ofrecen un amplio abanico de opciones y estudio acerca de hipótesis, anastilosis, entre otras aplicaciones, sin intervenir ni manipular directamente el objeto o la obra de arte. Hoy en día, las tecnologías 3D han demostrado en numerosos casos prácticos sus beneficios y potencial para implementarlos en los procesos de conservación-restauración.

Hasta la fecha no se ha desarrollado ninguna regulación legislativa que abarque los tratamientos de la documentación 3D, análisis de intervenciones, restauraciones virtuales o impresiones 3D aplicadas al patrimonio. Sin embargo, existen diferentes cartas que han ido marcando pautas fundamentales para englobar todos los contenidos de la documentación y visualización computarizada.

Con el objetivo de trabajar con el máximo rigor mediante los nuevos medios digitales 3D en las colecciones anatómicas didácticas y regular las intervenciones virtuales, se han tomado como referencia las normativas recogidas en la, Carta de Londres *Para el uso de la visualización tridimensional en la investigación y divulgación del patrimonio cultural* (Carta de Londres, 2006), la actualización de la Carta de Londres *Para la visualización computarizada del*

patrimonio cultural (Carta de Londres, 2009), los Principios de Sevilla (Principios de Sevilla, 2012) y la Carta de Cracovia *Principios para la conservación y restauración del patrimonio construido* (Carta de Cracovia, 2000) tomando solamente los puntos que presentan conexión con las anteriores. Estos documentos recogen una serie de recomendaciones y guías para la realización de proyectos basados en métodos de visualización digital, por lo que se ha realizado un análisis comparativo de los contenidos expuestas en ellas.

La carta de Londres es uno de los primeros documentos internacionales en el que se recoge la necesidad y preocupación de documentar y analizar el patrimonio cultural mediante herramientas de digitalización 3D y su posterior tratamiento con el máximo rigor. En ella se ofrecen diferentes pautas y se indican los límites, ya que estas herramientas posibilitan grandes aplicaciones y modificaciones, por lo que será necesario tener conciencia de hasta dónde podemos llegar para no caer en unos resultados arbitrarios.

Cabe destacar que, aunque los Principios de Sevilla están específicamente planteados para el patrimonio arqueológico, y la Carta de Cracovia enfocada al patrimonio inmueble, son perfectamente extrapolables a otras áreas patrimoniales (escultura, pintura, etc.). De tal modo, se mencionan en la Carta de Londres (Principio 1), con un planteamiento general, pero se recalca la necesidad de adaptar estos principios y criterios específicos para cada área (Carta de Londres, 2006).

Las diferentes actividades desarrolladas por una comunidad de expertos se sustentan en el planteamiento, documentación y divulgación de la investigación (Principio 1) (Carta de Londres, 2009). Los Principios de Sevilla toman como referencias dichas premisas de la Carta de Londres, desarrollando el primer punto de *interdisciplinariedad* (Principio 1). La colaboración de diferentes especialistas (conservadores, restauradores, ingenieros, informáticos, historiadores, etc.) es fundamental para abordar el trabajo de manera rigurosa, complementando y enriqueciendo el estudio de la obra o el proceso de intervención (Principios de Sevilla, 2012). Con ello, se consigue un intercambio de ideas y conocimientos entre los diferentes especialistas. Respecto a la Carta de Cracovia, aunque no está enfocada a las nuevas tecnologías para la elaboración de documentos, en ella (punto 3) se alude a la importancia del estudio, el análisis de gráficos y la identificación del significado histórico, con una colaboración interdisciplinar para una correcta estrategia de trabajo y conservación (Carta de Cracovia, 2000).

La *finalidad* (Principio 2) expuesta en los Principios de Sevilla, destaca los objetivos planteados en un proyecto de investigación, pero estos han de estar desglosados en objetivos específicos para profundizar lo máximo posible y poder concluir de una manera muy concreta y detallada (Principios de Sevilla, 2012). Las nuevas tecnologías han de estar siempre a disposición del patrimonio, complementando las necesidades de estudio e intervención de cada obra.

Los *propósitos y métodos* (Principio 2) expuestos en la Carta de Londres, están enfocados al uso exclusivo en aquellos casos donde el método seleccionado sea el más apropiado para alcanzar los objetivos generales y específicos. Se destaca que los sistemas de virtualización tridimensional no siempre pueden ser los más apropiados, por lo que han de seleccionarse los métodos más efectivos para cada caso (Carta de Londres, 2006). A raíz de esta premisa, en los Principios de Sevilla se plantea la *Complementariedad* (Principio 3), de manera muy similar. Se señala que los sistemas de digitalización 3D y su posterior procesado para efectuar diferentes tratamientos, han

de servir como una herramienta complementaria que enriquezca la información, pero en ningún momento se plantea como una sustitución a otras técnicas tradicionales (Principios de Sevilla, 2012). Para optar por el mejor sistema observamos en la Carta de Cracovia (punto 10) que cualquier tecnología debe ser probada rigurosamente y comparada con otras para adecuarla de la mejor manera a las necesidades requeridas (Carta de Cracovia, 2000).

Las *fuentes de la información* (Principio 3) explicadas en la Carta de Londres, hacen referencia a toda la información, ya sean físicas o digitales, que de una manera o de otra han influido y ayudado en la creación de los resultados obtenidos en la visualización computarizada. Asimismo, todas las fuentes de investigación han de ser analizadas y evaluadas en relación con los conocimientos actuales por expertos en la materia. Por otro lado, la *documentación* (Principio 4) señala la necesidad de diseñar estrategias que mejoren la visualización computarizada y que permita un análisis y evaluaciones comparativas de las visualizaciones. Igualmente, se debe divulgar una lista de las fuentes de investigación, metadatos y paradatos, para que toda la información sea plenamente comprendida (Carta de Londres, 2009).

Estos apartados en los Principios de Sevilla son más específicos, refiriéndose a la *autenticidad y rigurosidad histórica* (Principios 4 y 5). La primera recalca la infinidad de posibilidades que permiten las nuevas tecnologías de reconstruir el pasado. Estas han de ser veraces y con una validez científica. Todas las intervenciones han de ser discernibles ya que de lo contrario dichas estrategias producirán un impacto no deseado sobre la autenticidad de la obra. La segunda se refiere a una rigurosa documentación histórica, tanto del objeto como del entorno en todos sus aspectos. Una detallada documentación mediante las nuevas tecnologías dará pie a una sólida investigación, con unos modelos virtuales más precisos. Todas estas fuentes serán analizadas y evaluadas en relación con los conocimientos actuales dentro de la comunidad de expertos. Cuando no se disponga de suficiente documentación histórica, será imprescindible ceñirse a la "mínima intervención". Asimismo, técnicas como la fotogrametría o los escáneres de láser serán empleados para obtener una mayor documentación científica (Principios de Sevilla, 2012). Por otro lado, aludiendo a la *autenticidad y rigurosidad* (punto 6), la Carta de Cracovia también hace referencia a la importancia de la documentación y al entorno relacionado con su objeto, pero desde el punto de vista de la intervención debido a su vulnerabilidad (Carta de Cracovia, 2000). Igualmente, se refiere a la "mínima intervención" (punto 5) y es vital tenerlo en cuenta también para los tratamientos virtuales, siempre y cuando no se disponga de suficiente documentación histórica.

Un hecho fundamental que contemplan los Principios de Sevilla respecto a la Carta de Londres es la *eficiencia* (Principio 6). En todo proyecto se buscan los mejores resultados, por ello, siempre se optará por las herramientas de mayor calidad, dependiendo de los objetivos, recursos y tiempo disponible para cada proyecto. Durante la planificación hay que tener en cuenta la efectividad de dichos aparatos, pues muchas veces son muy dosificados y costosos. Será significativo que presenten un uso fácil, al igual que una reparación sencilla y saber en todo momento la necesidad del mantenimiento (Principios de Sevilla, 2012). Sin embargo, la Carta de Cracovia sí que alude a la sostenibilidad de las diferentes opciones seleccionadas, estableciendo una conexión con los aspectos económicos y sociales (punto 8) (Carta de Cracovia, 2000). Aunque estén enfocadas al desarrollo del proyecto de restauración, es perfectamente extrapolable a proyectos de investigación de diferentes ámbitos.

Respecto al apartado *requisitos de transparencia* presentados en la Carta de Londres, (Principio 4) hace especial hincapié en la investigación destinada a diferentes públicos, de tal manera que estos estén debidamente documentados y explicados para su correcta comprensión. Asimismo, cada proyecto tiene diferentes informaciones y, por tanto, los requisitos de transparencia serán distintos. Estos se proporcionarán mediante los medios más apropiados para cada caso (gráficos, textos, videos, audio…) (Carta de Londres, 2006). En los Principios de Sevilla, se denomina *transparencia científica* (Principio 7), a toda investigación que ha de ser difundida tanto a un público lego, como divulgada en diferentes medios científicos y bases de datos, con la incorporación de los metadatos y paradatos, para ser expuesta a estudios y críticas de diferentes profesionales. Asimismo, será fundamental la aportación por parte de los expertos, donde discutan el punto de partida de la investigación, desde una perspectiva contraria (Principios de Sevilla, 2012). La transparencia permitirá diferentes puntos de vista y, con ello, la mejora y evolución del conocimiento.

La *formación y evaluación* (Principio 8) expuestas en los Principios de Sevilla, resaltan que cada disciplina académica presenta un método científico único, con un lenguaje y técnicas diferentes y, por tanto, es necesario crear un programa específico y detallado de formación y evaluación (Principios de Sevilla, 2012). La Carta de Londres en el *acceso* (Principio 8), además, señala la posibilidad de manipular, ampliar y modificar los objetos virtuales, así como de estudiar sus cambios a largo plazo (Carta de Londres, 2006). Desde otro punto de vista, la Carta de Cracovia (punto 13) aparte de dirigirse a diferentes públicos, hace hincapié en la formación de responsables cualificados que tengan que desempeñar aspectos históricos, técnicos, culturales y económicos (Carta de Cracovia, 2000), hecho fundamental para garantizar una investigación rigurosa y coherente.

Por último, merece especial atención el tema de *sostenibilidad* (Principio 5) desarrollada en la Carta de Londres, ya que no se ha incluido en los Principios de Sevilla. Resalta la necesidad y urgencia de crear estrategias para conservar a largo plazo los datos digitales, con el fin de evitar pérdidas irreparables a causa de la obsolescencia de los medios. Dichas estrategias son vitales para diseñar un correcto plan de conservación preventiva (Carta de Londres, 2009). La Conferencia General núm. 38, realizada por la UNESCO en el año 2015, alude una vez más a la necesidad y urgencia de la preservación del patrimonio documental-digital y del acceso al mismo (Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura [UNESCO], 2015). También en una de las últimas directrices de la UNESCO/PERSIST se incide nuevamente sobre la selección del patrimonio digital para su conservación a largo plazo (UNESCO, 2021).

Las legislaciones, normativas y recomendaciones desarrolladas durante el siglo XX y principios del XXI, han servido para establecer los cimientos y determinar los objetivos precisos en relación con el uso de los nuevos medios tecnológicos. A partir de la Carta de Cracovia, las recomendaciones se han ampliado y desarrollado en múltiples aspectos según las carencias y evolución de las tecnologías. El potencial de los nuevos medios digitales deja patente la necesidad de profundizar en sus posibilidades, al mismo ritmo vertiginoso en el que la tecnología avanza, para sacar el máximo rendimiento a los medios en los diferentes procesos de documentación e intervenciones en el patrimonio cultural.

Como bien se ha observado en este breve repaso de la evolución de las normativas, criterios y recomendaciones, a medida que se va desarrollando y ampliando el campo de la conservación y restauración, es necesario crear definiciones y estrategias más concretas para cada tipo de técnicas y aplicaciones. Por ello, en el siguiente punto, tomados como referencia todos los criterios analizados, se han concretado diversas recomendaciones a la hora de implementar los sistemas digitales 3D en las colecciones científicas estudiadas.

5.4. Recomendaciones para la gestión de los instrumentos digitales 3D aplicadas a las colecciones anatómicas científicas

¿Cómo hacer un buen uso de las técnicas digitales 3D aplicadas al patrimonio científico?

Fruto del constante avance tecnológico, de la preocupación y la necesidad de actualizar e innovar, los medios de documentación dieron pie a diversas recomendaciones desarrolladas acerca del uso de las técnicas digitales 3D aplicadas al patrimonio cultural, como se ha visto a lo largo del capítulo. En ellas, se reflejan unas pautas guiadas para que los profesionales del sector puedan llevar a cabo una correcta documentación y utilización de estos materiales.

A partir de los marcos teóricos y, sobre todo, de la experiencia adquirida en la presente investigación, se han establecido diversas premisas recomendables para el uso de las técnicas digitales 3D basadas en la digitalización, restauración virtual, modelado virtual e impresión 3D aplicadas a las colecciones anatómicas científicas con la finalidad de asegurar una correcta documentación e intervención bajo el criterio de la "mínima intervención" y el máximo respeto por el original:

- Todo artefacto y proceso de intervención se documentará mediante técnicas de digitalización 3D para obtener un mayor volumen de información.
- Se recurrirá a escáneres de luz estructurada o triangulación láser con el objetivo de alcanzar una mayor calidad, resolución y precisión en el registro volumétrico.
- Se recurrirá a la fotogrametría con el fin de lograr una textura de color de alta resolución y fidelidad. Asimismo, se precisará durante la captura fotogramétrica de entornos de iluminación controlados (número de luxes) y difusores para reducir los posibles brillos en superficie por causa de la presencia de películas de recubrimiento como acabado final.
- En las fotografías siempre se realizará un estudio basado en la gestión del color para asegurar el máximo rigor en la colorimetría.
- Se recurrirá a modelos fotogramétricos capturados con fluorescencia visible inducida por radiación UV para disponer de una mayor información de cara al diagnóstico de la obra.
- Será imprescindible emplear barras de escalas durante la captura fotogramétrica para conseguir unos datos volumétricos precisos.
- Las cartografías de patologías se efectuarán sobre la textura de color de los modelos fotogramétricos adquiridos con el fin de plasmar la totalidad de los deterioros existentes.
- Los tratamientos virtuales estarán estrechamente relacionados con los criterios de intervención en diversos procesos de conservación-restauración con el fin de establecer los límites de los tratamientos.

- Todo trabajo virtual irá acompañado y respaldado por una detallada investigación mediante una metodología científica y con una hipótesis firme, para no caer en falsos históricos.
- Se recurrirá a la restauración virtual como herramienta para previsualizar los resultados a alcanzar en tratamientos que suponen un gran impacto sobre la obra, como podrían ser la eliminación de repintes o la remoción de películas filmógenas.
- Se estudiarán de manera virtual las reintegraciones cromáticas para seleccionar la técnica más adecuada y hallar los colores, capas y densidades a aplicar.
- Se analizarán y simularán, de manera virtual, las posibles manipulaciones a realizar en los modelos anatómicos científicos que pudieran presentar especiales dificultades por su complejidad constructiva o por el grado de deterioro alcanzado, de manera que se reduzcan las maniobras durante la intervención en la obra real.
- Se recurrirá a los modelos digitalizados en 3D que mayor resolución y precisión presenten en la malla para realizar los tratamientos de la anastilosis, las reintegraciones volumétricas y el seguimiento del estado de conservación. Se precisará de un programa informático de infografía 3D, equipado con herramientas de medición de alta precisión.
- Se efectuarán únicamente de manera virtual las reintegraciones volumétricas de áreas comprometidas en aquellas piezas de las que no se disponga de suficiente información para evitar crear falsos históricos.
- Se recurrirá al modelado digital de todos aquellos elementos necesarios para complementar un proceso de intervención determinado a través de la impresión 3D.
- Se emplearán sistemas de impresión 3D con el objetivo de facilitar tratamientos en la adhesión de fragmentos mediante diversas estructuras auxiliares.
- Se precisará de ensayos mecánicos de tracción y flexión para hallar el comportamiento mecánico de los materiales de impresión 3D y de las composiciones estructurales de cada pieza, con el fin de asegurar la suficiente estabilidad y seguridad durante las intervenciones.
- Se utilizarán sistemas de impresión 3D para obtener moldes enfocados a los tratamientos de reintegraciones volumétricas, siempre y cuando el conjunto requiera de una estabilidad estructural. Asimismo, se analizarán las posiciones y ángulos de impresión que ofrezcan mayor calidad y precisión en los detalles.
- Se crearán facsímiles para ensayar cualquier intervención en la que se apliquen nuevos materiales y sistemas complementarios mediante la impresión 3D con el fin de comprobar su eficacia y comportamiento con anterioridad a los tratamientos en la obra real.
- Toda la documentación generada en 3D del estado inicial de la obra, de los procesos de intervención, así como de los resultados finales, será difundida a través de infografías 2D fotorealistas y por medio de los propios modelos 3D optimizados para su publicación en plataformas web. Se garantizará el máximo control en la calidad de la malla, textura y gestión del color.

En la figura 225 se pueden observar las diferentes conexiones entre las recomendaciones expuestas en las dos Cartas de Londres y Principios de Sevilla. De igual modo, se muestran las relaciones entre los criterios de intervención en el ámbito escultórico general y el específico en las colecciones anatómicas científicas, prestando especial atención a las nuevas tecnologías 3D.

Se pretende, con ello, recordar a los profesionales del sector de la conservación y restauración del patrimonio científico, la necesidad de respetar pautas concretas sobre el uso de las mismas en las intervenciones a realizar.

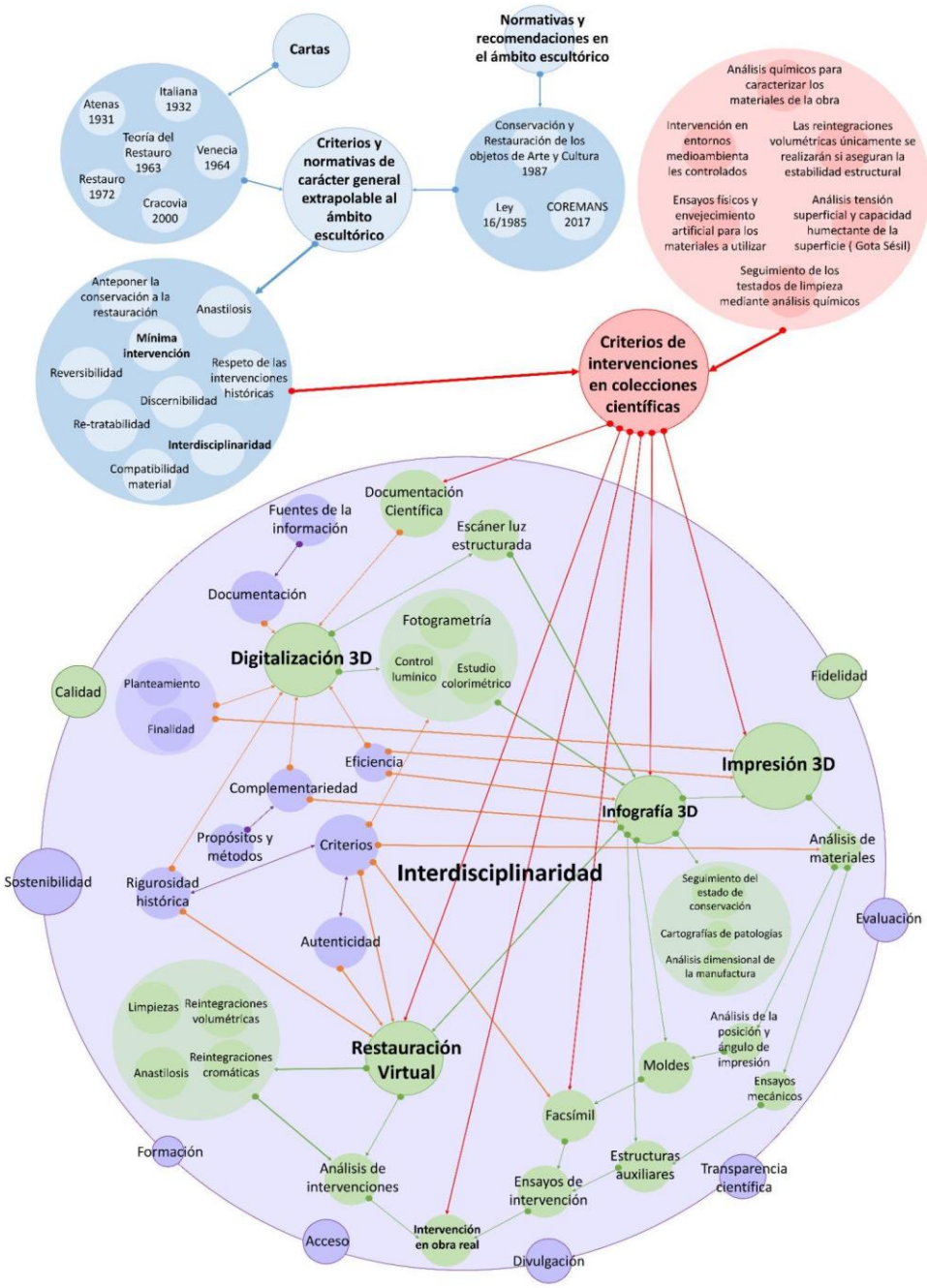
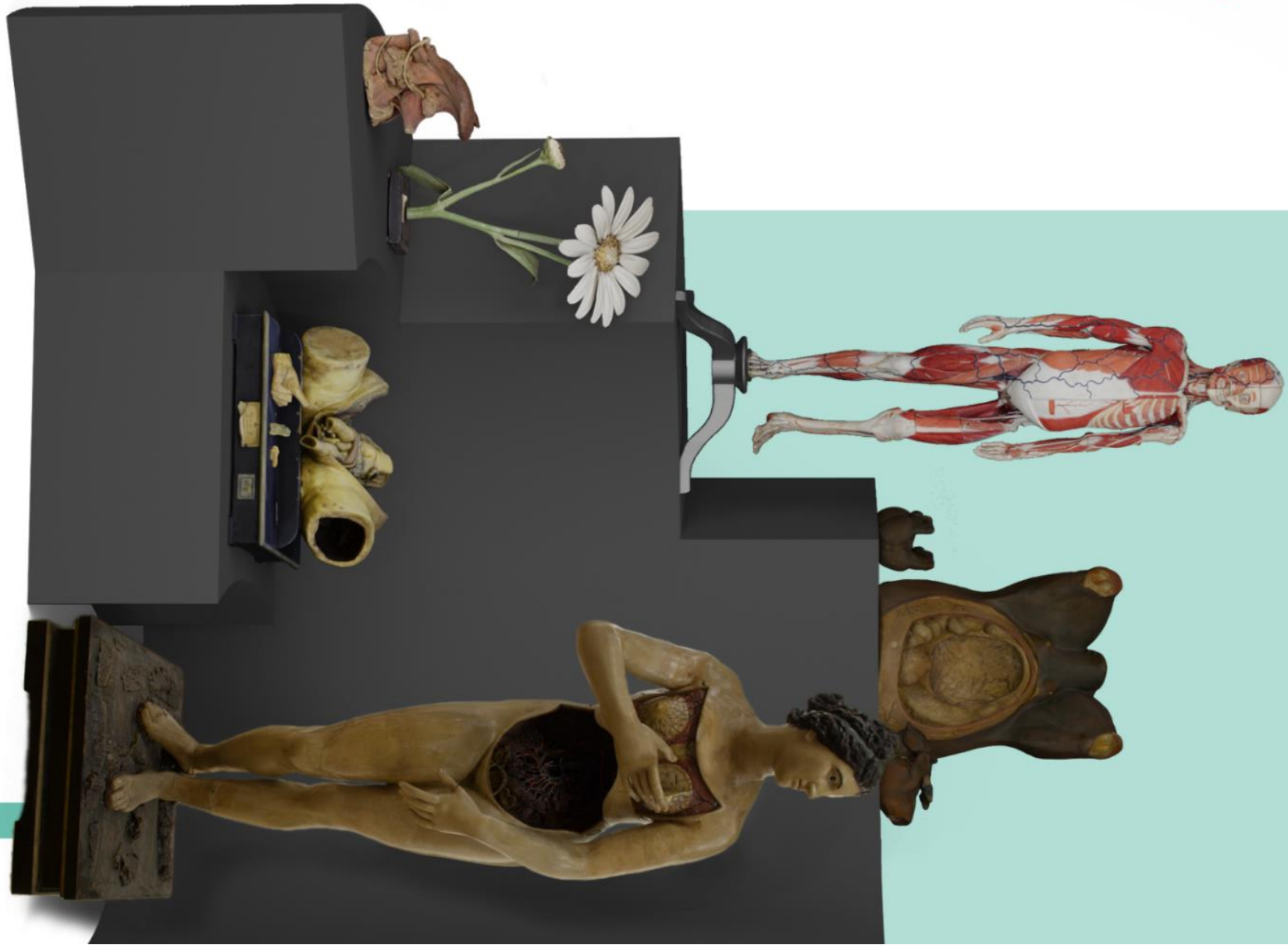


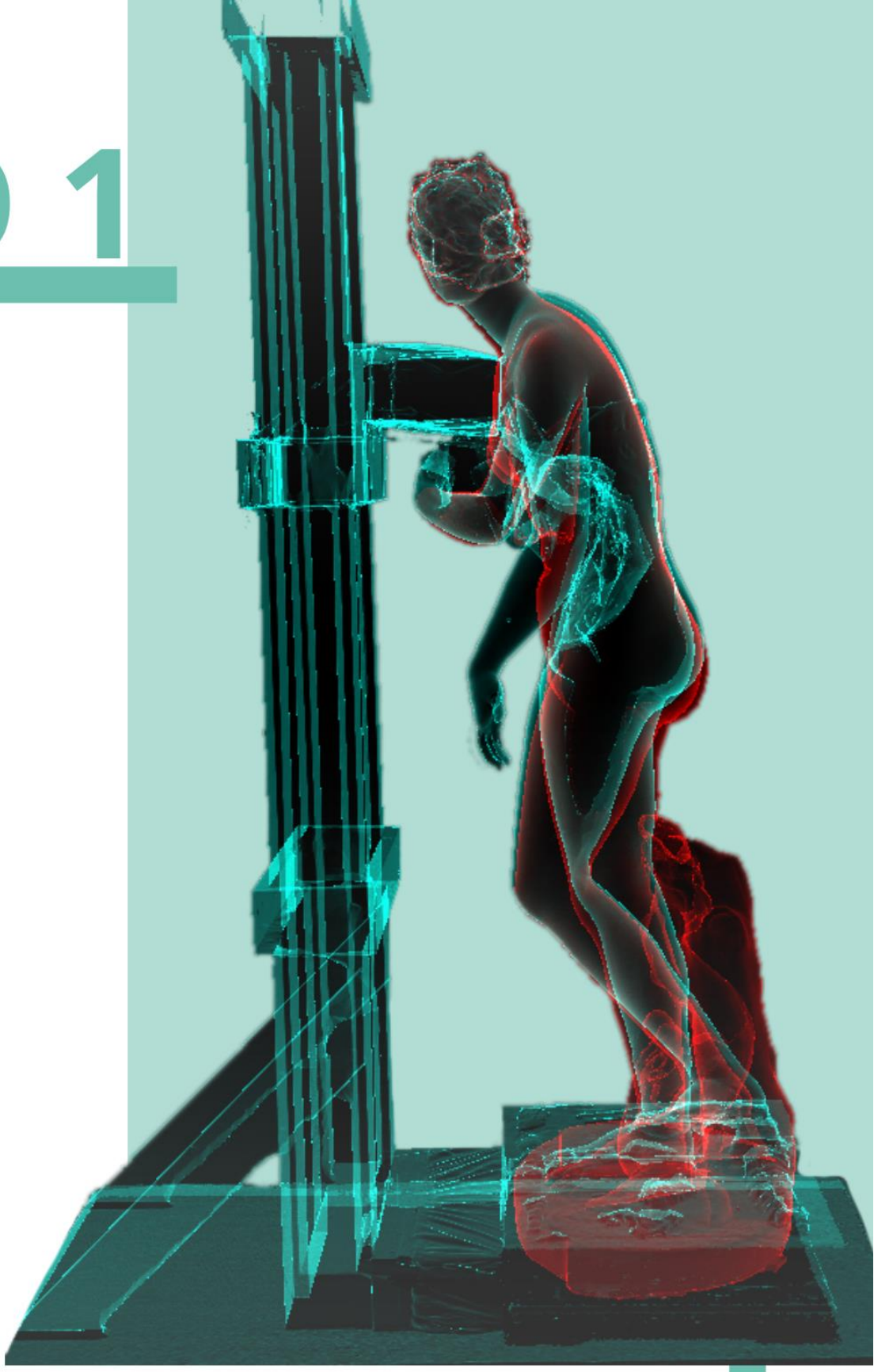
Figura 225. Relación y complementación entre las diversas cartas, normativas y recomendaciones analizadas. Azul: Relación de criterios y normativas de carácter general extrapolable al ámbito escultórico con los criterios de intervención en colecciones anatómicas científicas marcadas en rojo. Morado: Cartas de Londres y Principios de Sevilla. Verde: Recomendaciones establecidas para el uso de las técnicas digitales 3D sobre el patrimonio científico. Naranja: Relación de cartas internacionales y nacionales sobre el uso de las tecnologías 3D aplicadas al patrimonio cultural con las recomendaciones establecidas específicas para las aplicaciones sobre los artefactos anatómicos científicos. © Emanuel Sterp Moga.

CASOS DE ESTUDIO 9



CASO 1

VENUS DE MEDICI



Museo de Anatomía "Javier Puerta" (UCM)

Documentación técnica, análisis de la manufactura y seguimiento del estado de conservación

6.1. Caso 1: Venus de Medici. Museo de Anatomía "Javier Puerta" (UCM). Documentación técnica, análisis de la manufactura y seguimiento del estado de conservación

Para el primer caso de estudio, se tomó como referencia el modelo anatómico *Venus de Medici* (n.º Ref.: MAJP000034), anatomizada por el disector anatómico Ignacio Lacaba (1745-1814), cuyas dimensiones son de 158,4 x 35,3 x 47,2 cm. Se trata de una escultura de bulto redondo en cera policromada, creada para el gabinete del Real Colegio de Cirugía de San Carlos de Madrid, conservada en el Museo de Anatomía "Javier Puerta" de la Facultad de Medicina (UCM). El estudio se ha desarrollado como parte del trabajo comprendido en el proyecto I+D: *Metodologías innovadoras en conservación de colecciones científicas con modelos didácticos para la enseñanza de Botánica, Anatomía humana y animal basadas en las nuevas tecnologías 3D,* Ref.: PGC2018-098396-B-100.

La mayoría de las figuras femeninas anatómicas en cera conservadas en diferentes colecciones rememoran el ideal de belleza de la escultura clásica. Durante el siglo XVIII, la Venus de Medici, derivada del prototipo de la Venus de *Cnido* de Praxíteles (395-330 a. C) (figura 226 a) y de la Venus *Capitolina* (figura 226 b), se ganó el apelativo de "milagro del arte". La copia helenística en mármol del siglo I a.C., conservada en la Galería de los Uffizi de Florencia (figura 226 c), alcanzó una enorme fama mundial a través del *Grand Tour* de viajeros y artistas, y acabó por convertirse en una de las piezas más copiadas y reproducidas de todos los tiempos (Haskell & Penny, 1990) (figura 227). Durante su viaje a París, es posible que Lacaba tuviera la ocasión de conocer los modelos anatómicos de Guillermo Desnoues (1650-1735) y quizás también alguna de las copias de la Venus, tal y como él mismo lo indicó en su C*urso completo de anatomía del cuerpo humano, tomo V de 1800* (Bonell & Lacaba, 1800). Es también plausible pensar que un hombre de ciencia ilustrado optará por el prototipo neoclásico de belleza femenina (figura 228 a). Respecto al estudio de la parte anatómica correspondiente a la disección de glándulas mamarias y de la vascularización abdominal parece inspirarse en las ilustraciones contenidas en los tratados médicos de renombre en su época, como el grabado de Gaspar Becerra (1520-1570), *Anatomía de mujer*, contenido en el tratado de Juan Valverde de Hamusco (1525-1587), *Historia de la composición del cuerpo humano,* de 1556 (Valverde de Hamusco, 1556) (figura 228 b), o en la imágen de Gaetano Petrioli (s.f.) que acompañan la *Le OTTO Tavole Anatomiche Con Cinquanta Figure In Foglio Delineate Per Compomento Dell´Opera Sublime, Et Imperfetta Del Celebre Bartolomeo Eustachio Di S. Severino Della Marca Composte Con Sommo Studio, E Fatica* (Petrioli, 1750) (figura 228 c).

La Venus médica en cera presenta como peculiaridad ser la única pieza desmontable que se conserva en la colección ceroplástica procedente del Real Colegio. En concreto, el pecho y el abdomen se pueden separar del conjunto para acceder a visualizar las estructuras y los órganos internos. En el *Memorial Literario,* de enero de 1787, se describe con todo detalle este modelo anatómico (*Memorial Literario, Instructivo y Curioso de la Corte de Madrid. Enero de 1787* [UCM. Biblioteca Histórica, FLL 23088]). El 10 de enero de 1787, el disector anatómico recibió un pago de dos mil cuatrocientos noventa y nueve con veinticuatro maravedís de vellón por la construcción de la escultura (Libro de Acuerdos para el Real Colegio de Cirugía de San Carlos establecido en Madrid en 1787, pp.219-220).

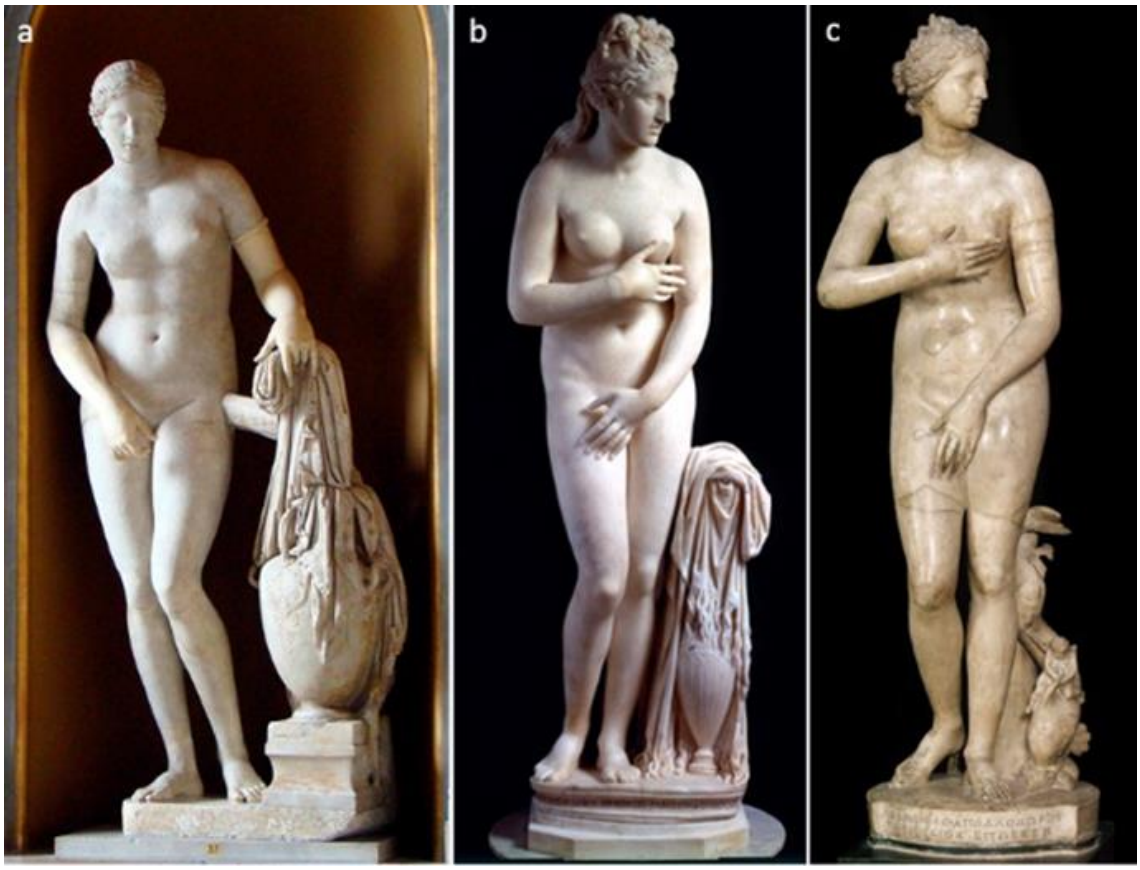


Figura 226. a) Venus de Cnido de Praxíteles, s. VI a.C, Museos Vaticanos, Roma. © Fernando Marín Valdés. b) Venus Capitolina, s. VI a.C, Roma. © Museos Capitolinos. c) Venus de Medici, copia del s. I a. C. © Galería de los Uffizi, Florencia (Ver modelo 3D).



Figura 227. a) Venus de Medici, reproducción del s. XVIII, Real Academia de Bellas Artes de San Fernando. © Enrique Sáenz de San Pedro (Ver modelo 3D). b) Venus de Medici, reproducción del s. XVIII. © Royal Academy of Arts. c) Venus de Medici, The Royal Cast Collection. © Marchal Geoffrey (Ver modelo 3D). d) Venus de Medici, s. XVIII. © The J. Paul Getty Museum. e) Venus de Medici, s. XVIII**,** Museo de Anatomía "Javier Puerta" de la Facultad de Medicina, UCM (Ver modelo 3D). © Emanuel Sterp Moga.

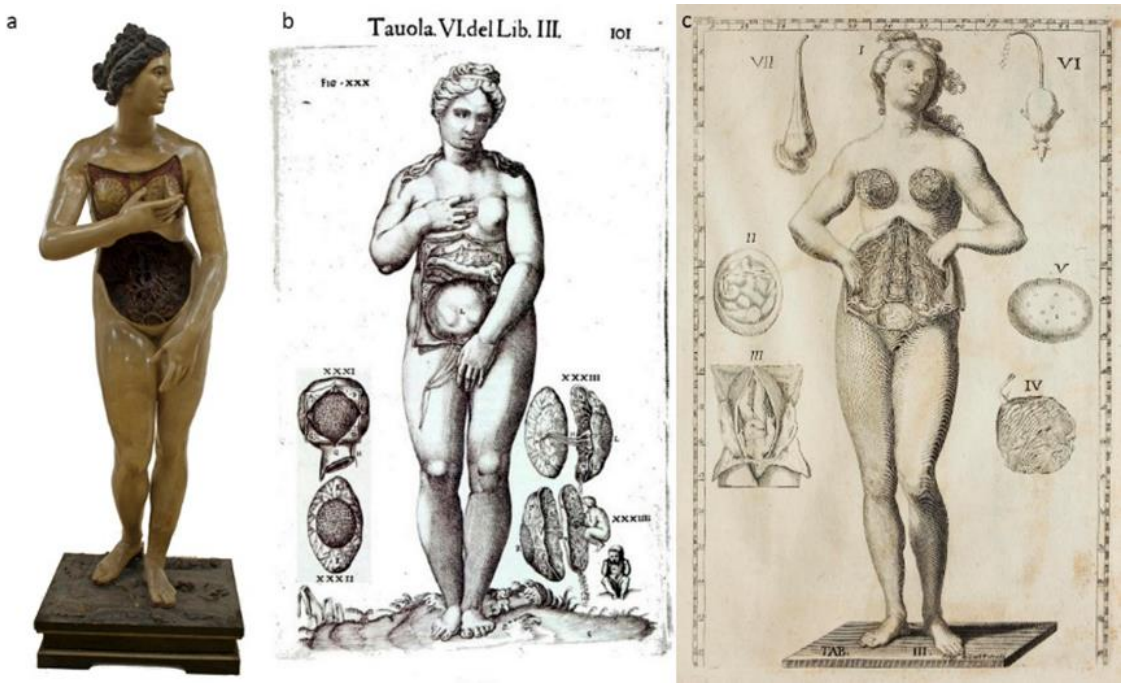


Figura 228. a) Venus de Medici, s. XVIII**,** Museo de Anatomía "Javier Puerta" de la Facultad de Medicina, UCM (Ver modelo 3D). © Emanuel Sterp Moga. b) © Juan Valverde de Hamusco, calcografía atribuida a Gaspar Becerra, Anatomía de mujer. *Historia de la composición del cuerpo humano,* 1560. c) © Gaetano Petrioli, *Le OTTO Tavole Anatomiche Con Cinquanta Figure In Foglio Delineate Per Compomento Dell´Opera Sublime, Et Imperfetta Del Celebre Bartolomeo Eustachio Di S. Severino Della Marca Composte Con Sommo Studio, E Fatica,* 1750.

Dada la gran semejanza existente entre la Venus de cera y la Venus clásica, se procedió a realizar un primer análisis y estudio comparativo entre ellas cuyos resultados fueron recogidos en el Trabajo Fin de Grado (Sterp, 2017, p.11). Se analizó la manufactura de la figura de cera y la de la Venus de Medici perteneciente a la The Royal Cast Collection. Se planteó entonces que quizás Lacaba recurrió al uso de moldes para la construcción de su modelo. Esta línea de investigación se ha mantenido en el tiempo con el objetivo de concretar dicha hipótesis. Este nuevo estudio se ha enfocado en la búsqueda de posibles relaciones entre la Venus de cera y la Venus de Medici conservada en la RABASF (Real Academia de Bellas Artes de San Fernando) (Ref.: V-076). Esta última formó parte de la colección de D. Antonio Rafael Mengs (1728-1779) (figura 229 a). En 1770, este obtuvo los permisos necesarios para adquirir nuevos moldes de la escultura, según figura en los documentos del Archivo de la Galería de los Uffizi (Negrete Plano, 2012, p.172). El 23 de junio de ese mismo año, el formador Vincenzo Ciampi (s.f.) confirma la recepción de la escultura de la Venus de Medici en la RABASF sin ninguna rotura ni falta (Becattini, 1991). Su presencia en la Academia la elevó al paradigma de la belleza femenina, siendo objeto de numerosas copias y reproducciones (Negrete Plano, 2012, p.173).

Desde la llegada de la Venus de Medici a la RABASF, pasaron 17 años hasta que Lacaba finalizó su modelo anatómico en cera (figura 229 b). Otro dato de interés se refiere a la cercanía entre los edificios que ocupaban ambas instituciones de enseñanza. En 1773, la RABASF estaba ubicada en el Palacio de Goyeneche, en la Calle de Alcalá nº 13, donde sigue permaneciendo en la actualidad, mientras que el Real Colegio de Cirugía de San Carlos se encontraba situado en las calles de Atocha nº 106, Calle Santa Inés y la Calle Santa Isabel nº 51 (edificio actualmente ocupado por el Instituto Nacional de la Administración Pública - INAP - y el Colegio Oficial de

Médicos de Madrid). La distancia entre ambas instituciones, que ronda en torno a 1,5 km aproximadamente, bien pudo contribuir a que fueran frecuentes las colaboraciones entre los profesionales y los estudiantes que acudían a ellas para la formación en anatomía.



Figura 229. a) Venus de Medici, reproducción del siglo XVIII, Real Academia de Bellas Artes de San Fernando (Ver modelo 3D). b) Venus de Medici, siglo XVIII**,** Ignacio Lacaba**,** Museo de Anatomía "Javier Puerta" de la Facultad de Medicina, UCM (Ver modelo 3D). © Emanuel Sterp Moga.

Por todo ello, dentro del marco del proyecto I+D referido anteriormente, se ha considerado fundamental retomar el trabajo para analizar y comparar el modelo de la Venus de Medici en cera con el modelo de la Venus de Medici en escayola. Se han empleado técnicas digitales 3D, basadas en el escaneado de luz estructurada, con el fin de asegurar la máxima precisión y calidad en los modelos virtuales generados. El trabajo se ha centrado en realizar la digitalización 3D, en hacer el estudio comparativo entre ambas esculturas y en llevar a cabo el análisis y el seguimiento anual del estado de conservación estructural a partir de los modelos escaneados de la Venus en cera (Sterp Moga et al., 2022c).

6.1.1. Estado de conservación de la Venus de Medici en cera

Desde su creación, el modelo anatómico ha sido objeto de procesos de alteración causados por la acción combinada de diferentes agentes intrínsecos y extrínsecos. La incorporación de nuevos métodos de enseñanza en las aulas llevó a que este tipo de objetos didácticos dejasen de cumplir su función y terminarán por ser retirados a almacenes o sótanos, quedando a merced de una suerte incierta y, en muchas ocasiones estando sometidos a fluctuaciones constantes de temperatura y humedad relativa. Estas condiciones inadecuadas han provocado cambios dimensionales en el soporte céreo que han repercutido en la pérdida de la estabilidad del conjunto. A estos daños se suman la aparición de fisuras, grietas, fracturas y faltas matéricas generadas por manipulaciones y traslados inadecuados (figura 230). El diagnóstico sobre el estado de conservación permitió comprobar que la figura había sido intervenida en el pasado con la finalidad de frenar los deterioros. Estas actuaciones dejaron su impronta sobre la obra, alterando los acabados originales. Se han observado restos de adhesivos sintéticos, así como reintegraciones volumétricas con nuevas pastas de cera que presentan comportamientos diferentes a la utilizada para la fabricación del original. Los daños estructurales mencionados se remontan a épocas que no se han podido precisar.

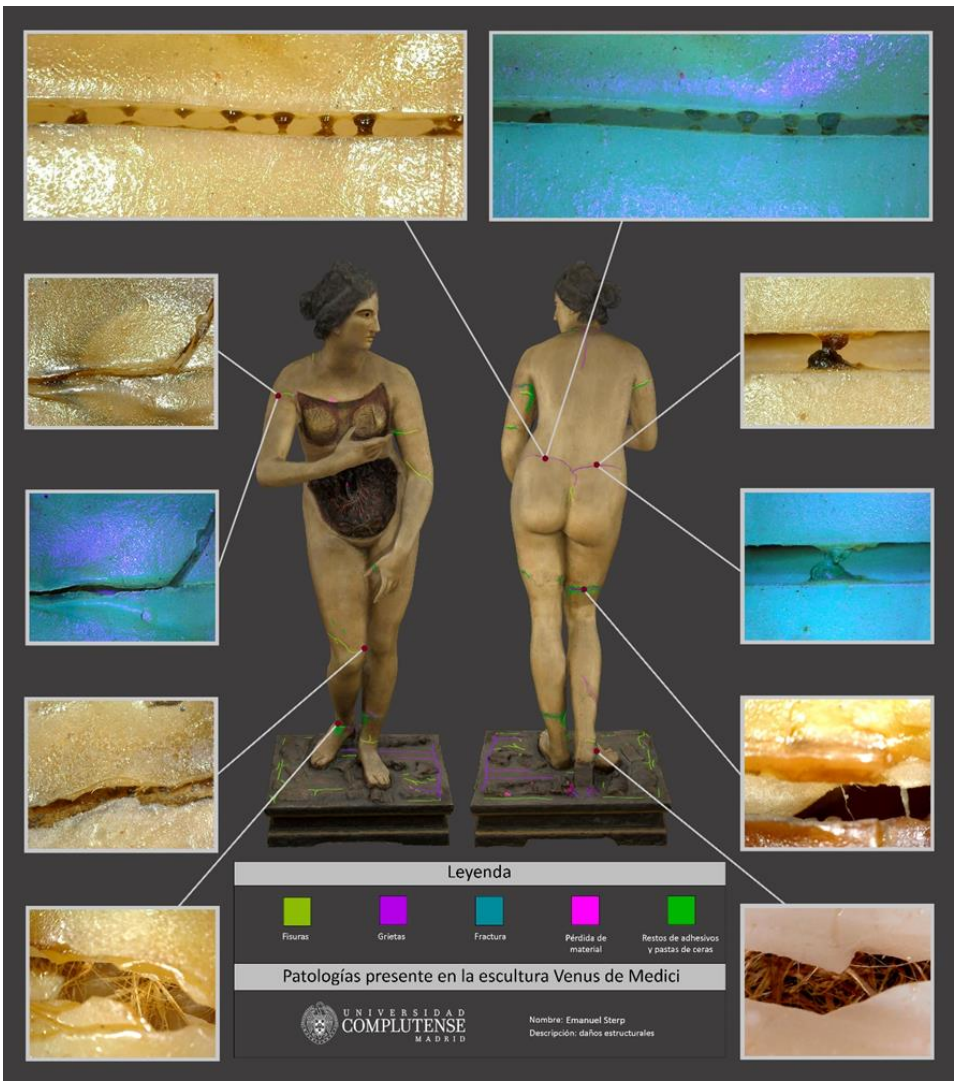


Figura 230. Cartografías 3D de patologías estructurales. © Emanuel Sterp Moga, Óscar Hernández-Muñoz y Alicia Sánchez Ortiz.

Los análisis sobre el delicado estado de conservación de esta figura anatómica empezaron con el Trabajo Fin de Grado (Sterp, 2017). La investigación derivó de la enorme preocupación por parte de la profesora Alicia Sánchez Ortiz, experta en conservación de ceroplástica anatómica, y del profesor Fermín Viejo Tirado, director del Museo ante el crítico estado de conservación que mostraba la obra (figura 231 a). A lo largo de los años se ha observado como la escultura ha ido inclinándose hacia delante debido a una distribución desigual de los pesos y a la separación de los pies en la peana. En 2017, se tomaron medidas de carácter urgente para evitar que la obra pudiera colapsar ante el avance de los daños. Con el apoyo de los técnicos de la empresa Tti, se procedió a extraer la escultura de su vitrina para dotarla de una estructura auxiliar de apoyo (figura 231 b) con la finalidad de mantener el conjunto estable hasta que sea posible proceder a su restauración (Sterp, 2017, p.52).



Figura 231. a) Estado de la escultura previo a su retirada de la vitrina. b) Estado de la escultura tras aplicar la estructura auxiliar temporal. © Emanuel Sterp Moga.

6.1.2. Proceso de análisis de las esculturas

6.1.2.1. Digitalización 3D

La estrategia de registro empleada en ambos casos, basada en girar alrededor de la escultura con los dos escáneres, se llevó a cabo debido a las características volumétricas de cada obra y al delicado estado de conservación (figuras 232). El procesado de la información proporcionó una malla de altísima calidad, con aproximadamente 60 millones de polígonos en el caso del modelo en cera (figura 233 y tabla 15) y 55 millones en el del modelo en escayola (figura 234 y tabla 16).



Figura 232. Proceso de escaneado. a) Venus de Medici en cera Museo de Anatomía “Javier Puerta”. © Emanuel Sterp Moga. b) Venus de Medici en escayola RABASF. © Judit Gasca Miramón.

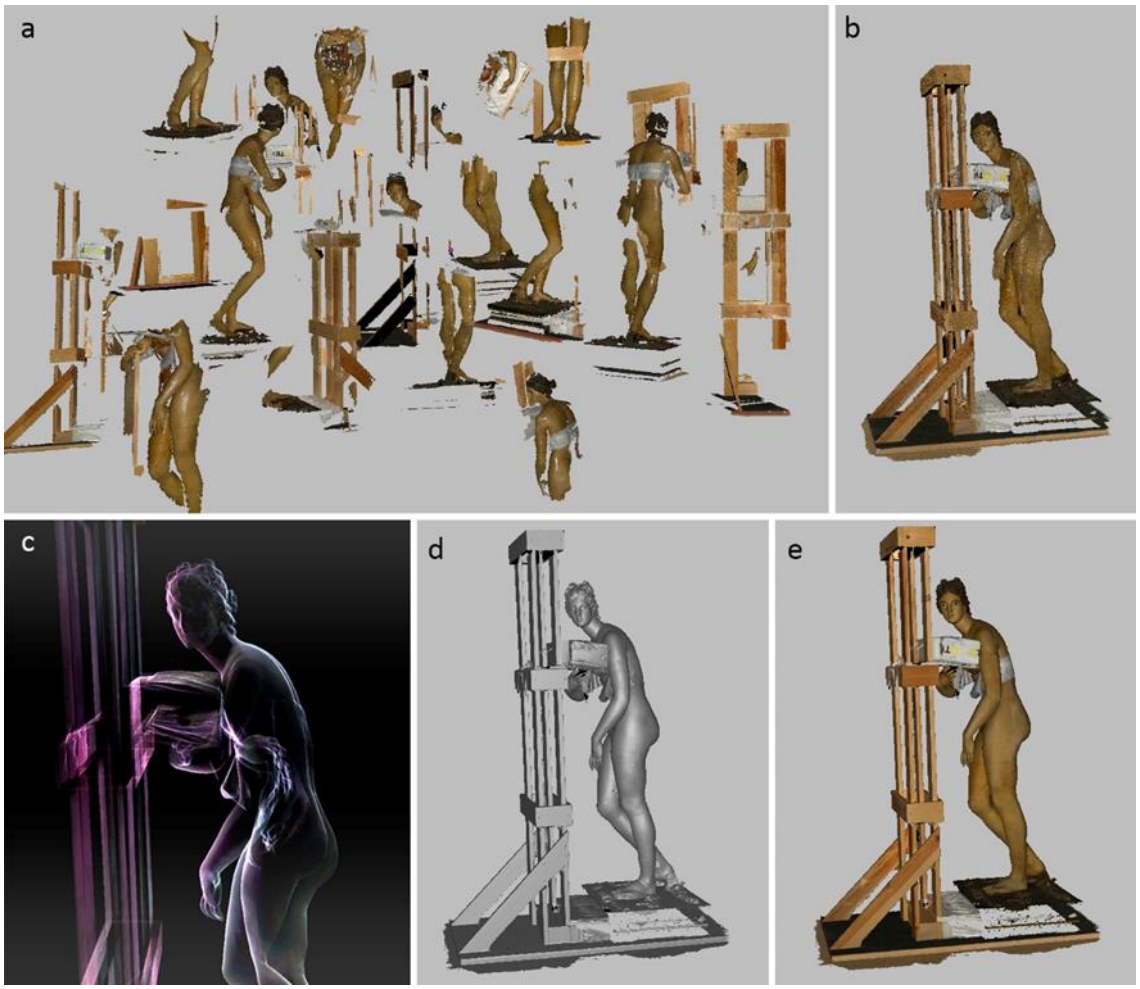


Figura 233. Venus de Medici de cera. a) Escaneos. b) Alineación realizada. c) Registro global. Visión X-Ray. d) Malla. e) Textura final (Ver modelo 3D). © Emanuel Sterp Moga, Óscar Hernández-Muñoz y Alicia Sánchez Ortiz.

Venus de Medici Cera		
Modelo escáner	Artec Eva	Artec Space Spider
Velocidad de escaneo	12-15	5-6.5
Registro	Geometría y textura	Geometría y textura
Resolución	0.2	0.1
Sensibilidad	Media	Media
Escaneos	27	48
Error máximo	0.4	0.2
Fotogramas	11.176	17.544
Fragmentos de textura	957	1679
Polígonos	58.864.956	
Textura	16,384 x 16,384	
Área de superficie	2132992 mm^2	

Tabla 15. Venus de Medici en cera. Características del proceso de escaneado y resultados obtenidos. © Emanuel Sterp Moga.

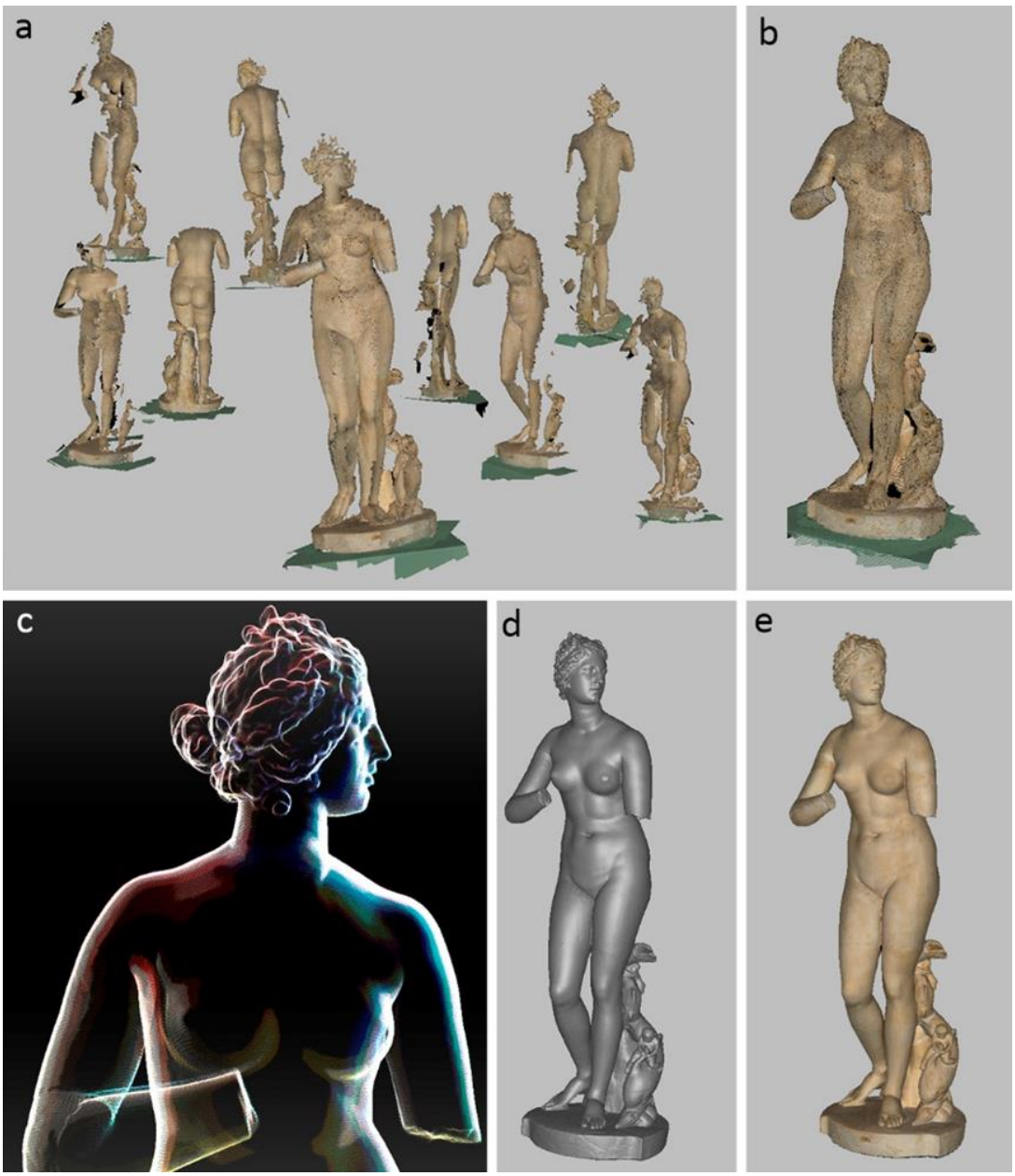


Figura 234. Venus de Medici RABASF. a) Escaneos. b) Alineación realizada. c) Registro global. Visión X-Ray. d) Malla. e) Textura final (Ver modelo 3D). © Emanuel Sterp Moga, Óscar Hernández-Muñoz y Alicia Sánchez Ortiz.

Venus de Medici RABASF		
Modelo escáner	Artec Eva	Artec Space Spider
Velocidad de escaneo	12-15	5-6.5
Registro	Geometría y textura	Geometría y textura
Resolución	0.2	0.1
Sensibilidad	Media	Media
Escaneos	20	41
Error máximo	0.4	0.2
Fotogramas	11.017	16.290
Fragmentos de textura	648	1146
Polígonos	55.286.290	
Textura	16,384 x 16,384	
Área de superficie	2124845 mm^2	

Tabla 16. Venus de Medici en escayola RABASF. Características del proceso de escaneado y resultados obtenidos. © Emanuel Sterp Moga.

El registro general capturado con el escáner Artec Eva recogió con precisión la morfología global de las esculturas; sin embargo, los detalles concretos relativos a las fracturas, grietas y fisuras existentes en la figura anatómica se obtuvieron mediante el escáner Artec Space Spider. La combinación de ambos equipos ofreció un modelo de altísima resolución y calidad para abordar los diversos análisis planteados (figura 235).

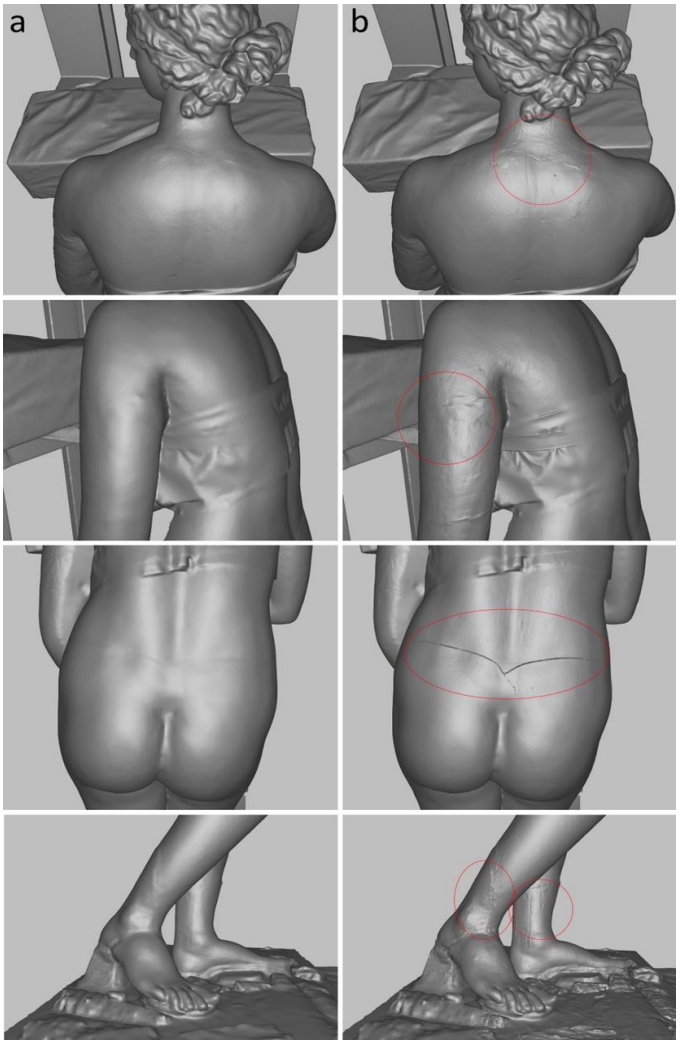


Figura 235. Venus de Medici en cera. a) Malla obtenida con el escáner Artec Eva. b) Superposición de la malla obtenida con Artec Space Spider sobre la malla de Artec Eva. © Emanuel Sterp Moga.

6.1.2.2. Comparación volumétrica entre esculturas

El alto nivel de parecido de la Venus anatómica en cera con la Venus de Medici en escayola nos guía a pensar que Lacaba pudo utilizar los moldes existentes en la RABASF para obtener de ellos los positivos en cera. Con el fin de comprobar dicha hipótesis, se procedió a superponer los modelos 3D de la Venus médica con la Venus de esta institución. Durante el alineado de los modelos, se establecieron 17 puntos en común para obtener la máxima alineación y superposición (figura 236). Los resultados revelaron que la Venus de cera no encajaba a la perfección con la Venus de escayola, ya que la primera tiene unas dimensiones aparentemente inferiores en cuanto a la altura.

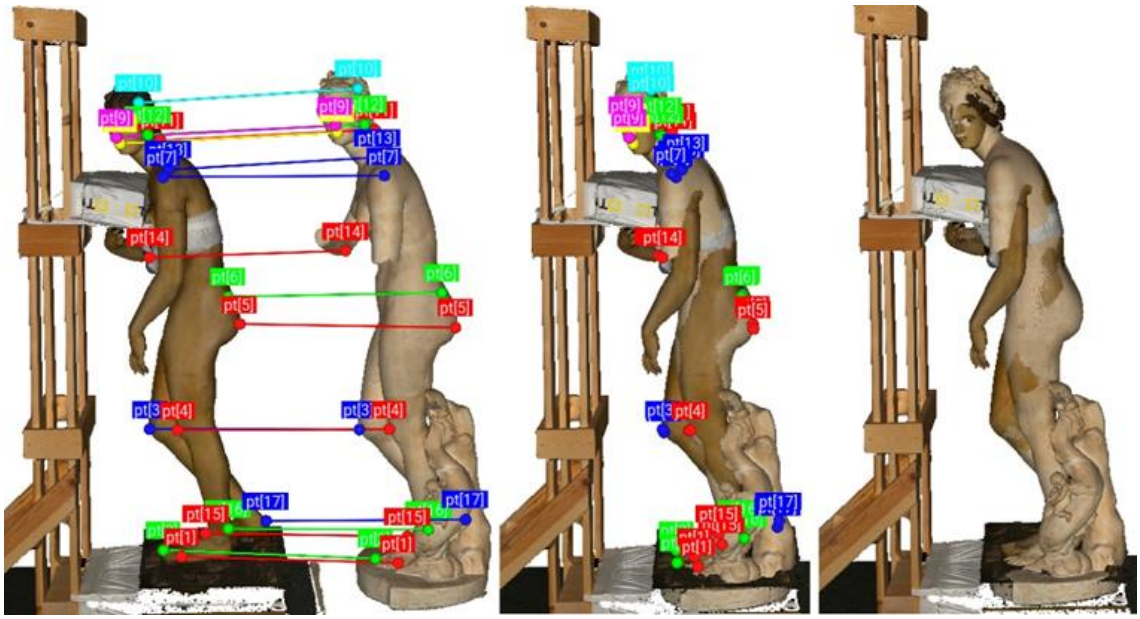


Figura 236. Proceso de alineado de las obras. © Emanuel Sterp Moga, Óscar Hernández-Muñoz y Alicia Sánchez Ortiz.

Dado el elevado grado de coincidencia en áreas comunes de una escultura y otra, se procedió a superponer las mallas haciendo coincidir la parte de la cabeza (figura 237). Mientras la cabeza se encontraba perfectamente alineada, todas las demás zonas del cuello, hombros y piernas se vieron desproporcionadas, impidiendo encajar las partes restantes. Los pies y tobillos poseen una orientación diferente, así como los glúteos y las regiones posteriores de los muslos que también se vieron descompensados.

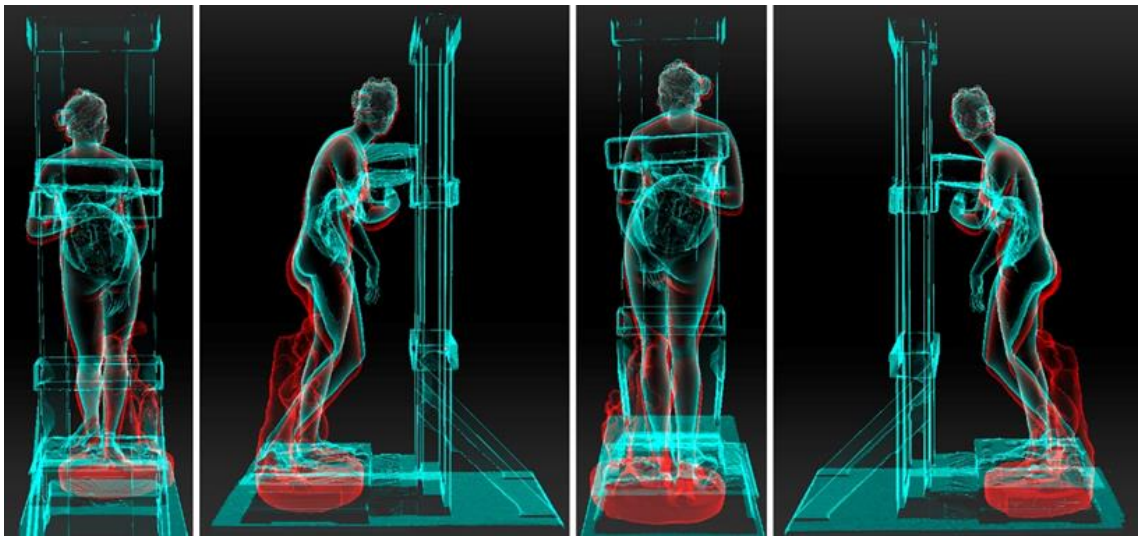


Figura 237. Alineado de las obras con la parte coincidente de la cabeza. Rojo Venus RABASF, Turquesa Venus de cera (Ver modelo 3D). Visión X-Ray. © Emanuel Sterp Moga, Óscar Hernández-Muñoz y Alicia Sánchez Ortiz.

Del mismo modo, se alinearon los modelos con la zona coincidente de las piernas (figura 238), viéndose desplazadas las partes de los hombros, cuello y cabeza. Las áreas anatómicas que coincidieron con bastante exactitud fueron la cadera, los miembros inferiores y las regiones torácicas, aunque estas últimas se encuentran algo más inclinadas hacia delante en la escultura de cera.

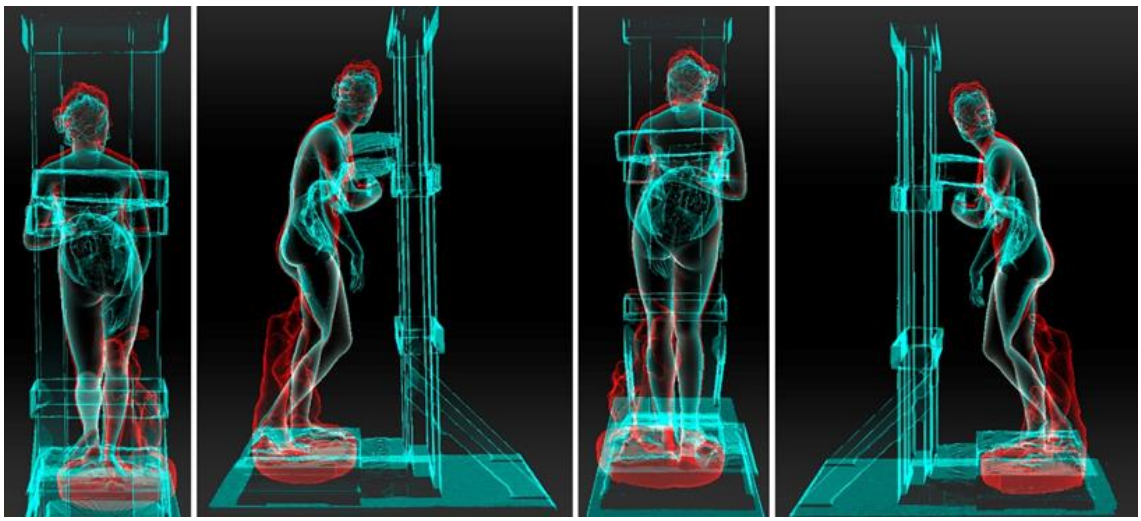


Figura 238. Alineado de las obras con las partes coincidentes de las piernas. Rojo Venus RABASF, Turquesa Venus de cera (Ver modelo 3D). Visión X-Ray. © Emanuel Sterp Moga, Óscar Hernández-Muñoz y Alicia Sánchez Ortiz.

Con el fin de hallar las diferencias dimensionales con mayor exactitud, se recurrió a diversas mediciones lineales (figura 239) y geodésicas (figura 240). En el caso de las mediciones lineales, los puntos establecidos para trazar la línea de medición se ubicaron con precisión en ambas esculturas, habiendo un rango de error máximo de hasta un milímetro (tabla 17). En cuanto a las mediciones geodésicas, debido a que las líneas determinadas adoptan la trayectoria más corta entre los vértices establecidos de la malla, cuanta mayor similitud haya entre las mallas (polígonos y vértices) mayor exactitud y similitud se logra en la trayectoria de la medición. Debido a pequeñas irregularidades en ambos modelos, las mediciones realizadas presentaron un rango de

error entre los 2-3 mm aproximadamente. No obstante, pese a los pequeños errores en la trayectoria, los cálculos obtenidos ayudaron a comprender mejor las proporciones de cada área del modelo anatómico en cera (tabla 18).

La Venus de escayola mide 1513 mm de alto y la Venus de cera 1453 mm, con una diferencia de altura de 60 mm entre ambas esculturas, sin contar con la peana. En general, se aprecia cierta disconformidad en la parte de la cabeza, torso y ligeramente en las piernas, siendo la zona del torso la que mayor discrepancia presenta.

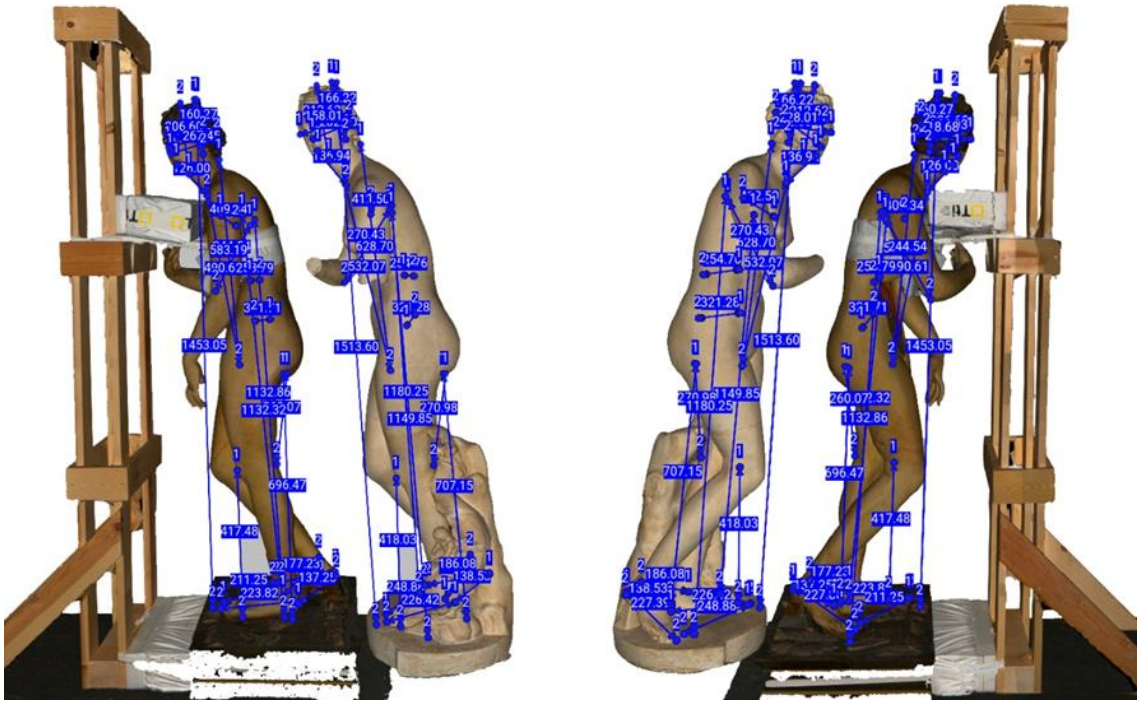


Figura 239. Mediciones lineales de las proporciones de cada obra. © Emanuel Sterp Moga, Óscar Hernández-Muñoz y Alicia Sánchez Ortiz.

Distancia lineal considerada	Venus de cera (mm)	Venus de escayola (mm)	Diferencia (mm)
Altura de la figura	1453	1513	60
Desde el pubis hasta la base	713	718	5
Desde el pubis hasta el manubrio esternal	490	532	41
Desde el pubis hasta la nuca	583	628	45
Desde el manubrio esternal hasta la cabeza	267	282	15
Desde el manubrio esternal hasta el labio inferior	126	136	10
Altura de la cabeza	206	212	6
Altura de la cabeza	144	158	13
Distancia entre hombros	409	412	3
Desde la axila izquierda hasta la peana	1132	1149	0.5
Desde la axila derecha hasta la peana	1132	1180	30
Ancho de cintura	258	254	4
Anchura de la cadera	321	321	0.4
Desde la rodilla izquierda hasta la base	417	418	0.5
Distancia entre los dedos gordos del pie	211	248	37
Longitud del pie derecho	227	227	0.4
Desde la axila hasta el codo derecho	244	270	25

Tabla 17. Medidas lineales comparativas entre las dos esculturas. © Emanuel Sterp Moga, Óscar Hernández-Muñoz y Alicia Sánchez Ortiz.

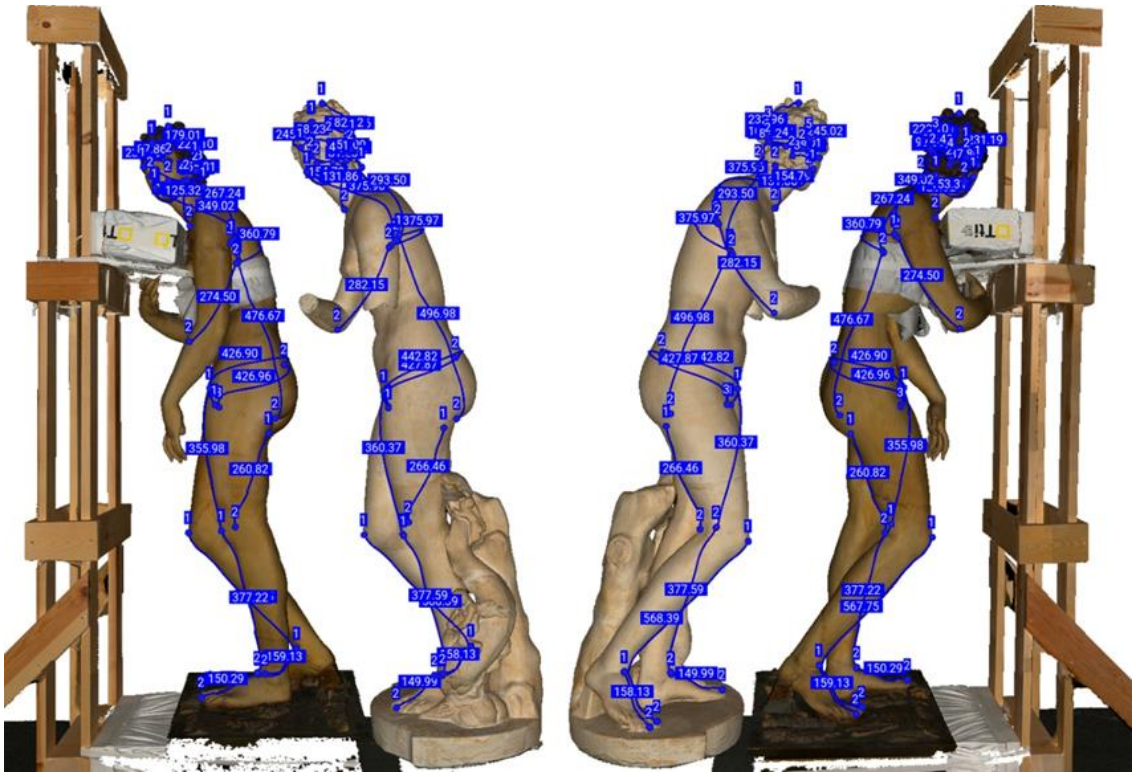


Figura 240. Mediciones geodésicas de las proporciones de cada obra. © Emanuel Sterp Moga.

Distancia geodésica considerada	Venus de cera (mm)	Venus de escayola (mm)	Diferencia (mm)
Desde el pubis hasta la rodilla izquierda	355	360	4
Desde la rodilla izquierda hasta el astrágalo	377	377	0.3
Desde el astrágalo hasta el dedo índice	150	149	0.3
Desde la rodilla derecha hasta el dedo gordo	567	568	0.6
Desde el astrágalo del pie derecho hasta el dedo índice	159	158	1
Desde el pliegue del glúteo derecho hasta la fosa poplítea	260	266	5
Cadera	853	870	16
Desde el pliegue del glúteo izquierdo hasta la axila izquierda	476	496	20
Desde la axila izquierda hasta la derecha	260	275	15
Desde la axila izquierda hasta la nuca	267	293	25
Desde la axila derecha hasta la oreja derecha	360	375	15
Desde la axila derecha hasta el codo derecho	274	282	7
Desde el manubrio hasta la oreja izquierda	125	131	6
Desde la oreja izquierda hasta la derecha	153	154	1
Desde la nuca hasta la cúspide de la cabeza	222	232	10
Desde la punta de la nariz hasta la parte superior de la frente	87	88	1
Desde la comisura externa del ojo derecho hasta la comisura externa del ojo izquierdo	87	88	0.3

Tabla 18. Medidas geodésicas comparativas entre las dos esculturas. © Emanuel Sterp Moga.

Para calcular el área superficial de cada una de las esculturas, se omitieron los elementos ajenos a la figura. En el caso de la Venus de cera, se eliminó la estructura auxiliar, la peana, la mano derecha y parte del brazo izquierdo para que se asemejara a la escultura de escayola. En la Venus de escayola también se eliminó la pena y el refuerzo de la pierna izquierda. Se ajustó con precisión el volumen a calcular en ambas esculturas para obtener referencias reales sobre el volumen del modelo. Los resultados mostraron que la Venus de cera presenta un área superficial de 1383963 mm^2, mientras que la Venus de escayola muestra un área de 1502137 mm^2 (figura 241).

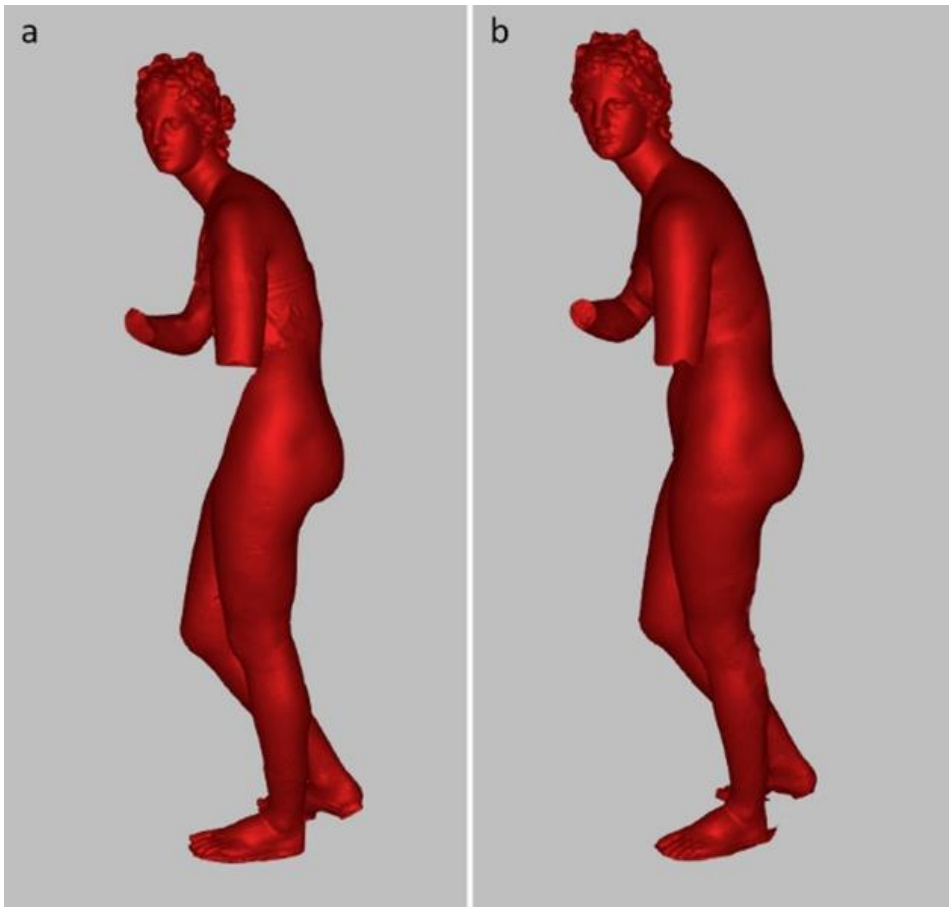


Figura 241. Cálculo del área superficial. a) Venus de cera. b) Venus de escayola. © Emanuel Sterp Moga.

Con el fin de corroborar con mayor exactitud las medidas y proporciones obtenidas, se procedió a examinar la morfología de la superficie mediante los *mapas de distancias*. Los resultados muestran una clara diferencia volumétrica de la Venus de cera respecto a la Venus de escayola, con un rango de error de entre -27 mm hasta 25 mm dependiendo de cada zona (figura 242).

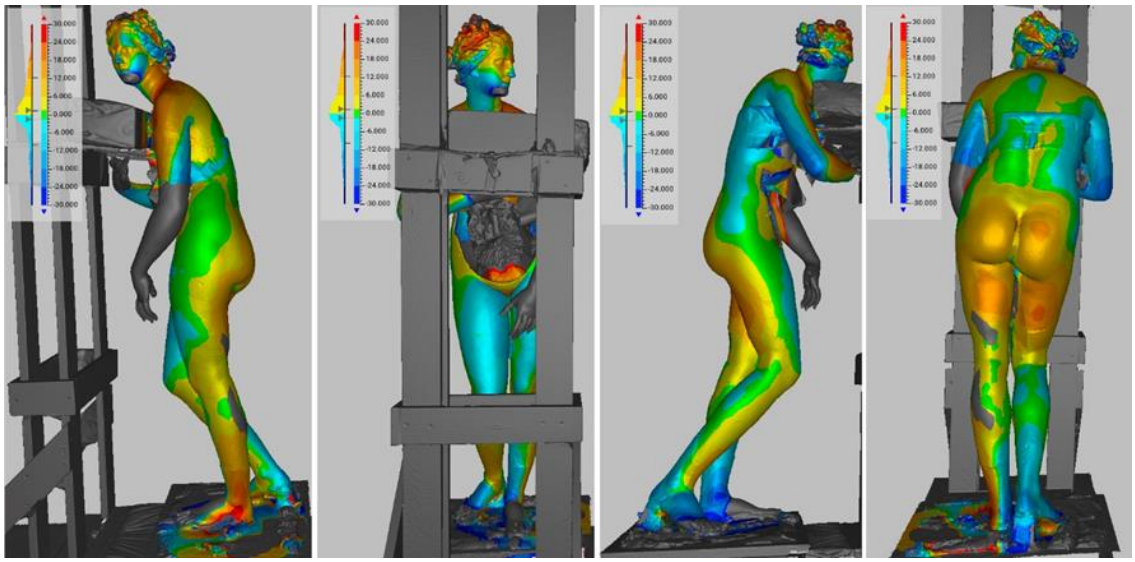


Figura 242. *Mapas de distancias*. Escala de error 30 mm. © Emanuel Sterp Moga, Óscar Hernández-Muñoz y Alicia Sánchez Ortiz.

Un segundo análisis más detallado se centró en examinar las partes semejantes, haciendo coincidir las zonas por separado en cuanto a la cabeza, torso y piernas. Durante la superposición de las cabezas se observaron diferencias dimensionales. La cabeza de la Venus de escayola presenta mayor volumen que la cabeza elaborada con cera (figura 243). Las mediciones lineales y geodésicas establecidas permitieron descubrir las discrepancias que presentan ambos modelos, siendo estas de aproximadamente de 12 mm (figura 244). Para hallar este dato con mayor exactitud, se calculó el área superficial de cada escultura. La cabeza de la Venus de cera presenta 187833 mm^2, mientras que la Venus de escayola tiene 197183 mm^2 (figura 245). Con ello, se pudo determinar la diferencia dimensional que posee la Venus de cera.

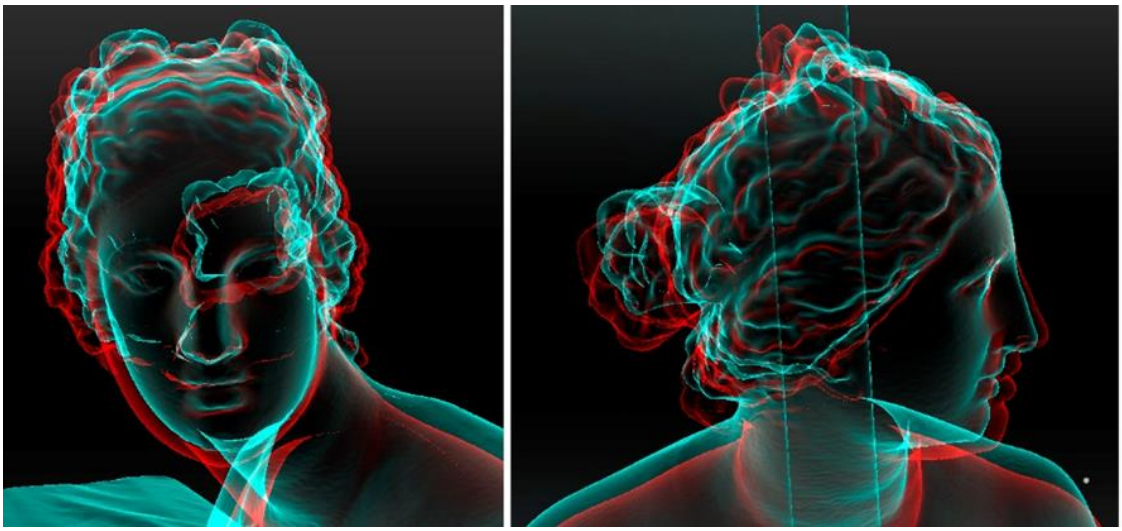


Figura 243. Detalle de alineado de la cabeza. Rojo Venus RABASF, Turquesa Venus de cera. Visión X-Ray. © Emanuel Sterp Moga.

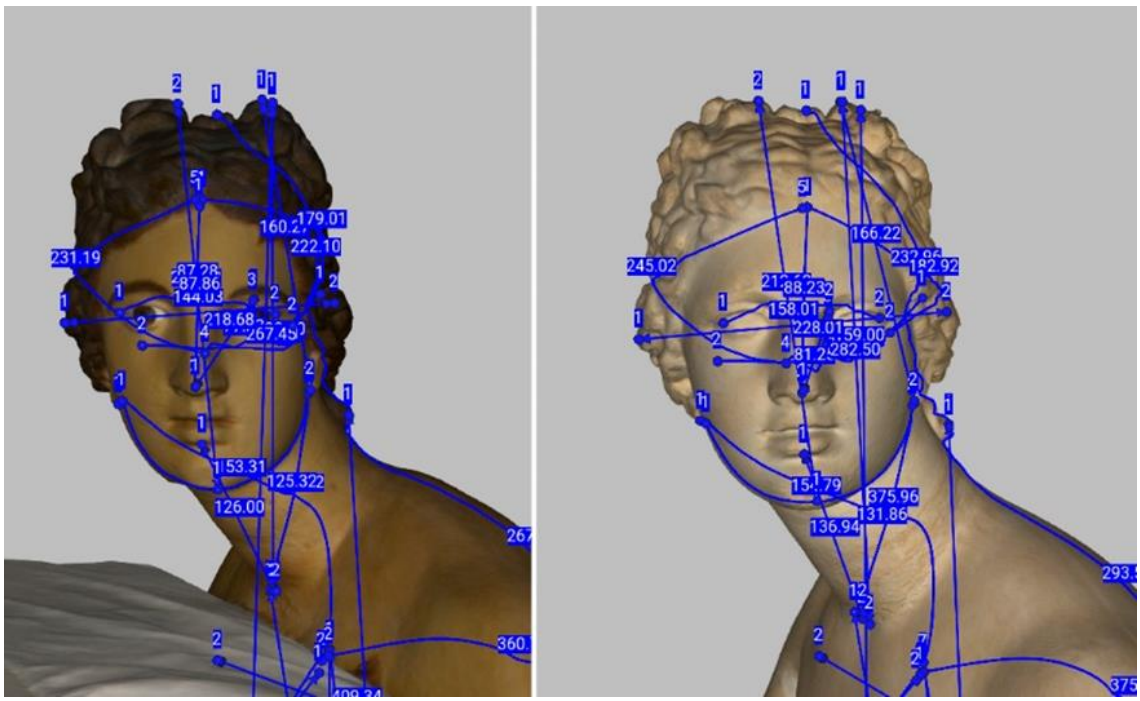


Figura 244. Mediciones lineales y geodésicas de la cabeza. © Emanuel Sterp Moga.

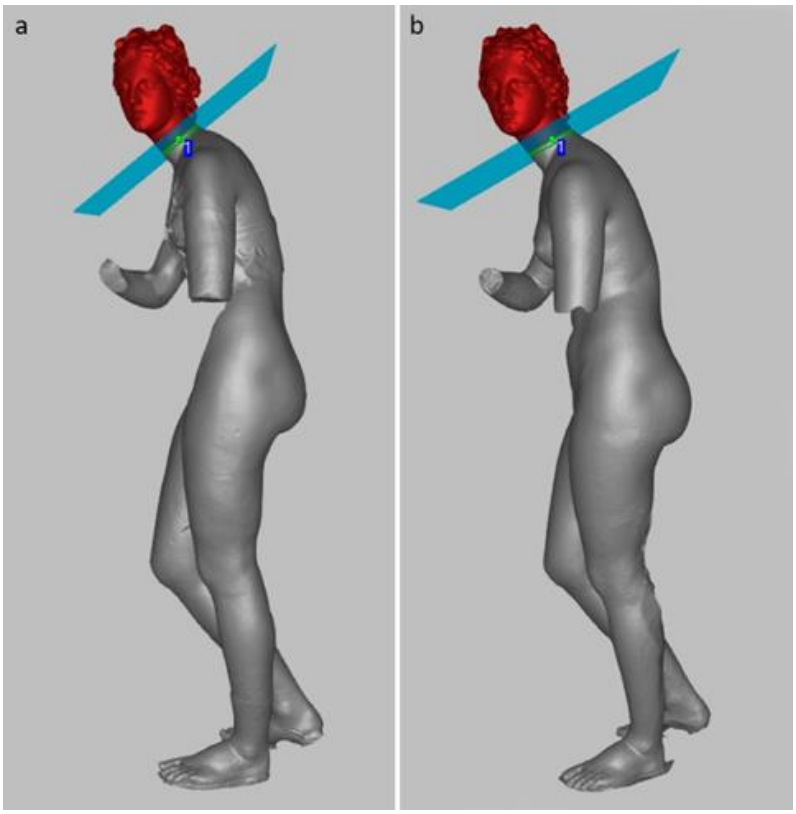


Figura 245. Cálculo del área superficial. a) Venus de cera. b) Venus de escayola. © Emanuel Sterp Moga.

Los *mapas de distancias*, establecidos con un rango máximo de 30 mm, mostraron un error que oscila entre -3 mm hasta 9 mm, prácticamente sobre toda la superficie de la cabeza (figuras 246 y 247). En zonas muy puntuales, pertenecientes a los rizos del pelo, se hallaron diferencias entre -16 y 22 mm. En esos puntos, se observaron desviaciones de 38 mm.

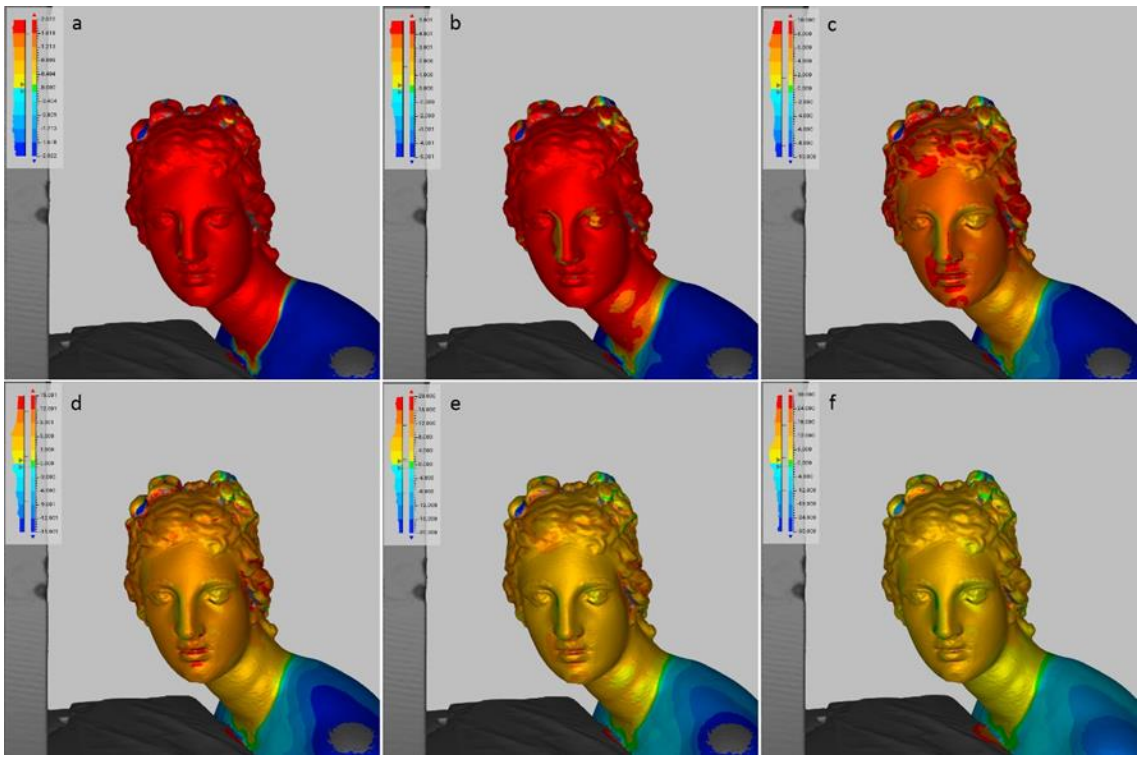


Figura 246. Escala de error a) 2 mm. b) 5 mm. c) 10 mm. d) 15 mm. e) 20 mm. f) 30 mm. © Emanuel Sterp Moga.

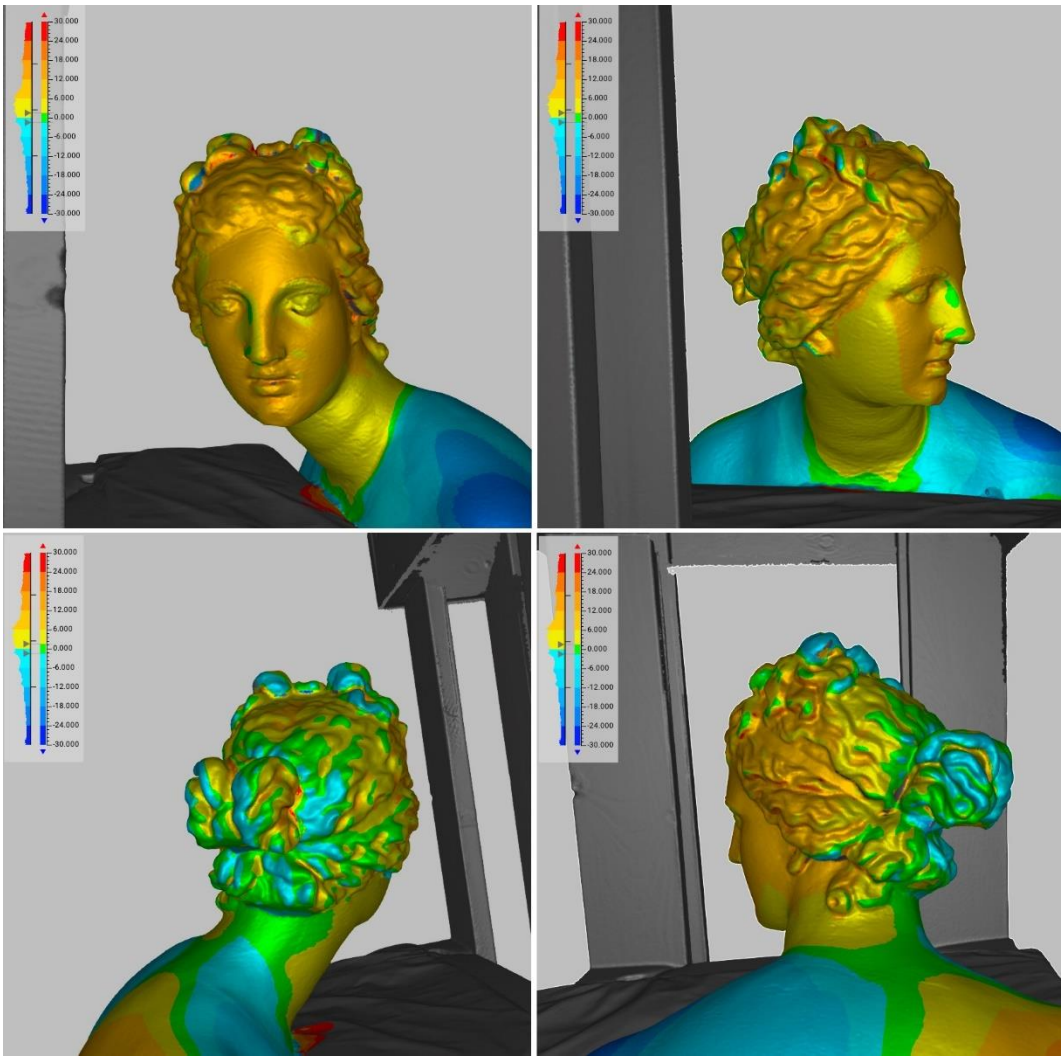


Figura 247. *Mapas de distancias*. Escala de error 30 mm. © Emanuel Sterp Moga.

Siguiendo con la parte del torso y como se observó en las mediciones iniciales, la Venus de cera presenta importantes discrepancias volumétricas con respecto a la Venus de escayola. La parte más llamativa se localiza en la zona anatómica de los hombros y trapecios (figura 248). Las mediciones lineales en la Venus de cera, partiendo desde la nuca y llegando hasta los genitales, muestran una diferencia de 45 mm menos que el de la Venus de escayola. Dichas medidas se contrastaron con las mediciones geodésicas. La primera de ellas está comprendida desde la nuca hasta la axila izquierda, mostrando una diferencia de 25 mm menos en la Venus de cera. La segunda medida que va desde la axila izquierda hasta el glúteo presenta una diferencia de 20 mm respecto a la Venus de escayola. Otra medida correspondiente a la cadera muestra 16 mm menos que el modelo de escayola (figura 249 a).

Por otro lado, también se apreció que las dos axilas de la Venus de cera están colocadas a la misma altura, mientras que en la Venus de escayola la axila derecha está más elevada con respecto a la izquierda con 30 mm (figura 249 b). A consecuencia de ello, también se vio modificada la dirección de los brazos en la escultura de cera. Se observó que tanto la forma como las dimensiones del tórax y la pelvis por separado poseen una gran coincidencia, destacando una importante pérdida de altura en la región abdominal.



Figura 248. Detalle de alineado del torso. Rojo Venus RABASF, Turquesa Venus de cera. Visión X-Ray. © Emanuel Sterp Moga.



Figura 249. a) Mediciones lineales y geodésicas del torso. b) Mediciones lineales de la altura de las axilas. © Emanuel Sterp Moga.

Respecto a los cálculos del área superficial, en el caso de la Venus de cera fue de 667413 mm^2, mientras que en la Venus de escayola fue de 752231 mm^2 (figura 250). Los resultados corroboran

las diversas mediciones lineales y geodésicas analizadas, dejando patente la clara diferencia dimensional entre las dos esculturas.

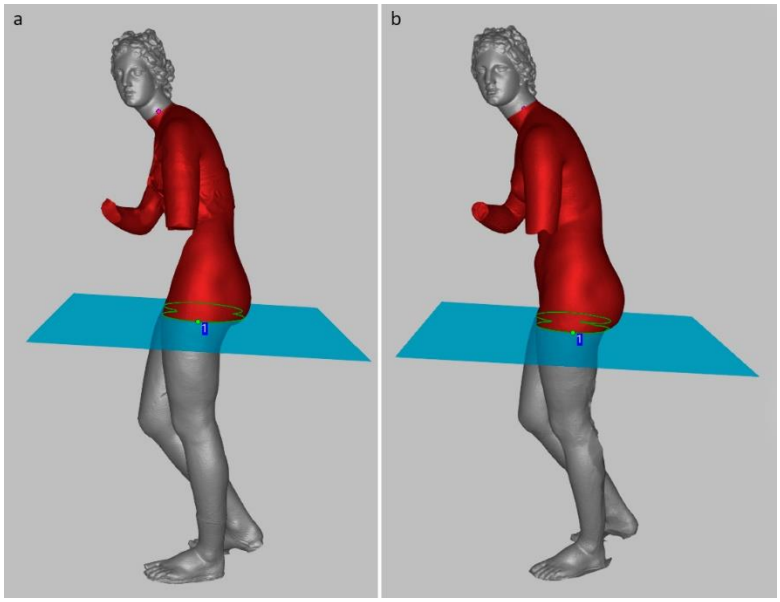


Figura 250. Cálculo del área superficial. a) Venus de cera. b) Venus de escayola. © Emanuel Sterp Moga.

Con el fin de determinar con mayor precisión la diferencia dimensional, se realizaron cálculos a través de los *mapas de distancias*. La parte central de la espalda y la cadera muestran rangos de error de entre -8 mm hasta 8 mm (figuras 251 y 252). Sin embargo, en la zona de los trapecios se hallaron discrepancias de entre -15 mm hasta 29 mm, con una diferencia de 44 mm.

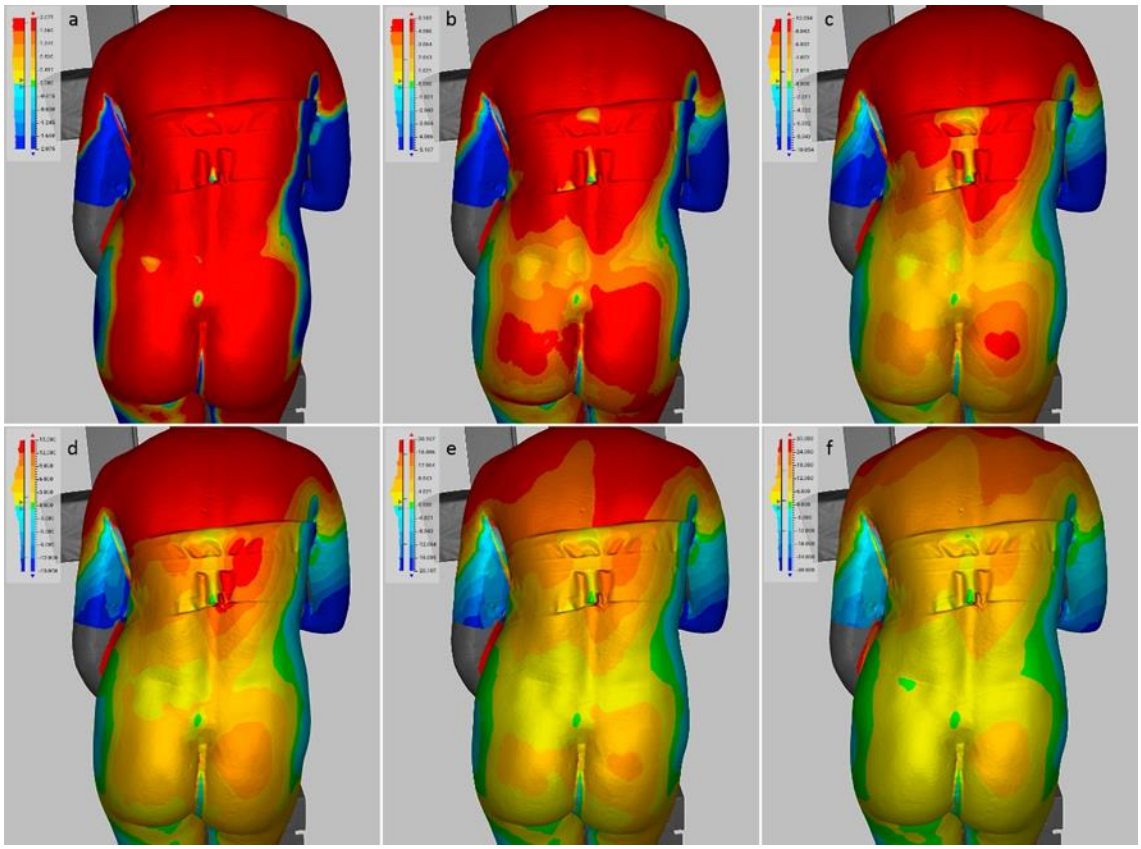


Figura 251. Escala de error a) 2 mm. b) 5 mm. c) 10 mm. d) 15 mm. e) 20 mm. f) 30 mm. © Emanuel Sterp Moga.

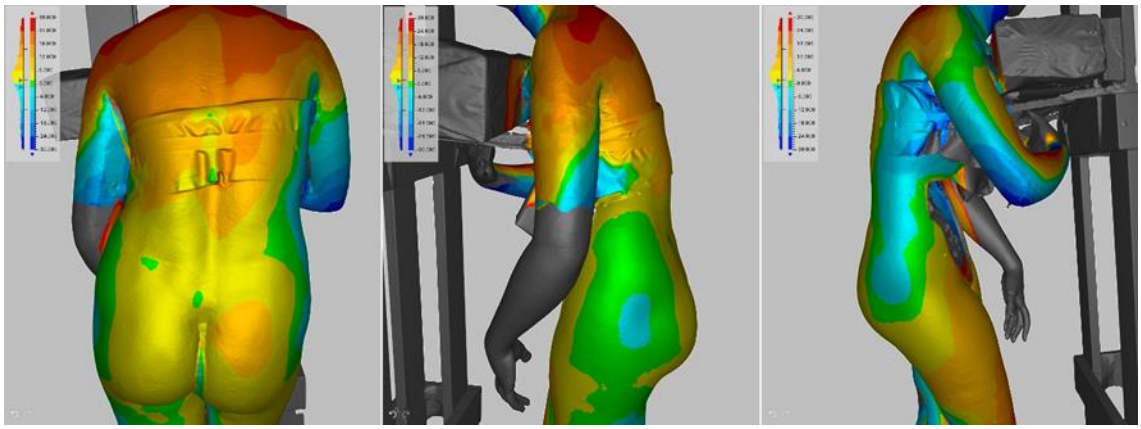


Figura 252. *Mapas de distancias*. Escala de error 30 mm. © Emanuel Sterp Moga.

La discrepancia hallada en el torso de la Venus de escayola, con 44 mm de más, se eliminó en la parte abdominal para poder comparar la diferencia dimensional si tuviera unas medidas similares a las ofrecidas por la Venus de cera. Los *mapas de distancias* revelaron rangos de errores muy bajos entre -2 hasta 6 mm (figura 253). Ello está indicando las dimensiones inferiores que presenta la parte del abdomen en la Venus de cera y el alto grado de coincidencia en el conjunto del torso.

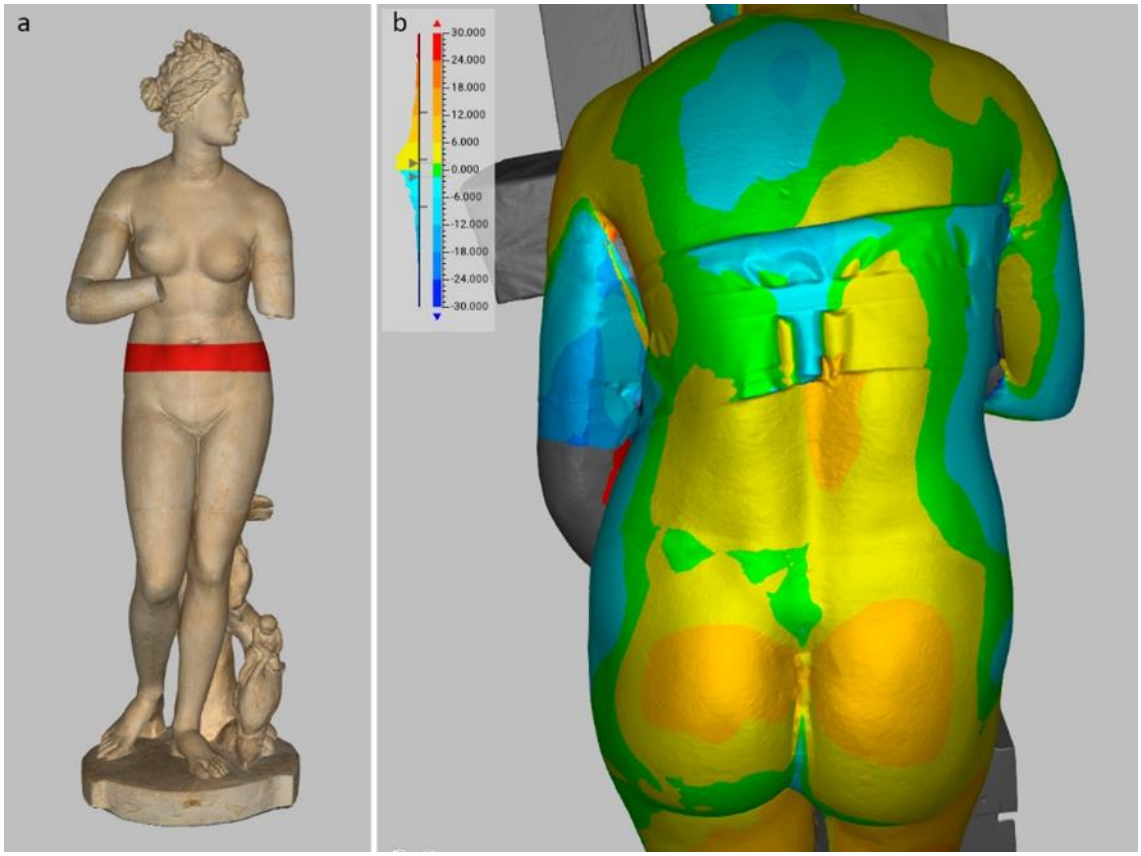


Figura 253. a) Sección del abdomen eliminada. b) *Mapas de distancias* con el torso adaptado de la Venus de escayola a las medidas de la Venus de cera. Escala de error 30 mm. © Emanuel Sterp Moga.

Para finalizar el análisis, se observó que en las partes correspondientes a las piernas no había diferencias dimensionales importantes, salvo en la zona de los muslos cercanos al torso (figura 254). Las diversas mediciones lineales y geodésicas mostraron pequeñas diferencias entre 5-10

mm menos en el caso de la Venus de cera (figura 255). Los cálculos del área superficial en el caso del modelo anatómico presentan 528715 mm^2, mientras que en el de escayola, el resultado es bastante similar 552723 mm^2 (figura 256).

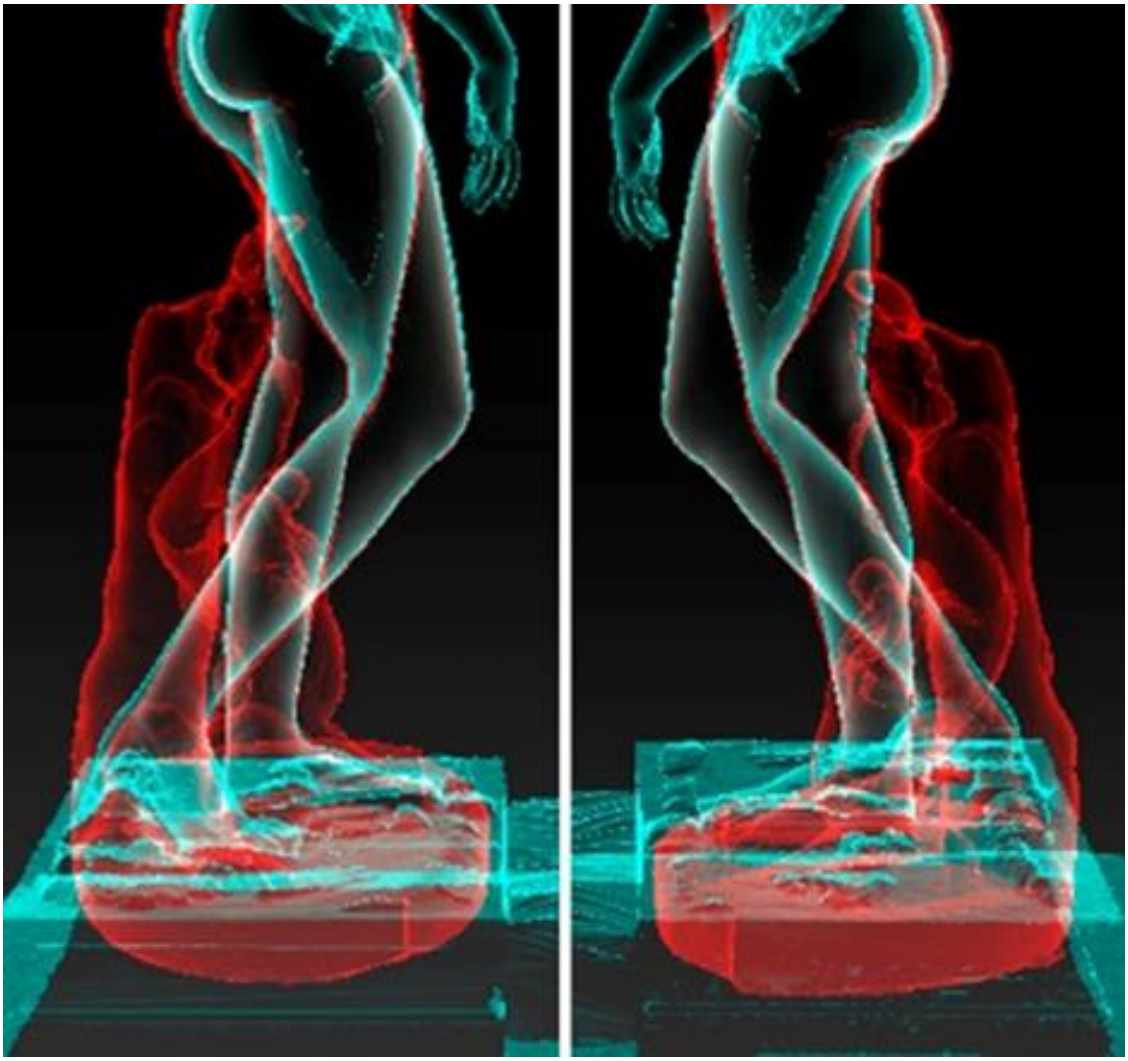


Figura 254. Detalle de alineado de las piernas. Rojo Venus RABASF, Turquesa Venus de cera. Visión X-Ray. © Emanuel Sterp Moga.

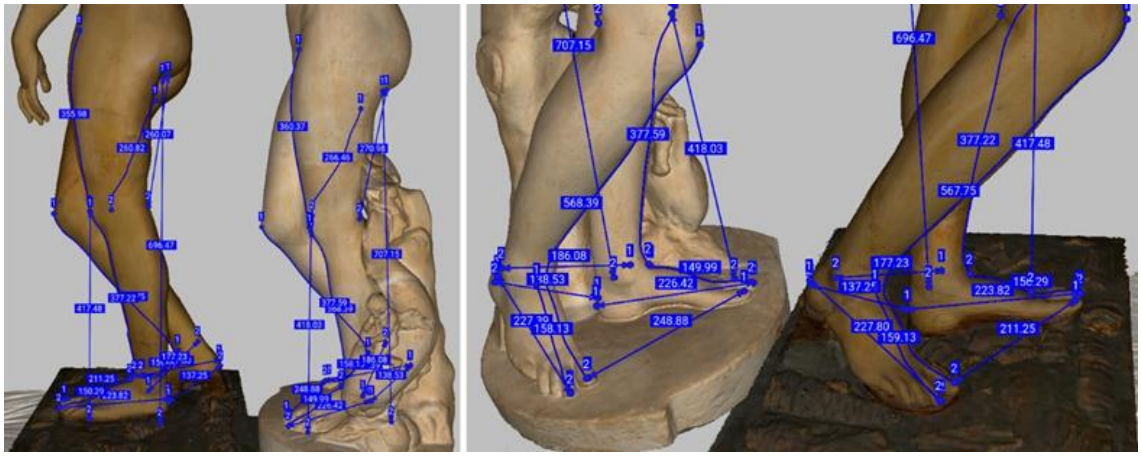


Figura 255. Mediciones lineales y geodésicas de las piernas. © Emanuel Sterp Moga.

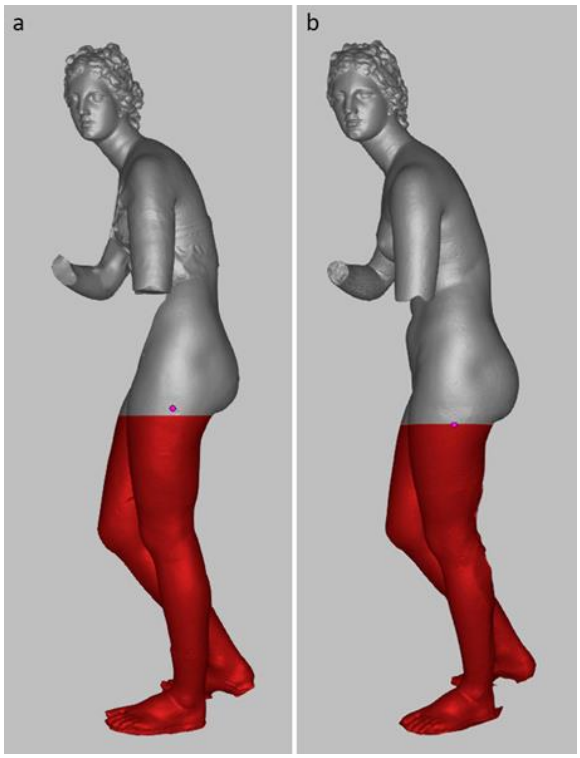


Figura 256. Cálculo del área superficial. a) Venus de cera. b) Venus de escayola. © Emanuel Sterp Moga.

La morfología que incluye la pelvis, muslos y piernas presentan una clara coincidencia (figura 257 a), incluso los pies si se ubican por separado (figura 257 b y c). Sin embargo, el pie izquierdo de la Venus de cera que soporta todo el peso de la escultura está desplazado 37 mm más a la derecha (figura 258). Respecto al pie derecho, también se encuentra ligeramente más inclinado.

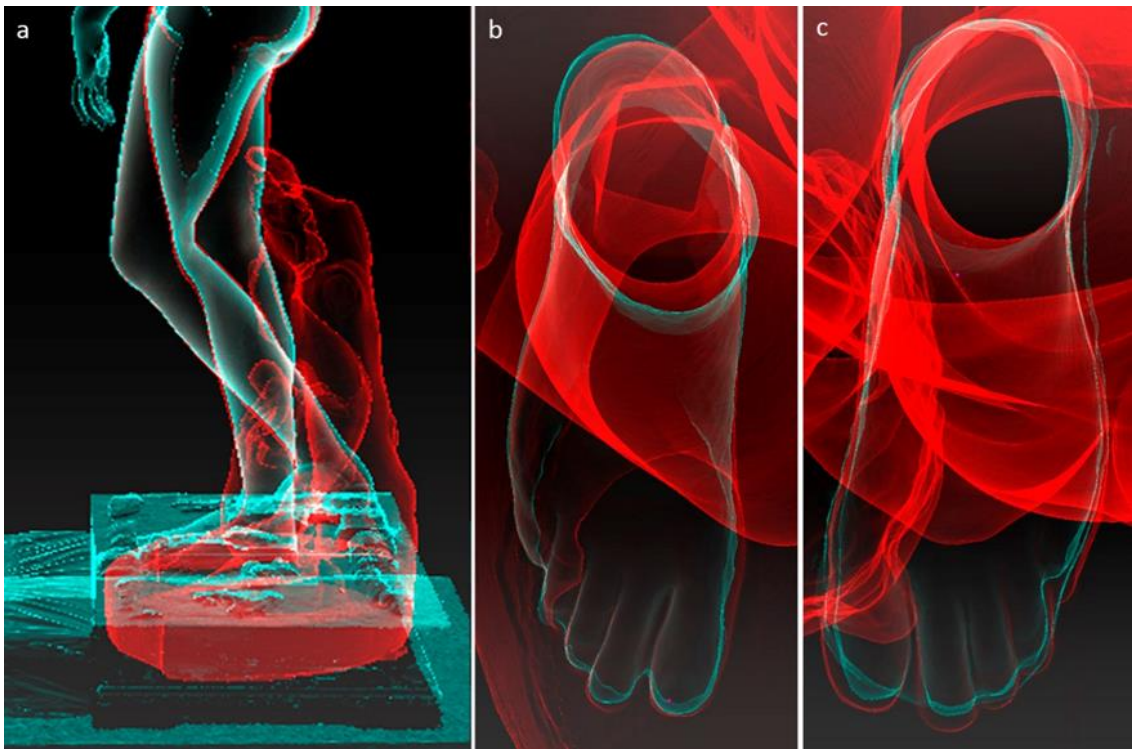


Figura 257. a) Coincidencia de los muslos y piernas. b) Superposición del pie derecho. c) Superposición del pie izquierdo. Visión X-Ray. © Emanuel Sterp Moga, Óscar Hernández-Muñoz y Alicia Sánchez Ortiz.

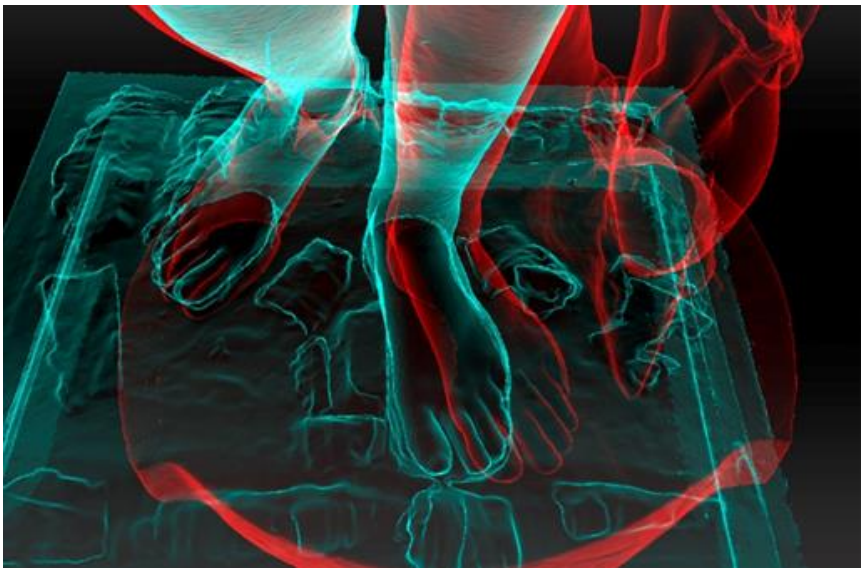


Figura 258. Detalle de alineado de las piernas con el desplazamiento del pie izquierdo. Rojo Venus RABASF, Turquesa Venus de cera. Visión X-Ray. © Emanuel Sterp Moga, Óscar Hernández-Muñoz y Alicia Sánchez Ortiz.

Por último, en relación con los *mapas de distancias* correspondiente a la zona de las piernas, en general, se lograron rangos de error muy bajos que oscilan entre -6 mm hasta 8 mm (figuras 259 y 260).

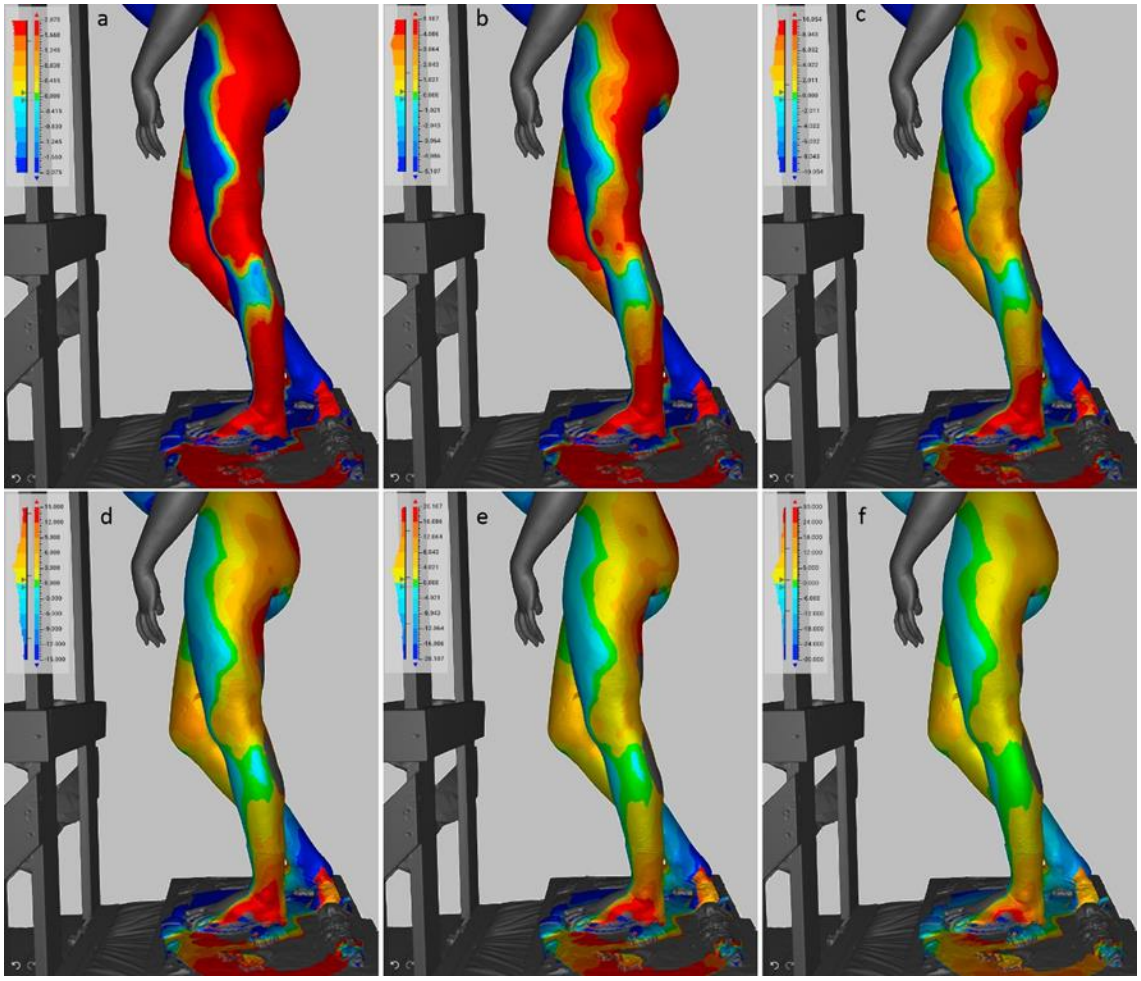


Figura 259. Escala de error a) 2 mm. b) 5 mm. c) 10 mm. d) 15 mm. e) 20 mm. f) 30 mm. © Emanuel Sterp Moga.

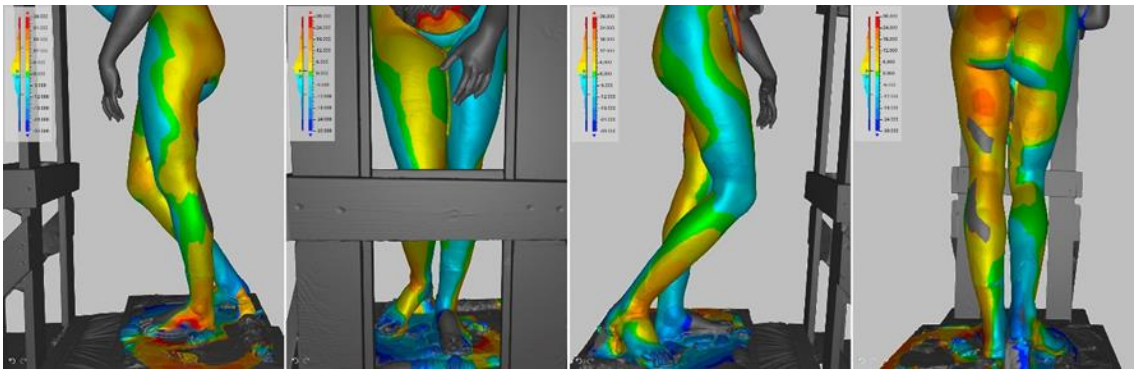


Figura 260. *Mapas de distancias*. Escala de error 30 mm. © Emanuel Sterp Moga.

6.1.2.3. Análisis del estado de conservación y técnica constructiva

Durante la superposición de la Venus de cera con la Venus de escayola, haciendo coincidir las partes de los pies con el fin de analizar la desviación, se detectó una mínima inclinación hacia delante del modelo anatómico. Desde la altura de las rodillas hasta el cuello, la figura anatómica de cera presenta una desviación hacia el lado derecho con un ángulo de 2. 19º desde la vertical hasta la línea formada entre el manubrio del esternón y el centro del talón de la pierna de apoyo (figura 261). Las mediciones a través de los *mapas de distancias* concluyeron que la Venus de cera presenta un desplazamiento hacia el lado derecho de 82 mm (figura 262).

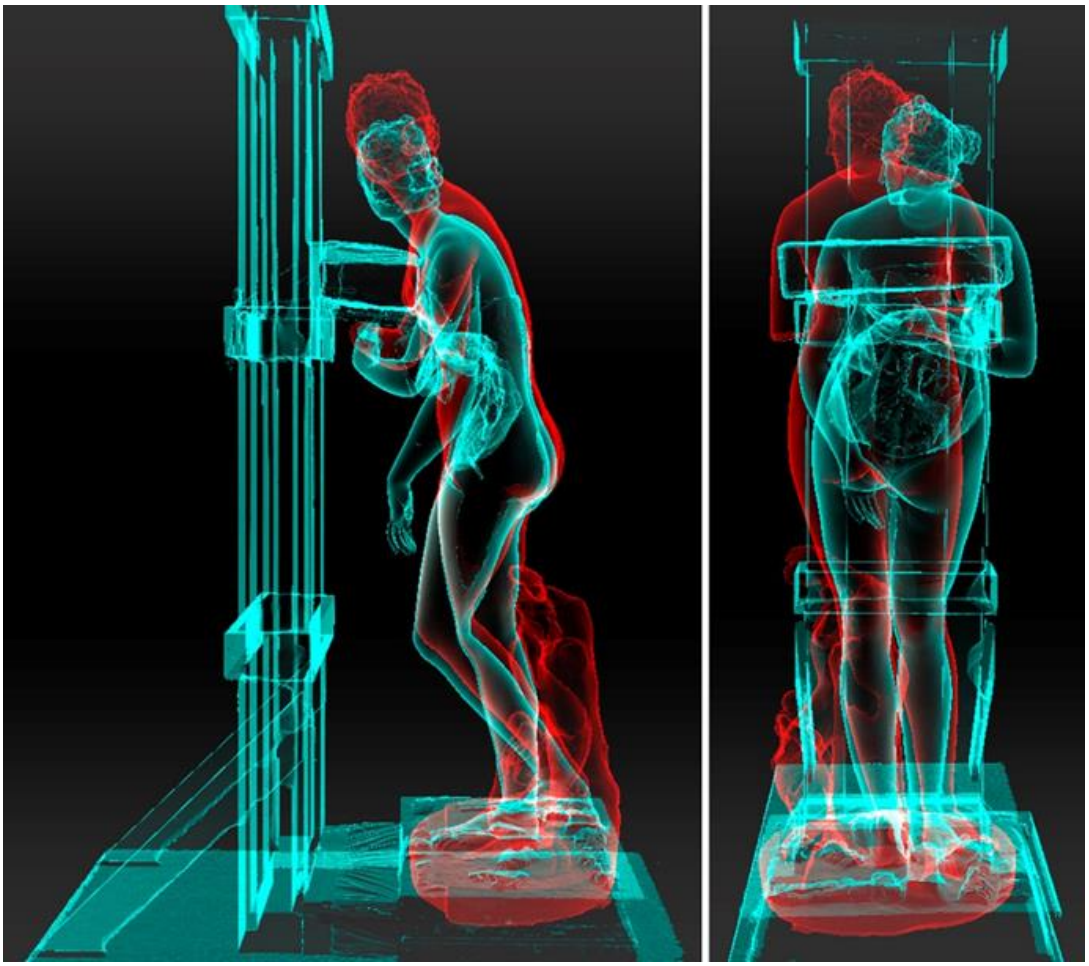


Figura 261. Vencimiento de la escultura de cera. Rojo Venus RABASF, Turquesa Venus de cera (Ver modelo 3D). Visión X-Ray. © Emanuel Sterp Moga, Óscar Hernández-Muñoz y Alicia Sánchez Ortiz.

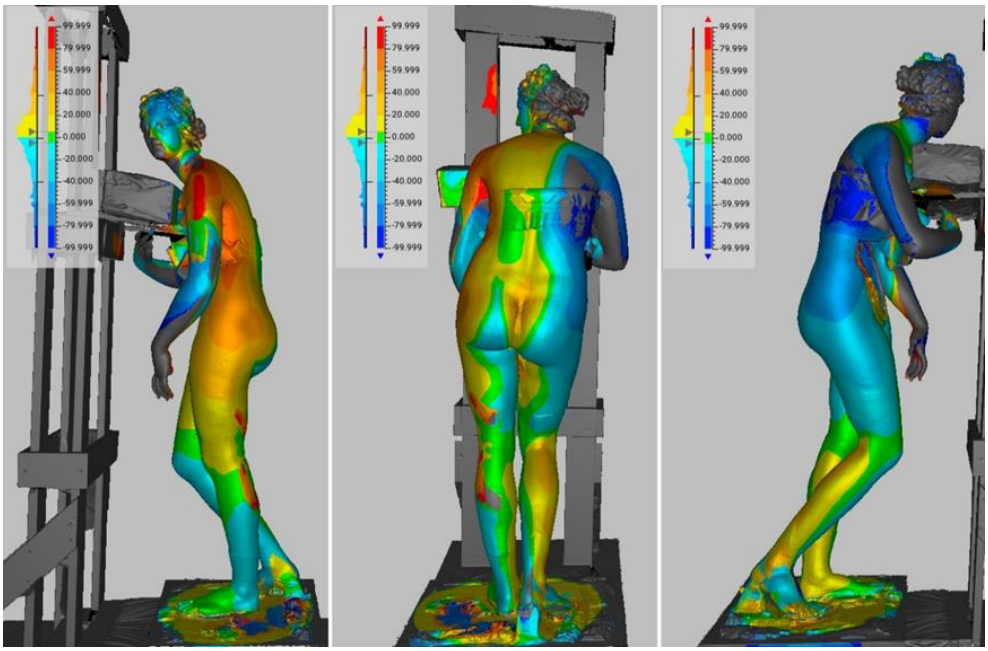


Figura 262. *Mapas de distancias*. Escala de error 100 mm. © Emanuel Sterp Moga, Óscar Hernández-Muñoz y Alicia Sánchez Ortiz.

Desde la parte de las piernas hasta la altura de las rodillas apenas ofreció desviaciones (figura 263 a). Sin embargo, en la altura de los muslos inferiores, se apreció una desviación de 16 mm (figura 263 b) y de 35 mm en la ubicación de los muslos superiores (figura 263 c). En la región de la pelvis se calculó una desviación de 53 mm (figura 263 d) y en la zona del costado 71 mm (figura 263 e). Por último, el brazo derecho presentó una desviación de 82 mm (figura 263 f).

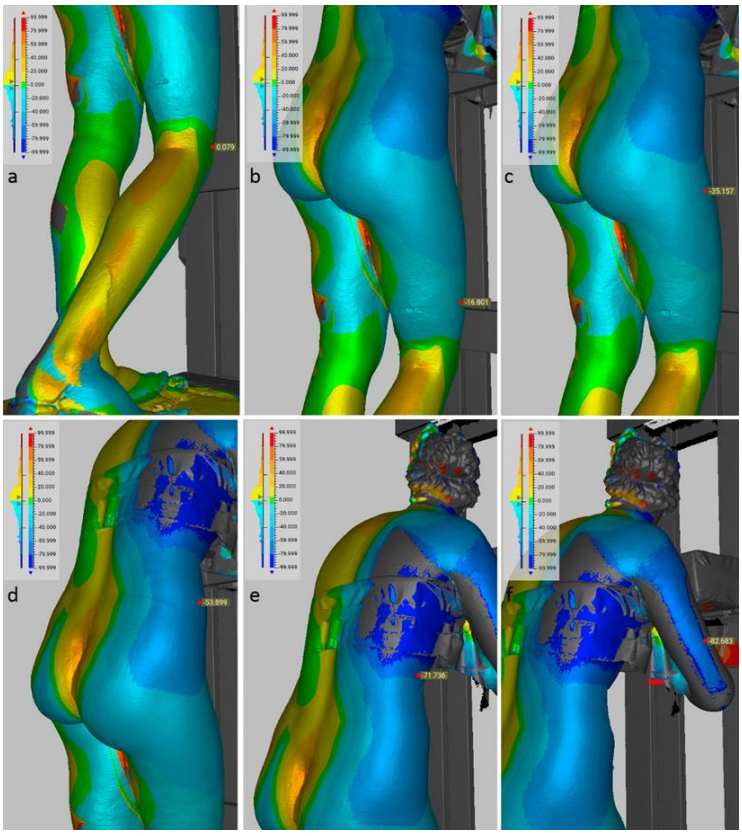


Figura 263. *Mapas de distancias*. Escala de error 100 mm. Medición puntual. © Emanuel Sterp Moga.

Un aspecto clave para dotar de estabilidad estructural a la escultura, del que se prescindió a la hora de la construcción del modelo anatómico, es el elemento del delfín que acompaña a la figura principal. Tanto en el modelo clásico original como en las múltiples copias y reproducciones de la Venus de Medici, se observa que siempre el escultor tuvo la precaución de colocar un elemento de refuerzo para distribuir los diferentes pesos y, con ello, garantizar el equilibrio al conjunto de la obra.

Es posible que por carecer de formación escultórica o quizá al estar hueco en la parte correspondiente al abdomen, no precisaría de puntos de apoyo auxiliares, Lacaba optase por eliminar este elemento secundario y centrar toda su atención en la representación de la anatomía de la mujer. A la altura del bíceps femoral izquierdo, donde estaría ubicado el delfín, se ha observado una huella impresa en la materia cérea que pudo producirse durante el proceso de elaboración de las piezas con ayuda de los moldes (figuras 264 y 265). Es posible que durante el proceso de separación de la base para poder realizar los moldes correctamente, la zona del muslo se viese algo alterada por el contacto de la base. Ello indica que los moldes efectuados sobre la parte del muslo registraron dicha imperfección, que quizá fuera tratada para ser disimulada en el conjunto.

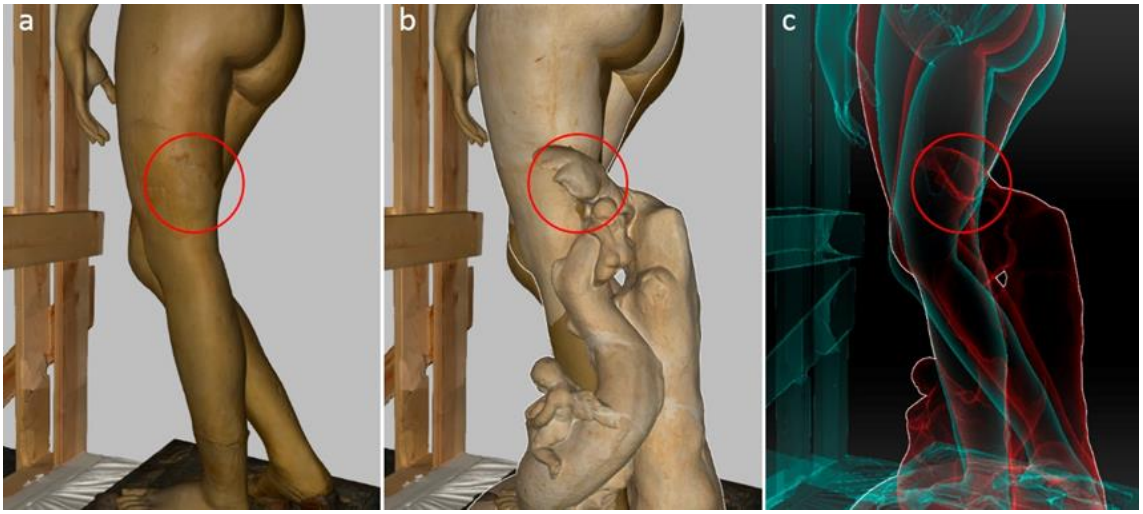


Figura 264. a) Venus de cera, zona del muslo. b) Superposición del soporte lateral de la Venus RABASF. c) Visión X-Ray en la zona coincidente del muslo de ambas figuras. © Emanuel Sterp Moga, Óscar Hernández-Muñoz y Alicia Sánchez Ortiz.

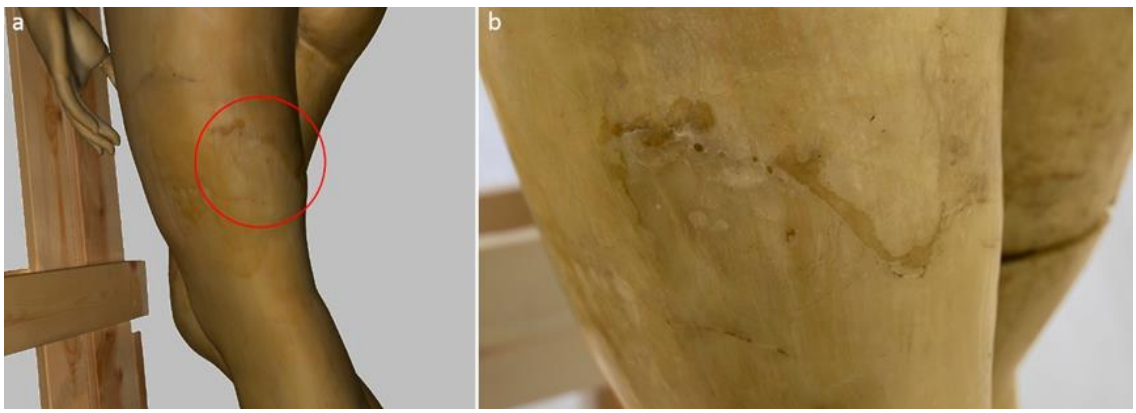


Figura 265. a) Venus de cera, zona del muslo. b) Fotografía de detalle de la zona del muslo. © Emanuel Sterp Moga, Óscar Hernández-Muñoz y Alicia Sánchez Ortiz.

Con el objetivo de comprender cuáles han sido las causas concretas que han generado la formación de las diversas grietas presentes en la escultura de cera, se procedió a realizar análisis minuciosos de las mallas en cada una de las esculturas analizadas. Se detectaron ciertas líneas producidas por la unión de algunas piezas que conforman el molde durante el proceso de vaciado (figuras 266 y 267). En el caso de la Venus de escayola, el propio material en muchas ocasiones resulta complejo disimularlas por completo, por ello, dichas juntas terminaron siendo más llamativas en comparación con la Venus de cera.

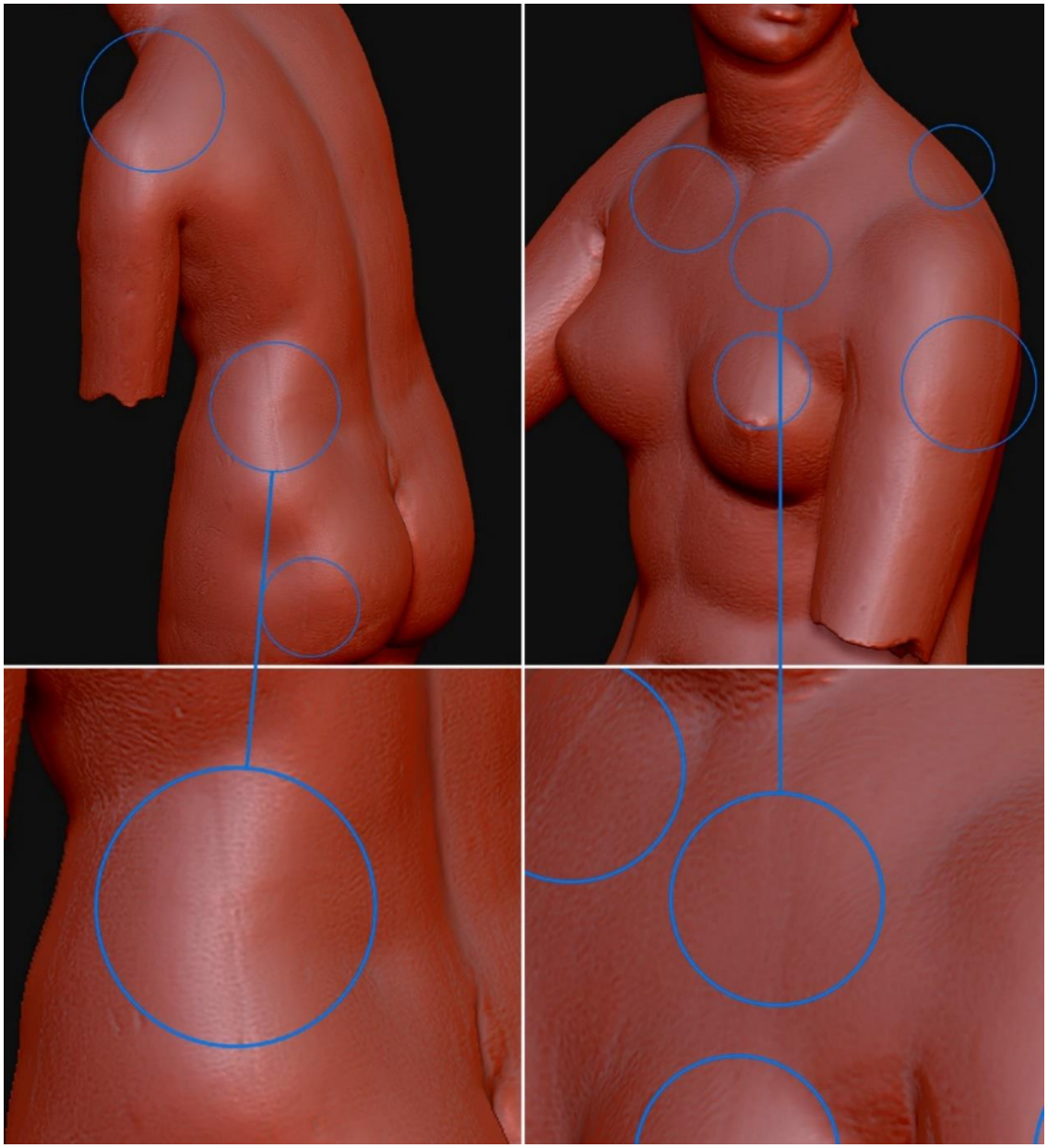


Figura 266. Detalles de las juntas que se conservan en la Venus de escayola RABASF. © Emanuel Sterp Moga.



Figura 267. a) Malla sólida de la Venus de escayola RABASF. b) Juntas que se conservan en la escultura. © Emanuel Sterp Moga.

De las juntas halladas en la Venus de escayola, se identificaron algunas sutilmente en la Venus de cera, en concreto, en las partes que están ubicadas en la zona de los trapecios hacia el hombro izquierdo (figura 268) y los muslos. La dificultad de identificar estos elementos en la escultura de cera radica en el propio material, ya que durante el proceso de creación presenta una gran maleabilidad y, por tanto, la facilidad de disimularlas es enorme.

La grieta ubicada en la parte de los trapecios coincide con las juntas de unión de la cabeza y el hombro. Debido a una inadecuada unión, la zona se vio más susceptible de agrietarse. Se observa que en intervenciones anteriores trataron de frenar reforzando dicha problemática añadiendo una nueva pasta de cera.

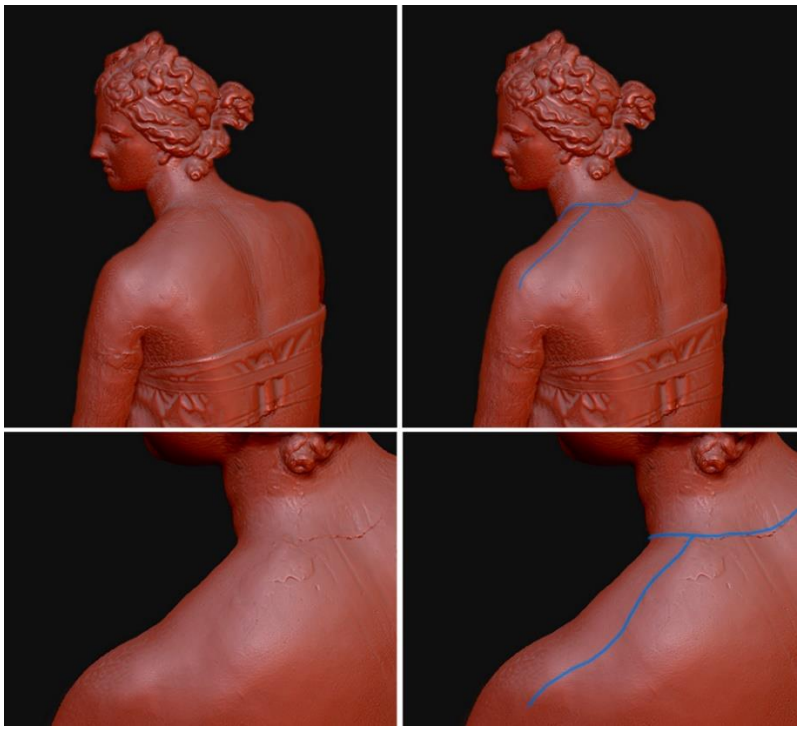


Figura 268. Detalles de las juntas halladas en la Venus de cera. © Emanuel Sterp Moga.

6.1.3. Seguimiento de las alteraciones estructurales

Para realizar el seguimiento de las alteraciones estructurales, se aprovechó la densa malla escaneada de altísima resolución de 0.1 mm. Estas partes están superpuestas sobre la malla general obtenida con Arte Eva, pero, en este caso, se recurrió únicamente a los fragmentos de la malla con la resolución de 0.1, ya que presenta mayor precisión y calidad en los detalles. Respecto a la reducción de la malla para poder hacer todas las mediciones necesarias, sobre todo las geodésicas, se redujeron solo las áreas escaneadas mediante Artec Space Spider correspondientes a las fracturas, grietas y fisuras a 5 millones de polígonos, sin perder con ello prácticamente nada de la calidad. Múltiples cálculos geodésicos y lineales permitieron medir y determinar el alcance en cuanto a la extensión de cada una de ellas, estableciendo una distancia entre punto y punto de 2 a 5 mm (figuras 269, 270, 271 y 272).

A partir del año 2019, se ha procedido a obtener mediciones anuales orientadas a registrar el comportamiento de estos deterioros para valorar, con ello, su evolución en el tiempo (figura 273). El procesado de los modelos virtuales obtenidos se llevó a cabo de manera idéntica a la descrita, es decir, se estableció un mismo número de polígonos para cada uno de ellos. Este factor resultó determinante para que las mediciones geodésicas trazaran una trayectoria prácticamente idéntica sobre la malla en todos los casos. Asimismo, durante dichas mediciones se establecieron los mismos números de puntos y ubicaciones. Por último y para lograr una mayor precisión, se superpuso el primer modelo obtenido que sirvió como referencia.

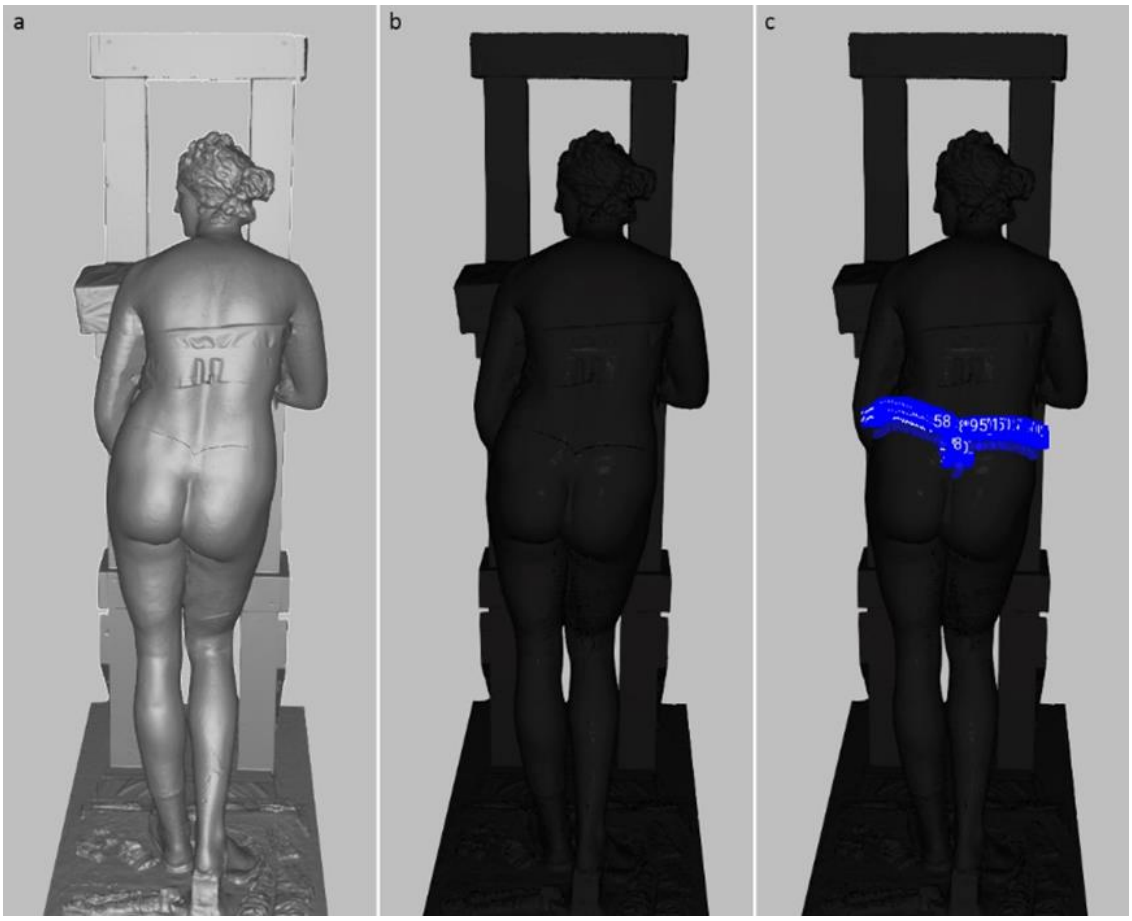


Figura 269. a) Malla sólida de la escultura. b) Alambre de la malla. c) Medición geodésica de la fractura sobre el alambre de la malla. © Emanuel Sterp Moga.

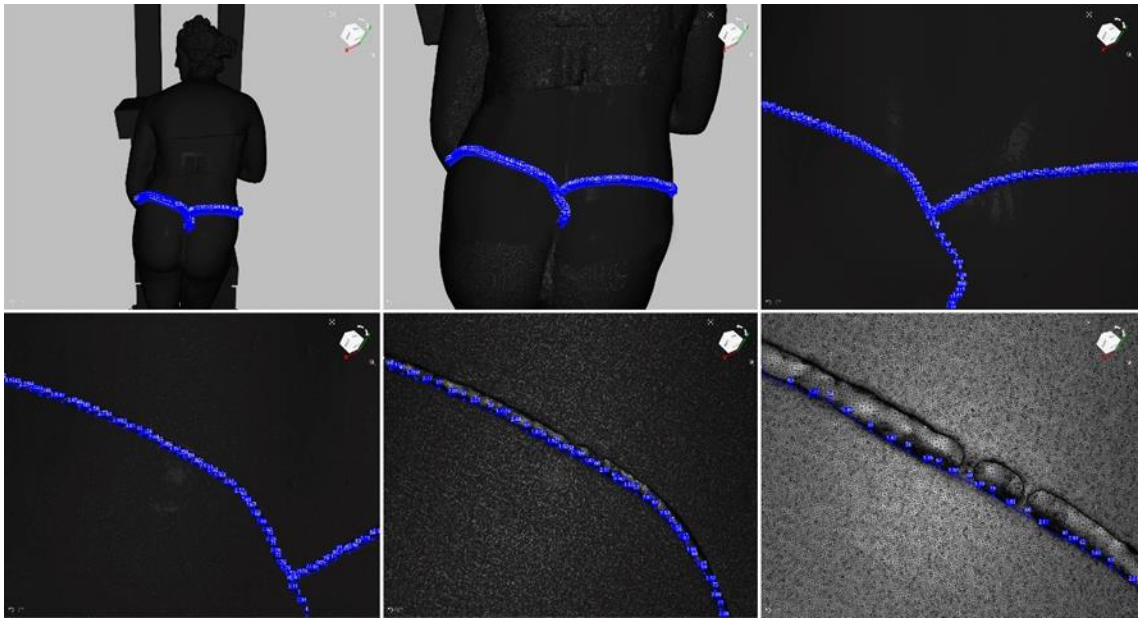


Figura 270. Proceso de medición geodésica de la fractura sobre el alambre de la malla. © Emanuel Sterp Moga.

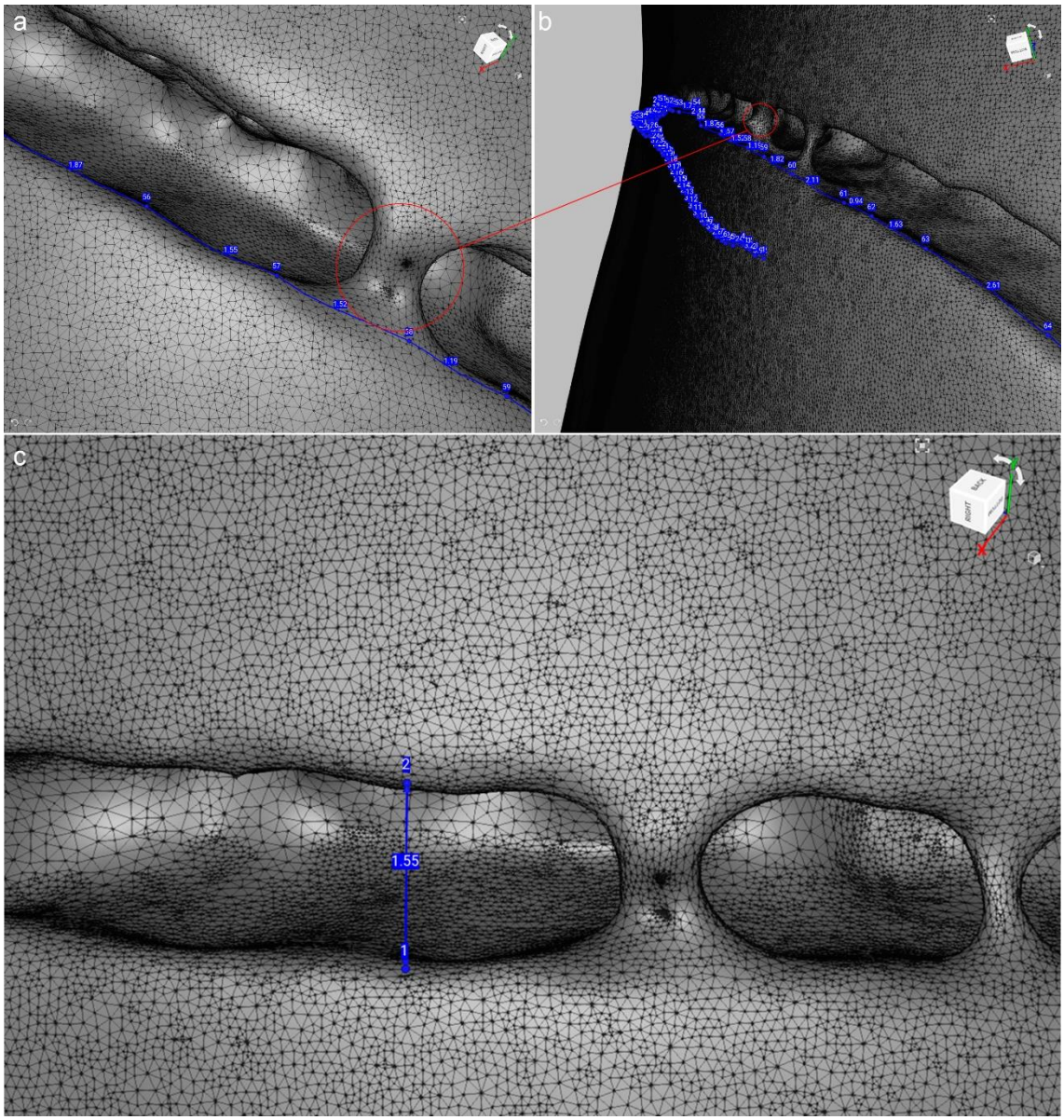


Figura 271. a y b) Detalles del proceso de la medición geodésica de la extensión de la fractura sobre el alambre de la malla. c) Detalles del proceso de la medición lineal de la separación de la fractura sobre el alambre de la malla. © Emanuel Sterp Moga.

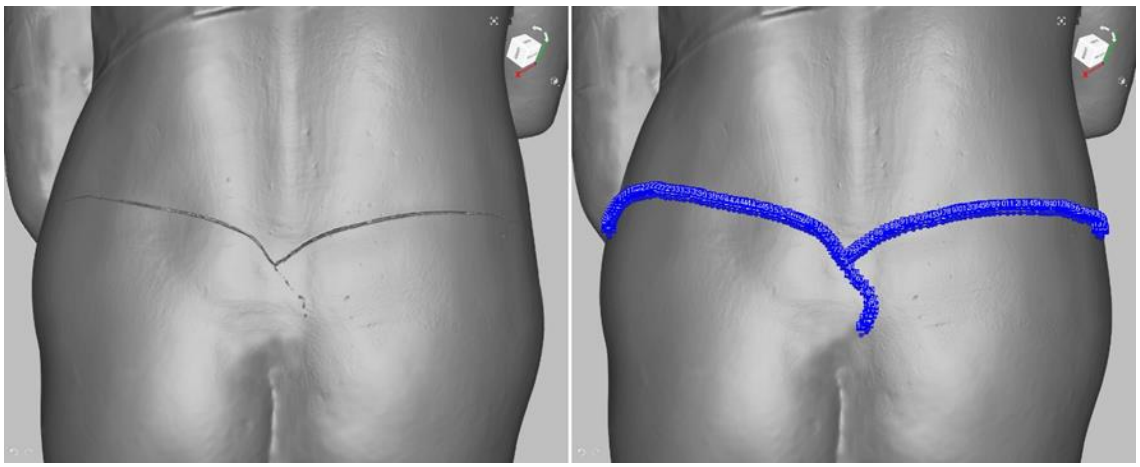


Figura 272. Antes y después de realizar la medición geodésica de la fractura sobre la malla. © Emanuel Sterp Moga.

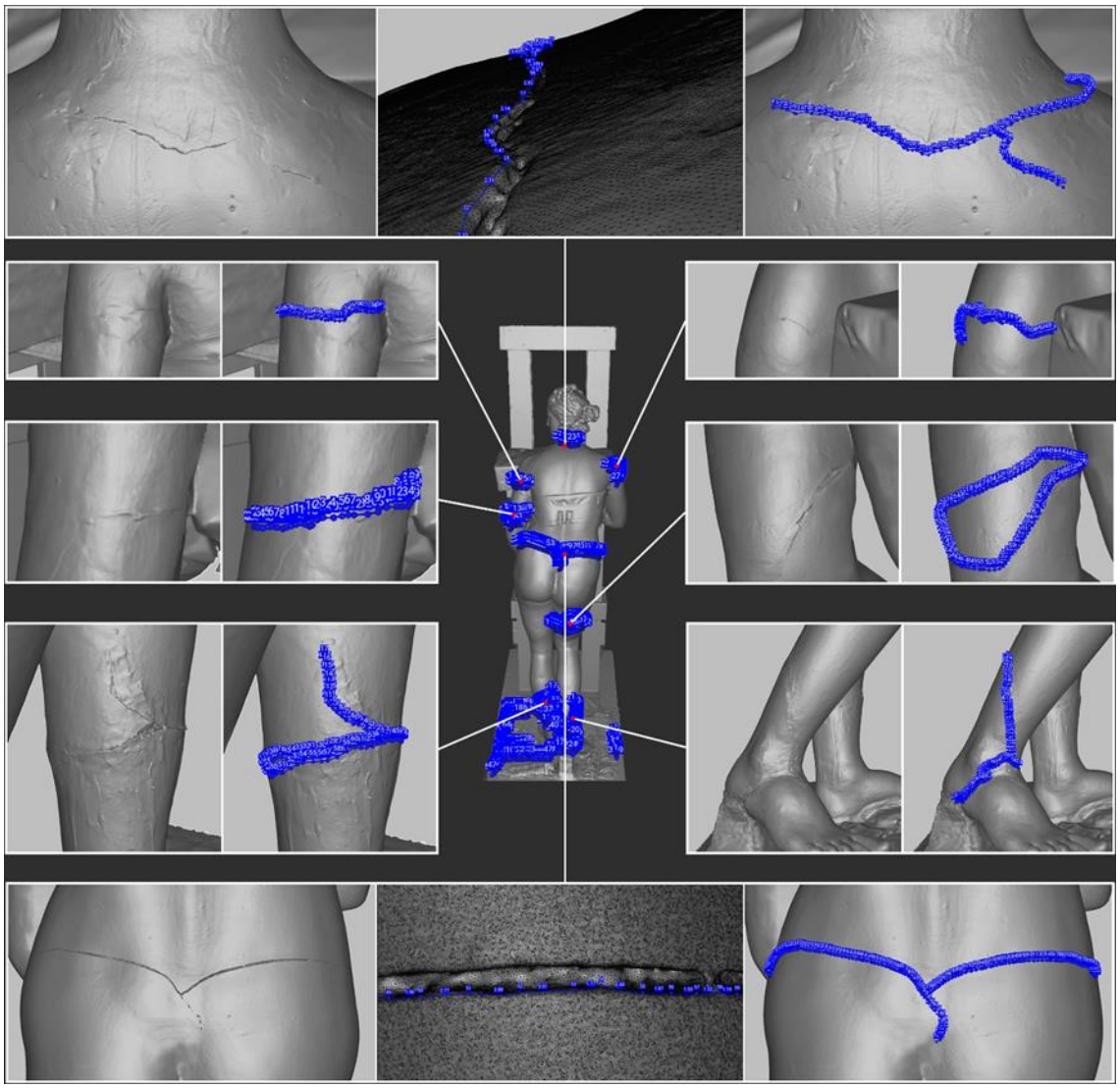


Figura 273. Mediciones de las diversas fracturas, grietas y fisuras en la Venus de cera. © Emanuel Sterp Moga.

En la tabla 19 se recogen los datos acerca de las alteraciones estructurales de la escultura. Se identificaron 6 fracturas, 21 grietas y 11 fisuras, todas ellas medidas anualmente durante los años 2019, 2020, 2021 y 2022. A lo largo de ese período de tiempo no se ha detectado ningún avance en las alteraciones, permaneciendo estable el conjunto de la obra. Se considera, por tanto, que la decisión de colocar una estructura auxiliar de apoyo llevada a cabo en el año 2017 ha sido acertada para frenar los deterioros y dotarla de estabilidad.

Distancia lineal y geodésica	Número de puntos geodésicos	Longitud mm	Separación mm
1ª Grieta en la espalda a la altura de los trapecios	32	77	0.5-0.7
Fisura en la espalda a la altura del trapecio derecho hasta el oblicuo externo del mismo lado	29	82	0.10-0.24
Fisura en la espalda a la altura del trapecio izquierdo hasta el oblicuo externo del abdomen izquierdo	4	9	0.08-0.1
2ª Grieta en la espalda a la altura de los trapecios que deriva de la primera	22	34	0.6-0.8
Grieta en el brazo izquierdo a la altura de la porción anterior del deltoides	29	85	0.4-0.6
Fisura en el brazo izquierdo a la altura de la porción anterior del deltoides	10	39	0.08-0.1
Grieta en el brazo izquierdo a la altura del tríceps	19	92	0.4-0.8
Fisura en el brazo izquierdo a la altura del tríceps	16	37	0.07-0.1
Grieta en el brazo izquierdo a la altura del pronador	18	43	0.3-0.7
Fisura en el brazo izquierdo a la altura del pronador	10	19	0.06-0.1
Fisura en el brazo izquierdo a la altura del pronador hasta el tríceps	28	73	0.05-0.1
Grieta en el brazo derecho a la altura de la porción anterior del deltoides	31	71	0.4-0.7
Fisura en el brazo derecho a la altura de las porciones media y posterior del deltoides	27	69	0.09-0.1
Fractura desde el vasto lateral del cuádriceps derecho hasta el semitendinoso	48	202	3.5-8.8
Grieta en muslo derecho, desde el semitendinoso hasta el muslo vasto interno del cuádriceps	63	273	0.4-0.9
Fractura dedo pulgar de la mano izquierda	11	57	1.5-4.6
Grieta en la espalda en la región lumbar	117	331	0.8-1.9
Fisura en la espalda en la región lumbar derecha	14	36	0.09-0.2
Fisura en la espalda en la región lumbar izquierda	12	31	0.08-0.1
Grieta en región sacrolumbar	10	33	0.6-0.8
Fisura en la espalda en región sacrolumbar	6	10	0.09-0.1
Grieta en extremidad inferior derecha desde la tibia hasta el astrágalo	43	135	0.5-0.8
Grieta del pie desde en la zona del astrágalo hasta cuboides del lado derecho	25	69	0.5-0.7
Fractura del pie derecho desde la zona del cuboides hasta el calcáneo lado derecho	24	74	2.3-9.6
Grieta del pie desde en la zona del astrágalo hasta cuboides del lado izquierdo	11	41	0.6-0.7
1ª Fractura del pie derecho desde la zona del cuboides hasta el calcáneo lado izquierdo	17	62	2.1-5
2ª Fractura del pie derecho desde la zona del cuboides hasta el calcáneo lado izquierdo	14	39	1.8-3.1
Fractura de la pierna izquierdo a la altura de la tibia	72	257	1.7-3.9
Grieta en el maléolo interno del tobillo izquierdo	40	133	0.4-0.7
Grieta en la pierna izquierda desde el anterior hasta el gastrocnemio	17	32	0.4-0.7
Grieta en la base esquina superior izquierda	30	156	0.7-1.3
Grieta en la base esquina superior izquierda	64	220	0.7-1.2
Grieta en el base lateral izquierdo	57	208	0.6-1.3
Grieta en la base desde el centro lateral izquierdo hasta el tobillo del pie izquierdo	28	110	0.7-1.1
Grieta en la base desde el centro lateral izquierdo hasta el tobillo del pie derecho	76	358	0.6-1.2
Grieta en la base en el tobillo derecho	6	26	0.7-1.2
Grieta en la base del lateral derecho en la parte central	19	115	0.6-1.1

Tabla 19. Mediciones de las diversas alteraciones halladas en la Venus de cera. © Emanuel Sterp Moga.

6.1.4. Resultados y discusión

El análisis historiográfico y comparativo realizado de la Venus de Medici en cera con la Venus de Medici en escayola, conservada en la RABASF, ha ofrecido valiosas pistas sobre el estudio. La proximidad temporal entre la creación de ambas esculturas (Venus de escayola 1770 – Venus de cera 1787) y la cercanía entre las dos instituciones, pudieron contribuir a nuestra hipótesis de partida consistente en que Lacaba utilizó moldes de una de las obras más reproducidas durante el siglo XVIII para elaborar la Venus anatómica.

La digitalización 3D, basada en escáneres de luz estructurada, ha demostrado ser una herramienta exploratoria de enorme potencial para el análisis comparativo de la manufactura de las obras y del seguimiento del estado de conservación.

Durante los análisis virtuales fueron varios los resultados que reforzaron dicha hipótesis. En primer lugar, la superposición de los modelos escaneados ha mostrado una notable coincidencia morfológica. Las diversas herramientas de medición (lineal, geodésica, cálculo volumétrico y *mapas de distancias*), han corroborado la similitud volumétrica que presentan. Pese a que existen diferencias dimensionales en zonas concretas, han sido varias las regiones que han encajado a la perfección entre las dos esculturas.

En aquellas áreas en las que presentan discrepancias, éstas se pueden deber a diversas razones. En el caso de la cabeza, durante el análisis comparativo se ha detectado una clara disminución volumétrica de la Venus en cera. Una posible explicación es que esta parte anatómica de la figura se haya realizado por otro medio, ya que presenta una importante merma de aproximadamente un 4%. Este dato solo se ha localizado en esta parte. Uno de los materiales que pueden sufrir este proceso de retracción volumétrica es el barro. Las proporciones faciales y características de la Venus de cera no están en perfecta sintonía con la cabeza de la Venus en escayola. Por ello, cabría la posibilidad de que la cabeza hubiera sido elaborada mediante el método del apretón, consistente en aplicar una capa de arcilla en el molde con el fin de obtener el positivo en cera. Respecto a las desviaciones en los rizos del cabello, se apreciaron diferencias significativas respecto al desplazamiento, pudiendo deberse a un exceso de manipulación cuando el positivo de cera acababa de ser extraído del molde.

En cuanto a la parte correspondiente al torso, la modificación observada al sacrificar unos pocos centímetros, sobre todo en la zona abdominal, puede estar indicando posibles complicaciones durante el proceso de elaboración que llevasen a Lacaba a adaptar esta zona a las necesidades de mostrar con detalle las estructuras internas de la anatomía femenina.

Sobre el desplazamiento del pie izquierdo de la figura en cera, parece deberse a una decisión adoptada durante la fabricación del modelo anatómico.

Otro dato que apoya la hipótesis del uso de moldes en la creación de la escultura cérea se basa en la información aportada por la zona posterior del muslo izquierdo, a la altura del bíceps femoral, donde se ubicaría el contacto con el elemento del delfín, presente en la Venus de escayola. En el modelo anatómico este ha sido eliminado y justo en la zona donde debería estar se ha observado la presencia de una grieta rellenada con pasta de cera. Esta huella representa una falta de volumen que seguramente se deba a la retirada del refuerzo del delfín para poder realizar los moldes correctamente. Dicho vestigio solamente se debe al empleo de moldes con las características descritas, ya que todo apunta que el hueco se rellenó posteriormente.

Respecto al análisis de la técnica constructiva, el estudio virtual de las huellas correspondidas a las juntas de los moldes analizados en la Venus de escayola, han permitido una mejor comprensión del proceso de creación. Asimismo, ha revelado más vestigios acerca del empleo de los moldes en la escultura anatómica, ya que se han detectado varias líneas con la misma forma y disposición, siendo la más llamativa ubicada en la zona de los trapecios hacia el hombro izquierdo.

Por otro lado, relacionado con las diferencias dimensionales durante la unión de cada pieza, también se ha podido estimar una pérdida en mayor o menor medida, proceso inevitable durante la unión. Ello refleja las pequeñas diferencias halladas, por ejemplo, en la parte de los muslos. Por último, diversas grietas presentes en el modelo anatómico están localizadas en zonas muy próximas a las juntas, y ello seguramente haya favorecido su origen dado la alta dificultad que supone lograr unas uniones perfectas en el material ceroso.

En relación con el análisis del estado de conservación de la Venus de cera, acerca de la inclinación sufrida hacia delante y la desviación en el lado derecho, son varias las causas que lo ha podido provocar. La primera y la más esencial es que seguramente se deba al debilitamiento del armazón interno o al inadecuado diseño. Por otro lado, el material ceroso es muy sensible a los cambios ambientales, siendo más susceptible de perder su consistencia a temperaturas altas. Un inadecuado entorno ha podido provocar dilataciones y contracciones constantes en la cera y, por tanto, favorecer dicha desviación. Asimismo, la ausencia de un soporte lateral en la pierna izquierda también ha influido, ya que todo el peso ha recaído desde un primer momento en dicha pierna. Con el paso del tiempo y la progresiva desviación, el peso ha ido recayendo sobre la parte derecha de la escultura, generando mayores tensiones, grietas y fracturas. También se ha podido detectar la influencia de la zona anatómica presente en la región torácica–abdominal de la escultura. La falta de una pared fija en dicha parte donde se ubica la tapa del abdomen ha dado lugar a un área muy vulnerable pese a que está reforzada por un armazón interno. Al carecer de un refuerzo completo en esa área, ha podido influir en la desviación de la pieza. Precisamente la enorme grieta presente en la parte lumbar se debe al debilitamiento de la zona y, con ello, la progresiva inclinación hacia el lado derecho.

Las causas de la desviación sufrida no se pueden concretar con total certeza, si bien el factor antropogénico ha desempeñado un papel crucial en su estado de conservación, junto con la ausencia de unas condiciones ambientales óptimas para la correcta conservación de la pieza. Por otro lado, la técnica de ejecución también pudo potenciar el estado actual de conservación. Tras el análisis minucioso del vencimiento hacia delante y de la desviación en el lado derecho, todo indica que probablemente Lacaba terminará la escultura un tanto desviada hacia el lado derecho, ya que no se ha podido determinar que el modelo anatómico femenino tuviera originalmente la misma postura que la Venus de escayola. No obstante, se puede afirmar que las diversas fracturas y grietas han incrementado dicha desviación.

Por último, en relación con el seguimiento de las alteraciones estructurales, las múltiples mediciones llevadas a cabo con las herramientas geodésicas y lineales han permitido realizar un seguimiento preciso y detallado de cada una de las alteraciones. El seguimiento llevado a cabo en los cuatro años ha demostrado que la estructura auxiliar colocada con carácter temporal hasta su intervención ha resultado efectiva al estar contribuyendo a mantener estable la integridad estructural del modelo anatómico.

CASO 2

VERSIÓN INTERNA



Museo de Anatomía "Javier Puerta" (UCM)

Creación de facsímil para el ensayo de las adhesiones mediante diversas estructuras auxiliares impresas en 3D

6.2. Caso 2: Versión Interna. Museo de Anatomía “Javier Puerta” (UCM). Creación de facsímil para el ensayo de las adhesiones mediante diversas estructuras auxiliares impresas en 3D

El segundo caso de estudio se centró en el modelo anatómico *Versión interna* (n.º Ref.: MAJP000328), obra realizada en colaboración entre el escultor malagueño Juan Cháez y el modelador de cera italiano Luigi Franceschi, a partir de las instrucciones dadas por el disector anatómico del Real Colegio de Cirugía madrileño, Ignacio Lacaba (figura 274). Se trata de una escultura de bulto redondo en cera policromada cuyas medidas son 22 x 44 x 56 cm. Pertenece a la colección ceroplástica del Museo de Anatomía “Javier Puerta” en la Facultad de Medicina, (UCM). Este trabajo formó parte del proyecto I+D: *Metodologías innovadoras en conservación de colecciones científicas con modelos didácticos para la enseñanza de Botánica, Anatomía humana y animal basadas en las nuevas tecnologías 3D*, Ref.: PGC2018-098396-B-100.



Figura 274. *Versión interna*. © Luis Castelo.

Los ceroescultores tomaron como fuente de inspiración para la construcción de esta figura obstétrica con fines didácticos tanto los modelos existentes en las famosas colecciones italianas de Florencia y Bolonia, como en las ilustraciones y grabados sobre el útero elaborados por el artista holandés Jan van Rymsdyk (1730-1790) para el manual de obstetricia, *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*, de William Smellie (1697-1763) (Smellie, 1754). En este tratado se incluyen algunos grabados que muestran el funcionamiento del cuerpo femenino durante la gestación y el desarrollo del feto, así como las manipulaciones necesarias para sacar el parto adelante (figura 275 a, b y c). Riemsdyk también colaboró con el obstetra William Hunter (1718-1783) y elaboró grabados para su tratado *The Anatomy of the Human Gravid Uterus* (figura 275 d) (Hunter, 1774).

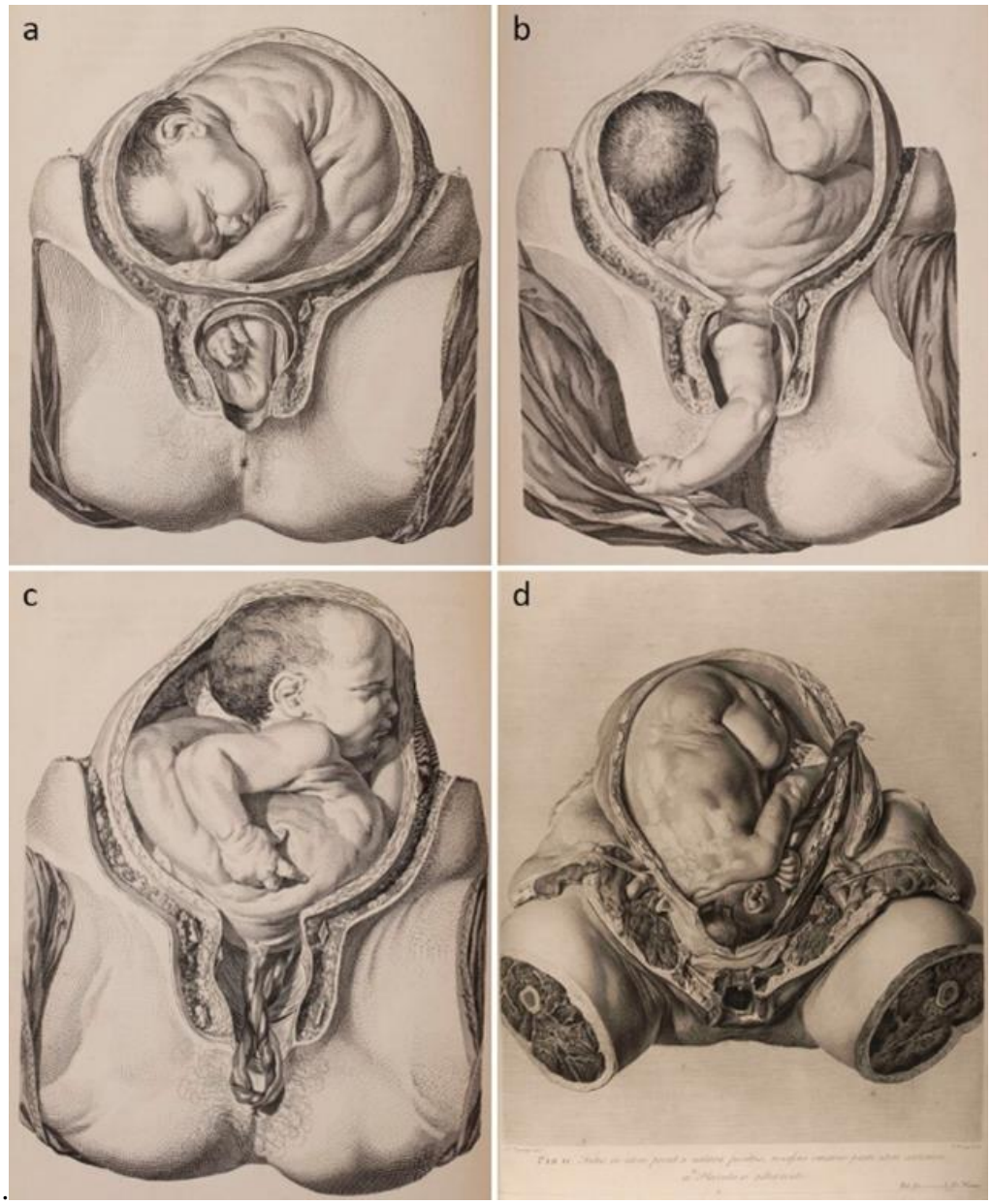


Figura 275. a, b y c). Vista frontal de diferentes representaciones del feto, de la pelvis y del útero durante el parto. © Jan van Rymsdyk y William Smellie. d) El feto en el útero, tal como lo coloca la naturaleza, la parte anterior del útero está completamente cerrada y la placenta adherida a él. © Jan van Rymsdyk y William Hunter.

6.2.1. Estado de conservación de la Versión interna

La *Versión interna* presentaba un estado crítico de conservación como consecuencia de la acción combinada de diferentes factores de degradación que habían ocasionado daños de considerable entidad hasta el punto de perder por completo su funcionalidad original.

La propia morfología anatómica de la escultura ha podido influir en la dificultad de su manipulación durante su uso en las exhibiciones docentes y determinar que las partes volumétricas salientes y más frágiles, como la mano izquierda del obstetra y el pie del feto, terminarán por fragmentarse, con la pérdida de algunos elementos. Un factor clave que ha repercutido negativamente en el estado de conservación se debe al uso funcional de la peana. Sobre el plano donde se apoya la obra, presenta un sistema de apertura en V que permite elevar la pieza desde la parte de detrás con el fin de inclinarla hasta lograr un ángulo máximo de 40º (figura 274). Con ello, se conseguía una mejor posición para las explicaciones y contemplación del estudiantado. Dado el considerable peso de la escultura, es probable que, durante las múltiples manipulaciones para inclinarla y ubicarla en la posición de origen, sufriera pequeños golpes debido a una falta de sujeción firme durante ese proceso. Las constantes vibraciones, junto con los múltiples traslados de un sitio a otro, han podido también contribuir a la aparición de numerosas fisuras, grietas y fracturas (figura 276). Algunos de los fragmentos no se conservan, como es el caso del dedo corazón, y otros han sido objeto de tratamientos en el pasado para remediar los problemas constantes que padecían. Las intervenciones históricas no han hecho más que agravar el estado de conservación. El empleo de adhesivos poco compatibles con la cera original durante los tratamientos ha generado tensiones mecánicas de diversa entidad. Además, las pastas de relleno empleadas para las lagunas cubrían zonas del original alterando la lectura del conjunto.

Aparte del factor antropogénico, considerado la principal causa que ha contribuido al deterioro de la obra, se suman otros factores intrínsecos y extrínsecos. Con el paso del tiempo, los componentes utilizados por los artífices para modelar la escultura han sufrido un envejecimiento natural, experimentando diversos cambios fisicoquímicos en su estructura interna que ha llevado al soporte céreo a ser más quebradizo. Las constantes fluctuaciones de humedad relativa y temperatura también han favorecido el deterioro con la aparición de fisuras y grietas en las partes más vulnerables debido a los constantes cambios de contracción y dilatación que ha experimentado el material. Estas se han visto enormemente potenciadas por las múltiples manipulaciones mencionadas con anterioridad y debido a la fragilidad de la cera, dando lugar a diversas fracturas.

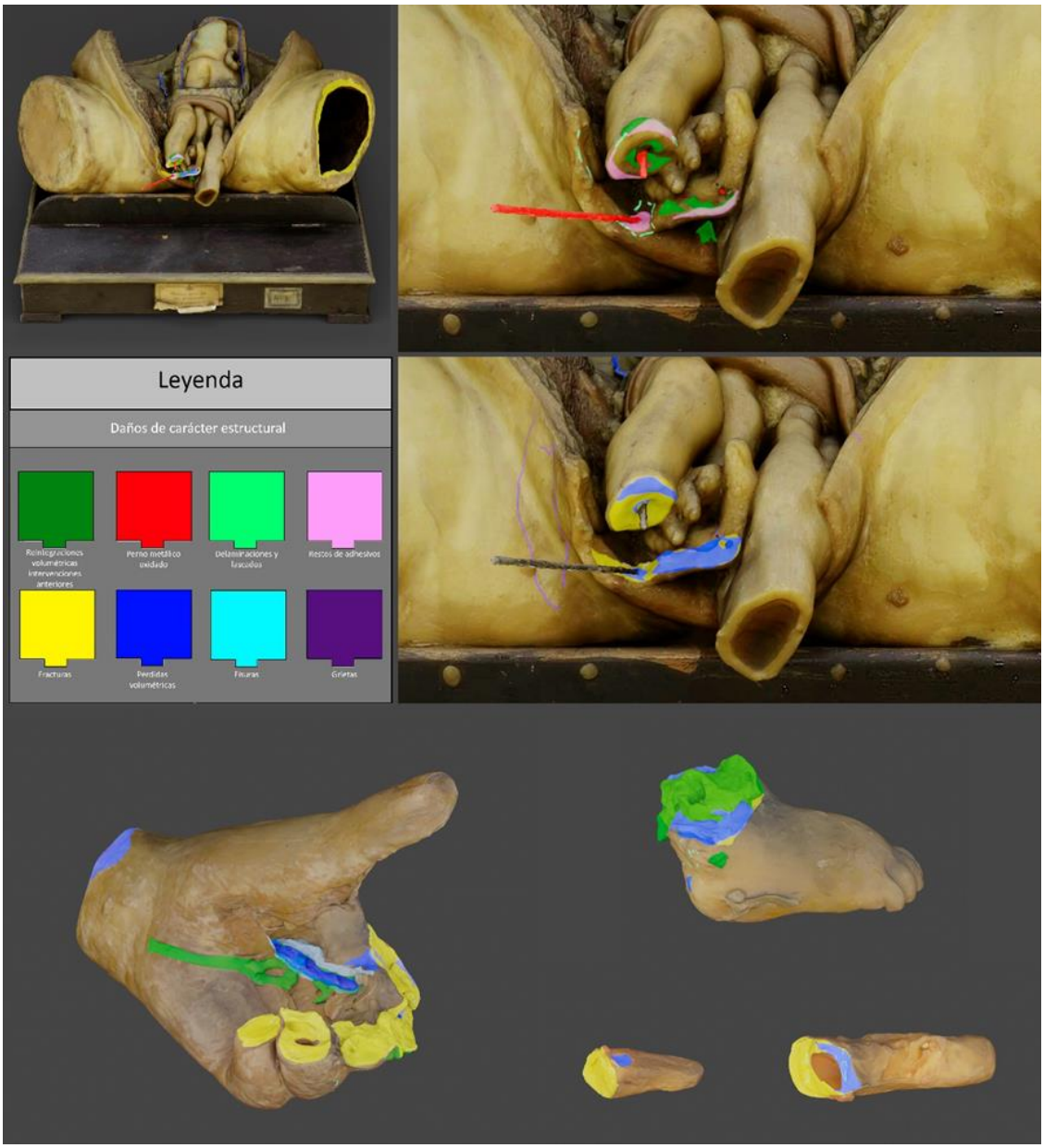


Figura 276. Cartografías 3D de patologías estructurales. © Emanuel Sterp Moga, Óscar Hernández-Muñoz, Javier del Río Esteban y Alicia Sánchez Ortiz.

Con el fin de analizar con mayor detalle el crítico estado de conservación y determinar cuáles podrían ser los tratamientos más acertados para frenar los daños en una futura intervención, se procedió a digitalizar la escultura. Diversos miembros del equipo investigador participante en el proyecto I+D ya referenciado, llevaron a cabo este proceso mediante la combinación de los escáneres de luz estructurada Artec Eva y Artes Space Spider. También se efectuó el procesado de los datos, la obtención del modelo y el estudio de la anastilosis virtual. Durante los análisis virtuales, la dificultad encontrada para adherir con precisión cada uno de los fragmentos de la obra resultó ser una tarea realmente compleja. En diversos casos, al no conservarse la superficie de unión coincidente fue laborioso ubicar cada uno de ellos en su sitio original. Por todo ello, se consideró imprescindible recurrir al empleo de diferentes estructuras auxiliares que asegurasen la estabilización de los fragmentos durante la intervención.

Las tareas encomendadas dentro del proyecto I+D fueron exclusivamente enfocadas a la adhesión de fragmentos y reintegraciones volumétricas. Estas se dividieron en cinco fases. La primera consistió en el diseño virtual de diversas estructuras auxiliares para la estabilización de los fragmentos. En segundo lugar, fue preciso hallar el material más apropiado para la impresión 3D de las estructuras mediante diferentes ensayos de tracción y flexión. Otra de las tareas fue experimentar dichas intervenciones en un facsímil y, para ello, se diseñaron diversos moldes. Una cuarta tarea se centró en la creación del facsímil y el ensayo de los procesos de adhesión y reintegración volumétrica mediante las estructuras auxiliares impresas en 3D antes de realizar los tratamientos en la obra real. La última tarea consistió en acometer las intervenciones ensayadas en el facsímil sobre la propia escultura dañada. Las intervenciones anteriores a la adhesión de fragmentos, como la limpieza de partículas de contaminantes atmosféricos, la remoción de las películas filmógenas, así como el proceso final que culminó con la reintegración cromática, fueron realizadas por diversos miembros del equipo investigador y técnicos de apoyo que participaron en el desarrollo del proyecto I+D citado.

6.2.2. Creación del facsímil y ensayo de las adhesiones mediante estructuras auxiliares

6.2.2.1. Digitalización 3D

El registro obtenido en el modelo obstétrico mediante la combinación de los escáneres Artec Eva y Artec Space Spider proporcionó un modelo de altísima calidad con una malla de 15.168.150 polígonos en el conjunto de toda la obra (figura 277).



Figura 277. Proceso de escaneado y obtención del modelo. a) Proceso de escaneado con Artec Eva. b) Proceso de escaneado con Artec Space Spider. c) Modelo original. d) Modelo virtual procesado. © Emanuel Sterp Moga, Óscar Hernández-Muñoz, Javier del Río Esteban y Alicia Sánchez Ortiz.

6.2.2.2. Anastilosis virtual y estudio de los tratamientos mediante estructuras auxiliares

La alta resolución de la malla de 0.2 mm en el modelo principal y 0.1 en los diferentes fragmentos, permitió un análisis preciso de la anastilosis virtual. Durante la ubicación de los fragmentos en su sitio de origen, se hallaron diversas dificultades a la hora de estabilizar con precisión y seguridad cada uno de ellos a adherir (figuras 278 y 279).

Comenzando con la adhesión de la mano izquierda del obstetra, su sujeción está reforzada por dos pernos metálicos. El primero se ubica desde la zona del nudillo del dedo índice situado cerca del labio exterior de la vagina, atravesando la zona radial del índice hasta la muñeca de la mano. Presenta una longitud de 142 mm. El segundo se encuentra en la falange media del dedo índice, con una longitud de 74 mm. Las cavidades donde se alojan los pernos presentaban bastante holgura, reduciendo la firmeza y haciendo difícil establecer la posición exacta de la mano. Una vez averiguada su ubicación se detectó una importante falta de material entre la mano y la obra (figura 280 a). Por otro lado, se determinó que el único fragmento que no se conserva (dedo corazón) era un elemento clave para la estabilización estructural del conjunto de las adhesiones, ya que presenta una superficie de contacto en esa área con la escultura. Además, el perno metálico ubicado en la falange medial del dedo índice atraviesa el dedo corazón faltante para aportar mayor estabilidad al conjunto volumétrico (figura 280 b). Analizada su función e importancia, se decidió modelar el dedo para poder ubicarlo de manera discernible en su conjunto y, con ello, estabilizar la mano con seguridad (figura 280 c). Respecto al pie del feto y los dedos de la mano izquierda del obstetra también mostraron pequeñas pérdidas en la superficie de contacto, lo que impedía una precisa unión.

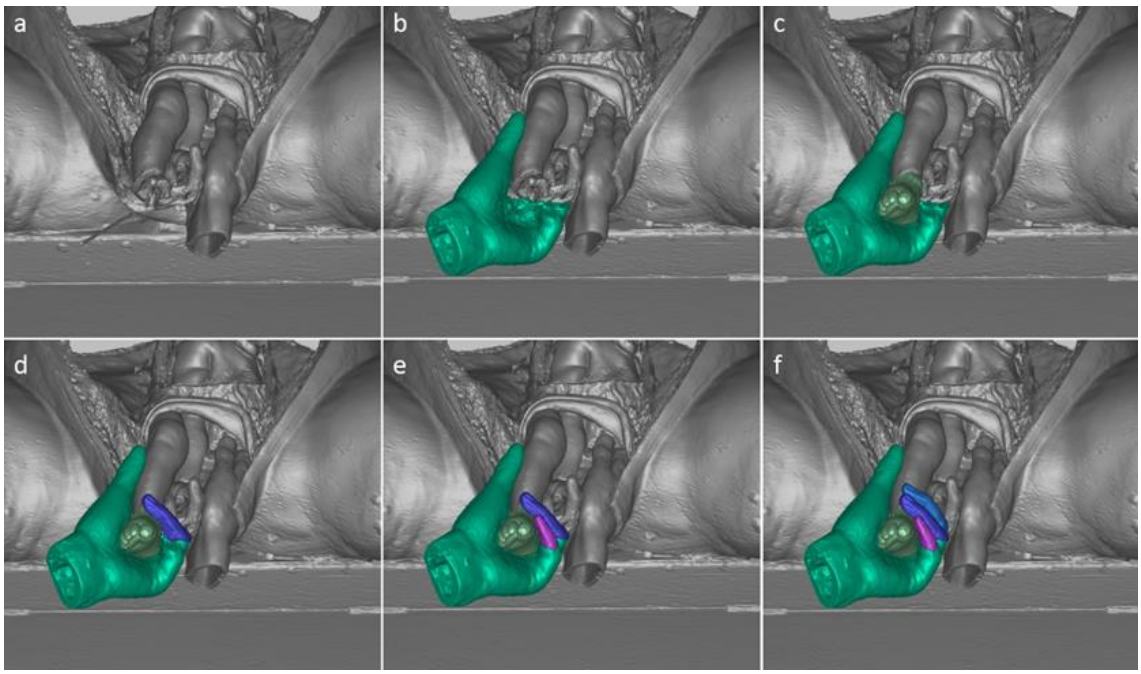


Figura 278. Proceso de anastilosis virtual. a) Estado inicial. b) Ubicación de la mano izquierda. c) Ubicación del pie derecho del feto. d) Ubicación del dedo anular. e) Ubicación del dedo meñique. f) Ubicación del dedo corazón (modelado virtual). © Óscar Hernández-Muños y Emanuel Sterp Moga.

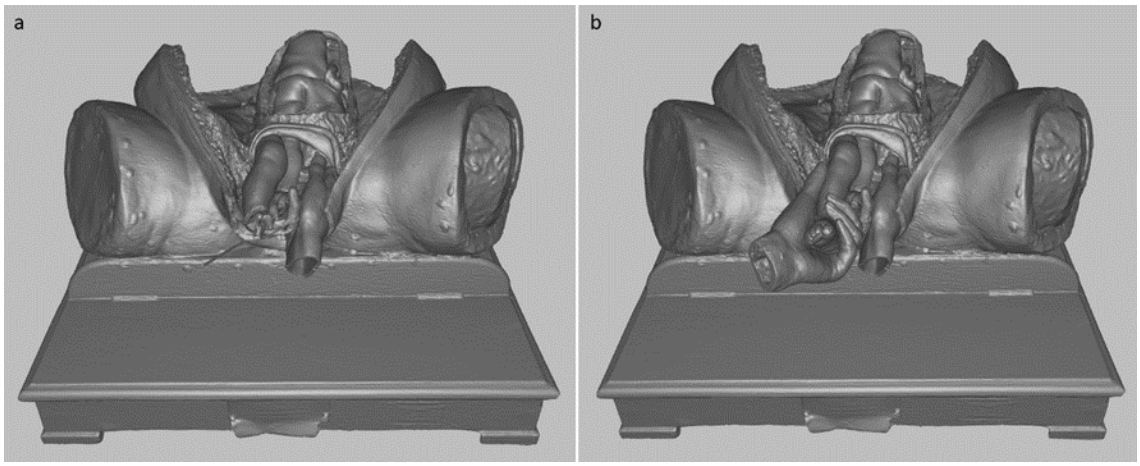


Figura 279. a) Antes de la anastilosis virtual. b) Después de la anastilosis virtual. © Óscar Hernández-Muños y Emanuel Sterp Moga.

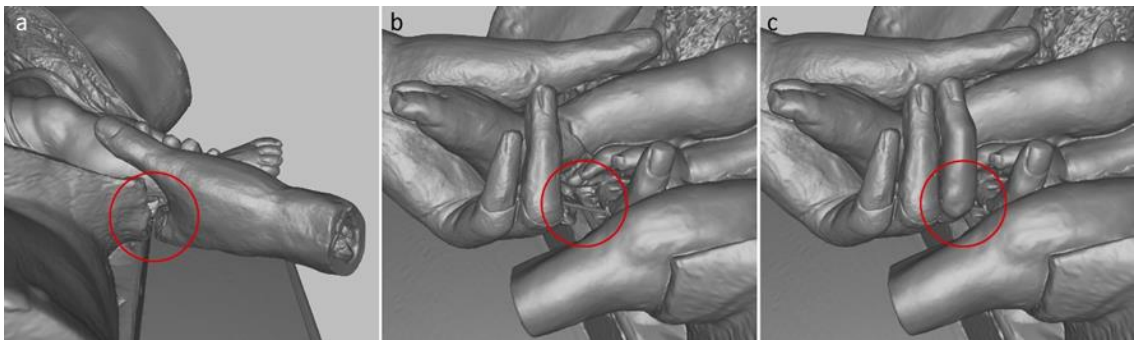


Figura 280. a) Falta de la materia cerosa entre la mano y la escultura. b) Elemento metálico que atravesaría el dedo corazón el cual no se conserva. c) Ubicación del dedo corazón modelado para analizar la trayectoria y el grado de incisión del perno metálico en el dedo. © Emanuel Sterp Moga.

Las dificultades halladas dieron origen al meticuloso estudio y modelado de las estructuras auxiliares (Véanse los apartados 3.6.2. y 4.7.2. Modelado digital de las estructuras auxiliares). Mediante la anastilosis virtual y la aplicación de las estructuras, se analizaron pormenorizadamente las operaciones necesarias para abordar los tratamientos de adhesión a través de diversas simulaciones virtuales (figura 281).

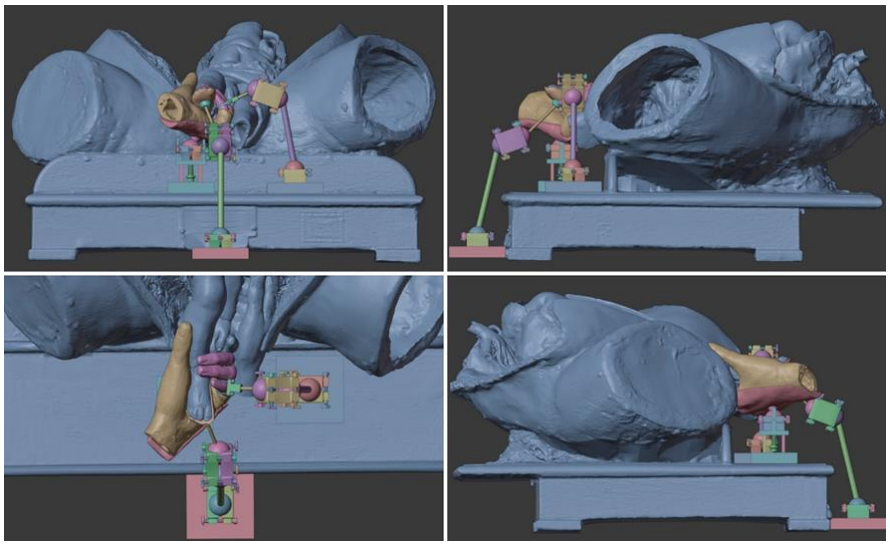


Figura 281. Estructuras auxiliares para la adhesión de fragmentos en cera (Ver modelo 3D). © Emanuel Sterp Moga.

6.2.2.3. Diseño e impresión 3D de los moldes para la creación del facsímil

Concluida la parte del estudio virtual acerca del método de abordaje de los tratamientos, se procedió a realizar el facsímil de la escultura con el fin de ensayar los procesos de intervención de manera física previamente a hacerlo sobre la obra real.

Para ello, en primer lugar, se diseñaron los moldes necesarios para su reproducción. Se tomaron como referencia únicamente las partes correspondientes a las adhesiones, descartando la necesidad de elaborar el facsímil de toda la obra. Los moldes diseñados se centraron en seis fragmentos: dedo meñique, dedo anular, dedo corazón, pie derecho del feto, mano izquierda del obstetra y la parte saliente del feto, vagina, útero y placenta (figura 282).

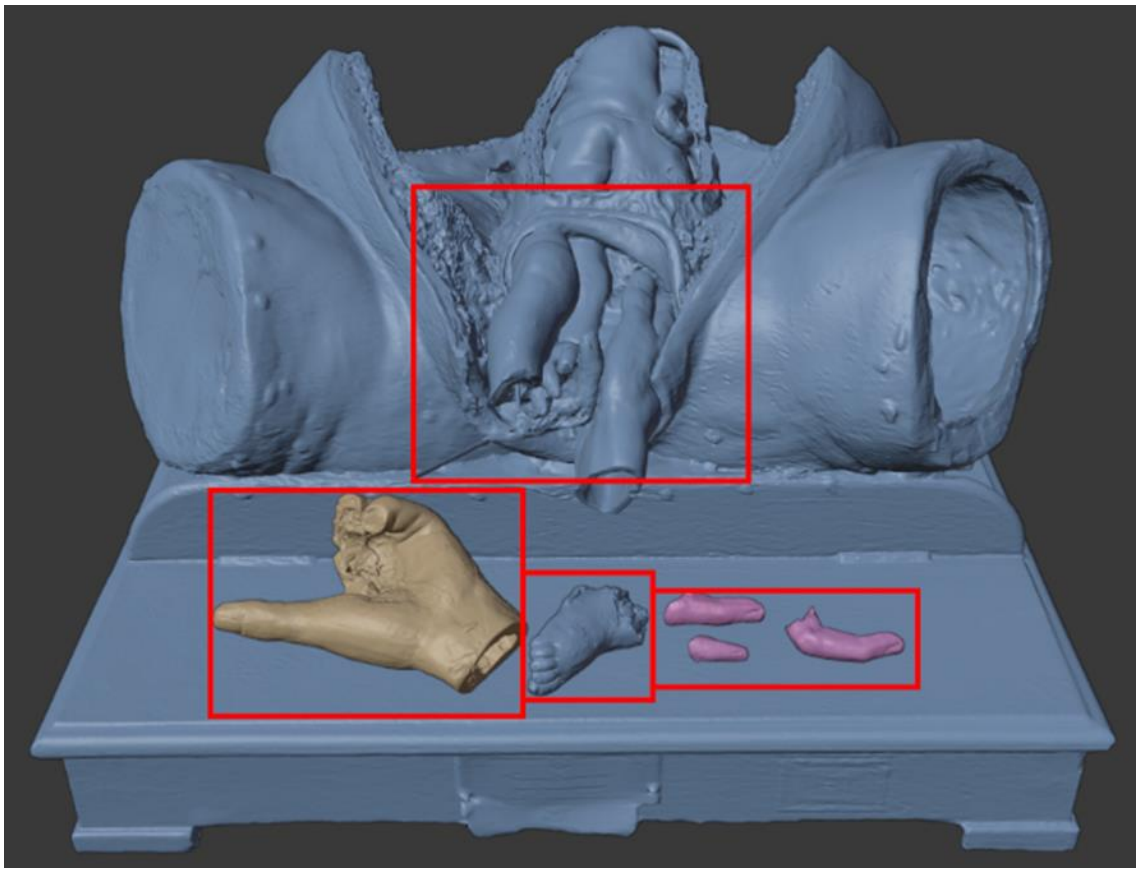


Figura 282. Fragmentos de la *Versión interna* sobre los que se han realizado los moldes. © Emanuel Sterp Moga.

El modelado comenzó partiendo de un único bloque cuadrado o rectangular para cada pieza, ajustándose a la forma de la obra con el fin de optimizar el material en las próximas operaciones de impresión (figura 283) (Véanse los apartados 3.6.1. y 4.7.1. Modelado digital de moldes). En el caso del molde de la parte saliente del feto, vagina, útero y la placenta, dadas las características tan complejas del volumen a reproducir, el diseño se elaboró para unir todos los fragmentos del mismo en un único bloque. Se dejó abierta por completo la parte inferior, ya que no era necesaria reproducirla con fidelidad (figura 284). Con ello, se aseguró que los procesos de colada y desmoldeo fueran sencillos.

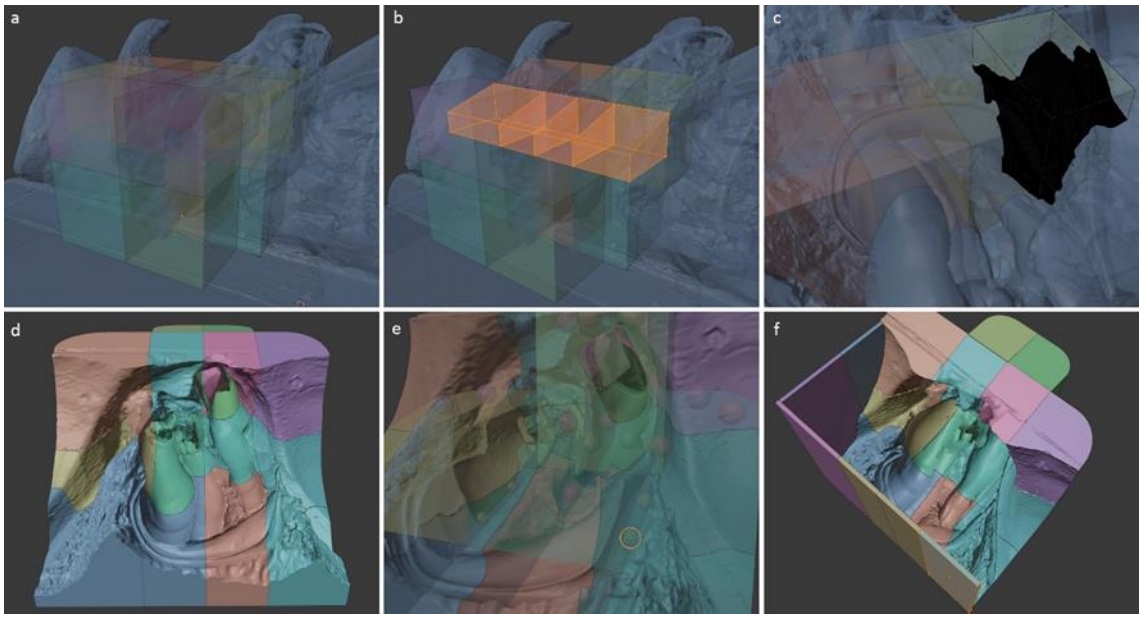


Figura 283. Proceso de creación de los moldes. a) Inserción de cubos para elaborar las piezas de cada molde. b) Modelado de los cubos para adaptarlos a las características volumétricas de la obra. c) Aplicación de *boolean* para reproducir fielmente las superficies a reproducir de la obra en los moldes. d) Obtención de las diferentes piezas con la forma a reproducir. e) Ubicación de las llaves para asegurar una correcta unión y encaje de cada pieza. f) Modelado de los elementos faltantes para concluir los moldes. © Emanuel Sterp Moga.

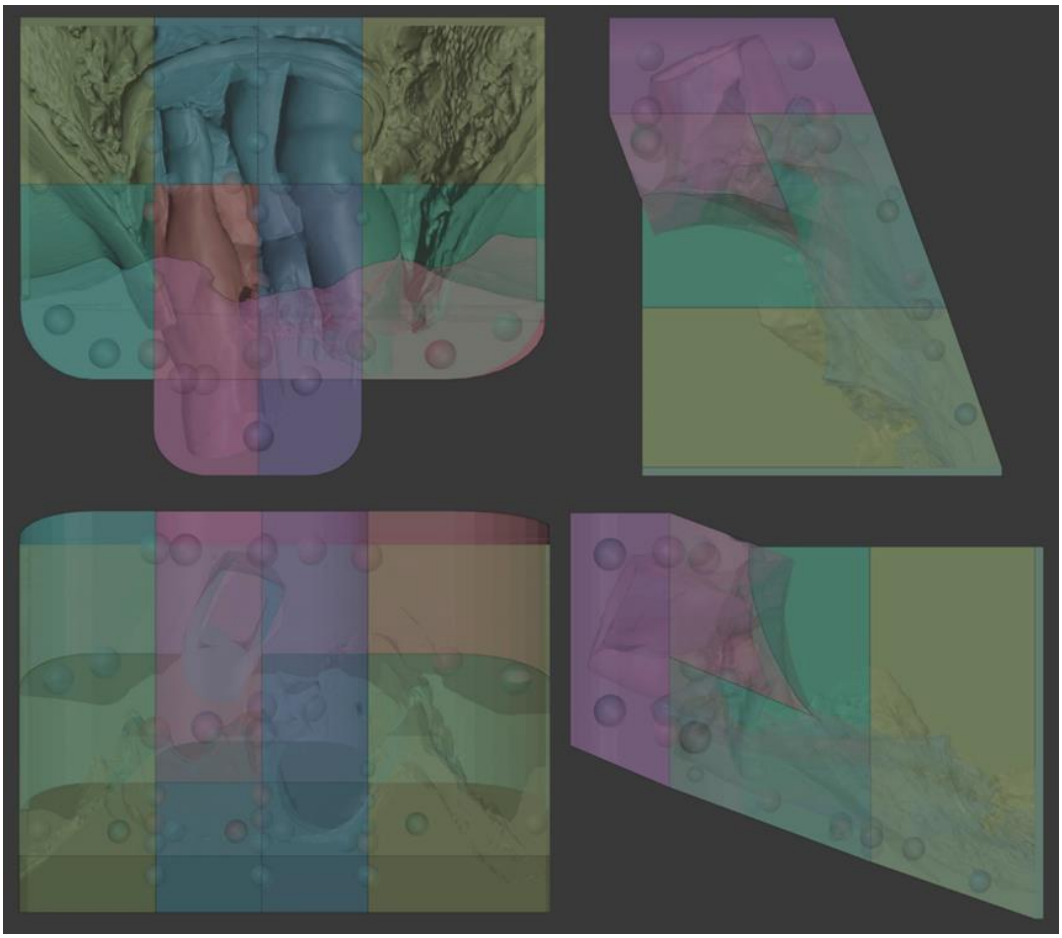


Figura 284. Diseño de los moldes pertenecientes a la parte saliente del feto, vagina, útero y placenta. Molde montado (Ver Modelo 3D). Molde desmontado (Ver Modelos 3D). © Emanuel Sterp Moga.

Durante el modelado no todos los fragmentos presentaron las mismas dificultades de elaboración. Las piezas más sencillas y pequeñas, pertenecientes a los dedos o el pie del feto, se diseñaron en dos partes (figura 285 a, b, c y d), mientras que otros elementos más complejos como la mano izquierda del obstetra requirieron de 9 piezas (figura 285 e) y 14 en el caso de la parte saliente del feto, vagina, útero y la placenta (figura 284).

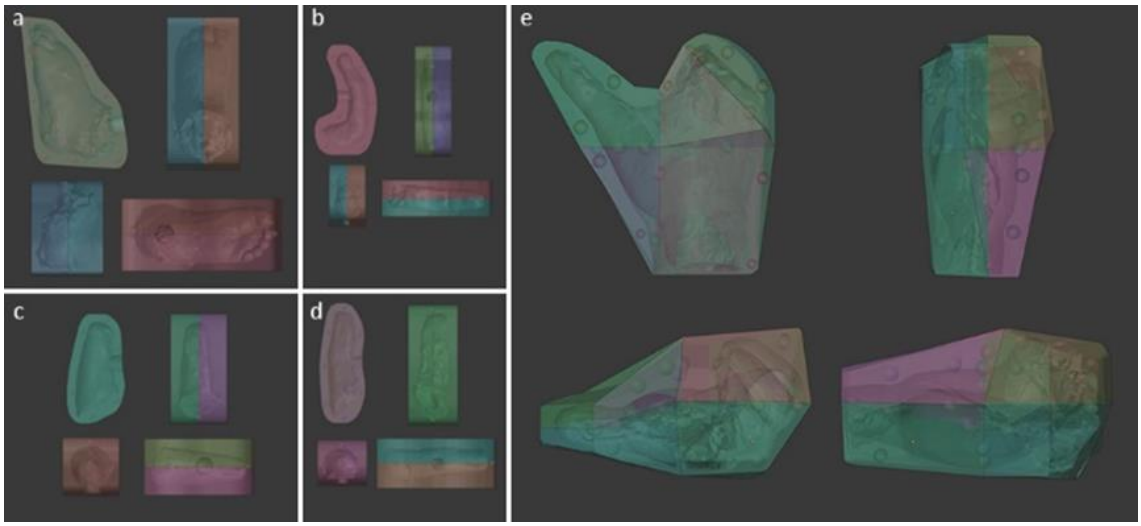


Figura 285. Diseño de moldes. a) Pie derecho del feto. b) Dedo corazón. c) Dedo anular. d) Dedo meñique. Moldes montados (Ver modelo 3D). Moldes desmontados (Ver modelo 3D) e) Mano izquierda. Molde montado (Ver modelo 3D). Molde desmontado (Ver modelo 3D). © Emanuel Sterp Moga.

Concluidos los moldes virtuales, se procedieron a imprimirlos mediante el material PLA Tough (Sterp Moga et al., 2022a), estableciendo un ángulo de 45º en cada una de las piezas sobre la plataforma de impresión, ya que resultó ser el material y la posición más apropiada para este fin (figura 286) (Véase el apartado 4.9.1.1. Impresión 3D FDM).

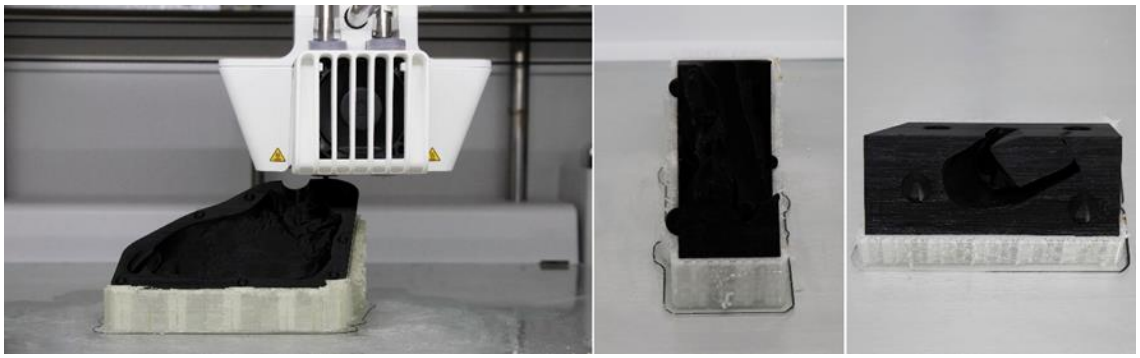


Figura 286. Proceso de impresión 3D de las diferentes piezas que conforman los moldes. © Emanuel Sterp Moga.

La impresión ofreció una gran calidad y solidez en todas las piezas. La incorporación de diversas llaves ubicadas de manera estratégica en cada fragmento aseguró la posición exacta de las diferentes piezas que conforman los moldes, con un encaje perfecto entre ellas, permitiendo un montaje rápido y sencillo (figura 287).



Figura 287. Impresión 3D de los moldes. a) Pie derecho del feto. b) Dedo corazón. c) Dedo meñique. d) Dedo anular. e) Mano izquierda. f) Extremidades de los miembros del feto, vagina, útero y placenta. © Emanuel Sterp Moga, Alicia Sánchez Ortiz y Óscar Hernández-Muñoz.

6.2.2.4. Obtención del facsímil

A partir de los moldes impresos en 3D se crearon los respectivos positivos en cera. En primer lugar, se aplicó una capa de vaselina en cada una de las piezas que componen el molde con el fin de facilitar la retirada de los positivos sin dañar el volumen de la cera (figura 288 a y b). Acto seguido, se aseguró la estabilidad de todos los moldes cerrados mediante cintas elásticas (figura 288 c). Con ello, se garantizó que las piezas del molde no se desplazaran o sufrieran algún movimiento durante el vertido de la cera. Por otro lado, con el fin de evitar posibles filtraciones de la cera por las diversas uniones de cada molde, pese a que el contacto fue pleno entre una pieza y otra, se rellenaron mínimamente con plastilina para evitar cualquier filtración. Con la plastilina aplicada se consiguió mayor rigidez en el conjunto del molde, que, junto a las cintas elásticas, quedó perfectamente unido e inmovilizado.



Figura 288. Aplicación de la vaselina en los fragmentos de los moldes. a) Mano izquierda del obstetra. b y c) Parte saliente del feto, vagina, útero y la placenta. © Emanuel Sterp Moga.

Una vez preparados los moldes, la aplicación de la cera se llevó a cabo por medio del vertido en sucesivas capas. La pasta de cera utilizada fue compuesta por (cera de abejas 6 partes, manteca de cerdo 1 parte y trementina de Venecia 3 partes), tal como lo emplearon los artífices y anatomista en el Gabinete Anatómico (Bonell & Lacaba, 1800, p.500).

En los casos de los moldes formados por dos fragmentos, se procedió a aplicar diferentes capas, primero en una mitad del molde y después en la otra mitad (figura 289 a). Finalmente, se unieron las dos partes y se coló la cera hasta rellenar el molde. Con esta última operación, se consiguió unir los dos volúmenes en una única pieza con una gran consistencia. En los casos de los moldes con varios fragmentos también se llevó a cabo este sistema. Sin embargo, en vez de hacerlo por cada pieza, se aplicó el vertido en varios fragmentos del molde a la vez, dividiéndolos en dos grandes grupos con el fin de poder después unirlos en una sola pieza con facilidad (figura 289 b). En el caso del molde de la parte saliente del feto, la colada de la cera se realizó por capas, primero se aplicó una cantidad que cubrió todo el volumen a reproducir con un espesor aproximadamente de 0,5 cm y, posteriormente, se movió el molde para asegurar que la cera se distribuyera correctamente por toda la superficie (figura 289 c). Rápidamente antes de que empezara a solidificar la cera se aplicó otra capa ya con un espesor mayor y así sucesivamente hasta en 9 ocasiones para concluir el proceso (figura 289 d).



Figura 289. Proceso de elaboración de los positivos en cera. a) Vertido de la cera en el dedo corazón. b) Vertido de la cera en la mano izquierda del obstetra. c) Vertido de la cera en la parte saliente del feto, vagina, útero y placenta. d) Proceso finalizado. © Emanuel Sterp Moga.

Después de 24 horas, el proceso de desmoldeo resultó realmente fácil, sobre todo en los fragmentos más pequeños (figura 290).



Figura 290. Proceso de desmoldeo de las piezas. a) Dedo corazón. b) Pie del feto. c y d) Parte saliente del feto, vagina, útero y la placenta. © Emanuel Sterp Moga.

Una vez retirados todos los moldes, se procedió a repasar con la sonda algunas pequeñas fisuras en las áreas de unión (figura 291 a) aunque, en general, las líneas de las juntas quedaron prácticamente inapreciables. Aparte de repasar las pequeñas fisuras, también se retiraron los restos de cera que pertenecían a la zona de los bebedores (figura 291 b). El resultado obtenido superó las expectativas iniciales al adquirir todos los detalles, hasta los más minuciosos con una alta calidad (figura 291 c).



Figura 291. a y b) Repaso de las juntas y retirada del exceso de material. c) Obtención del facsímil (Ver modelo 3D). © Emanuel Sterp Moga.

Un factor trascendental en la creación del facsímil es el peso de los fragmentos. Se pesaron los diferentes elementos de la obra real (dedo meñique 3.08 g, dedo anular 7.80 g, pie derecho del feto 36.20 g y la mano izquierda 223.70 g), con el fin de lograr los mismos valores en el facsímil. Este factor era imprescindible para evaluar la eficacia de las estructuras durante las adhesiones. Para ello, fue necesario retirar un poco de material ceroso en el caso de la mano izquierda del obstetra (cavidad en la zona de la muñeca) y, mínimamente, en los planos de la fractura de los fragmentos más pequeños.

Una vez finalizado el facsímil, se analizó en detalle la posición y las dimensiones de los pernos presentes a modo de refuerzo en las zonas de la mano izquierda del obstetra y del pie del feto, con el fin de poder colocarlos de manera idéntica (figura 292). Los resultados obtenidos mostraron una altísima similitud entre la obra original y el facsímil a escala real 1:1 (figura 293).



Figura 292. Análisis y ubicación de los pernos metálicos que conservan la obra. © Emanuel Sterp Moga.

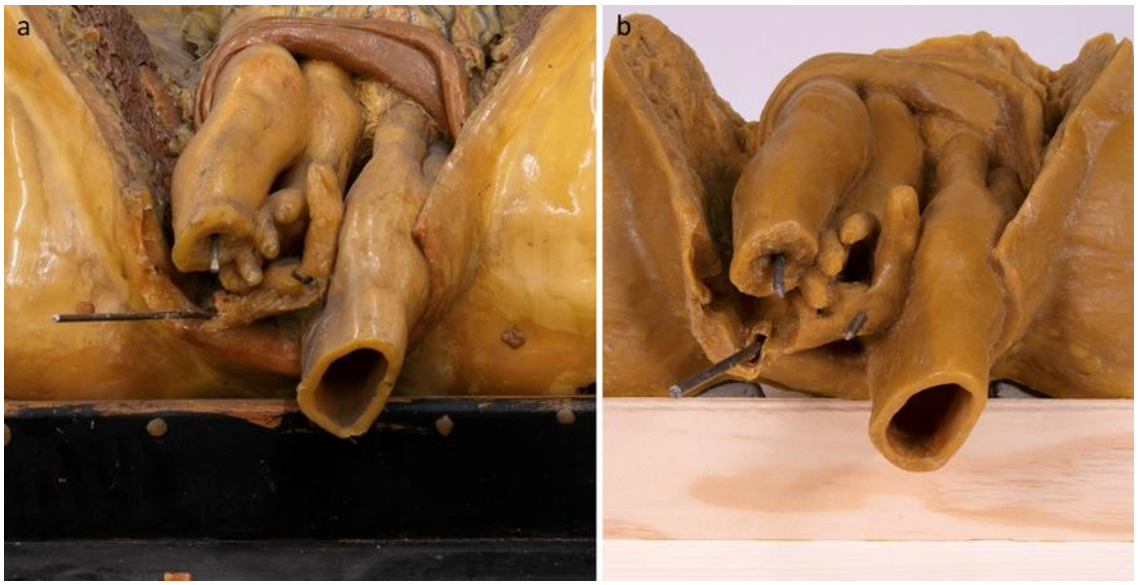


Figura 293. a) Obra real. b) Facsímil. © Emanuel Sterp Moga, Alicia Sánchez Ortiz y Óscar Hernández-Muñoz.

Una vez obtenidos los diferentes positivos, se comprobó que el material céreo mostraba un estado mordiente. Con el fin de realizar los ensayos de las adhesiones de un modo respetuoso y afín a la obra real, se consideró necesario someter el facsímil a un envejecimiento acelerado por radiación ultravioleta. Para ello, se siguió el protocolo estipulado según la norma UNE-ISO 4892-2:2014 (UNE-ISO, 2014). Se utilizaron 6 tubos fluorescentes de luz negra con una exposición

total de 500 horas (figura 294). La distribución espectral de energía osciló en un intervalo de 260-390 nm, alcanzando una radiación de 0,080 W/m^2 aproximadamente.



Figura 294. Cámara de envejecimiento acelerado. © Emanuel Sterp Moga.

6.2.2.5. Impresión 3D de las estructuras auxiliares

El valor elegido para la altura de capa de 0.1 mm resultó ser más que suficiente para reproducir con gran calidad los modelos virtuales diseñados. A pesar de que se podría aplicar una altura de capa inferior, de hasta un 0.06, es decir, con una resolución más alta, no se consideró necesario, puesto que las piezas ofrecieron unos acabados de alta calidad y una elevada consistencia. Respecto a la velocidad de impresión utilizada, de 50 mm/s, esta fue adecuada para lograr una óptima adhesión entre capas. La densidad de relleno del 100% con un patrón de *rejilla* y las posiciones en horizontal a 90º, prácticamente en todas las piezas diseñadas salvo algunas a 0º dependiendo de la complejidad del diseño de cada una de ellas, proporcionaron una alta resistencia (Véanse los apartados 3.9. y 4.10. Ensayos mecánicos de tracción y flexión en materiales termoplásticos para la impresión 3D de estructuras auxiliares) (figuras 295 y 296).

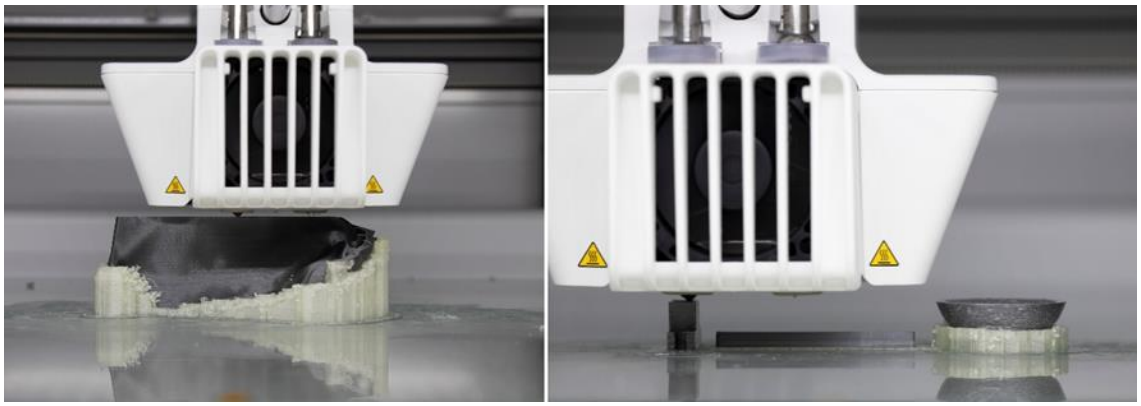


Figura 295. Proceso de impresión de las diferentes piezas que conforman las estructuras. a) Impresión individual. b) Impresión en grupo. © Emanuel Sterp Moga, Óscar Hernández-Muñoz, Javier del Río Esteban y Alicia Sánchez Ortiz.

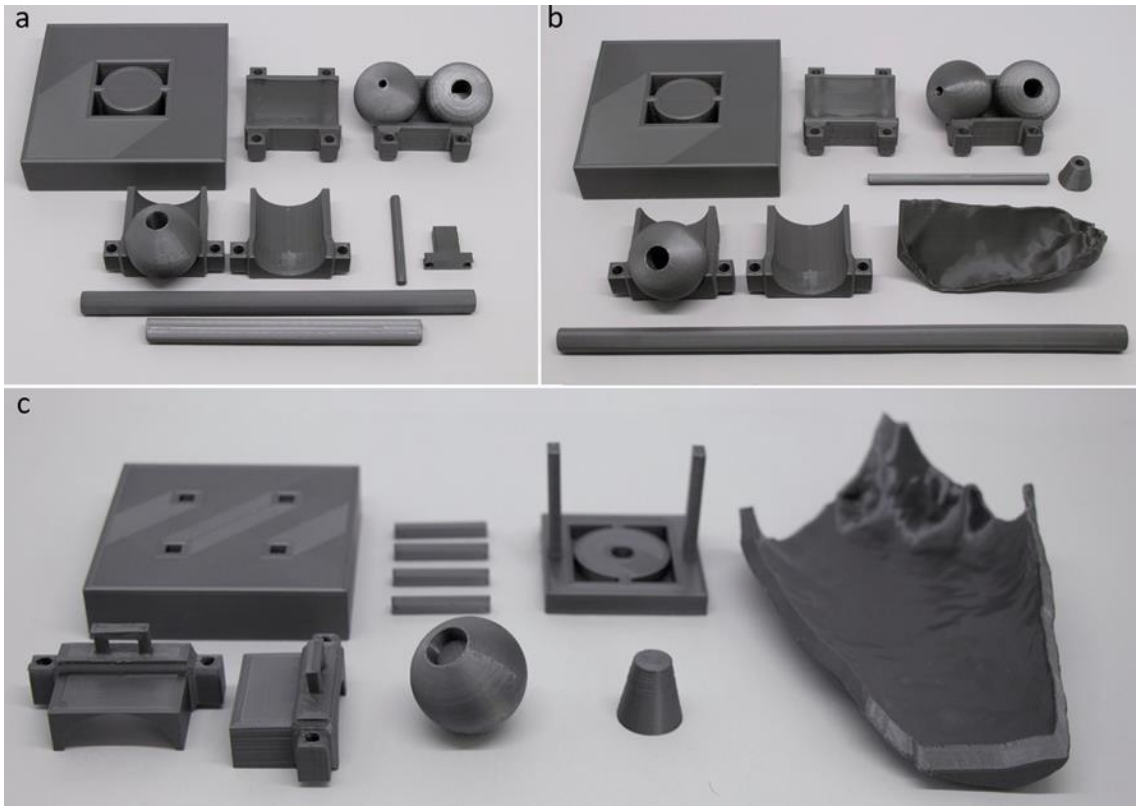


Figura 296. a) Estructuras para la adhesión de los dedos. b) Estructuras para la adhesión del pie. c) Estructuras para la adhesión de la mano. © Emanuel Sterp Moga, Óscar Hernández-Muñoz, Javier del Río Esteban y Alicia Sánchez Ortiz.

Por otro lado, se ensayaron varios tornillos con el fin de analizar la función y viabilidad de las estructuras diseñadas. Para ello, se procedió a imprimir diversos tornillos con un diámetro de 4 mm y sus correspondientes tuercas. Los resultados fueron bastante positivos; sin embargo, no se alcanzó la seguridad necesaria a la hora de poner en práctica su firmeza en las diferentes estructuras (figura 297 a). Con poco uso, tanto la rosca del tornillo como la de la tuerca se fueron desgastando rápidamente, por lo que dejaron de prestar su función de forma correcta. Por ello, se decidió desestimar la impresión de los tornillos y acudir a tornillos tradicionales. En este caso, se utilizó una varilla de rosca de 3 mm de diámetro y diferentes tuercas. A las varillas se adaptaron diversos cabezales impresos en 3D para poder manipularlas con facilidad con las manos sin

requerir de otras herramientas que podrían entorpecer el proceso (figura 297 b). Este sistema también se aplicó a las tuercas.

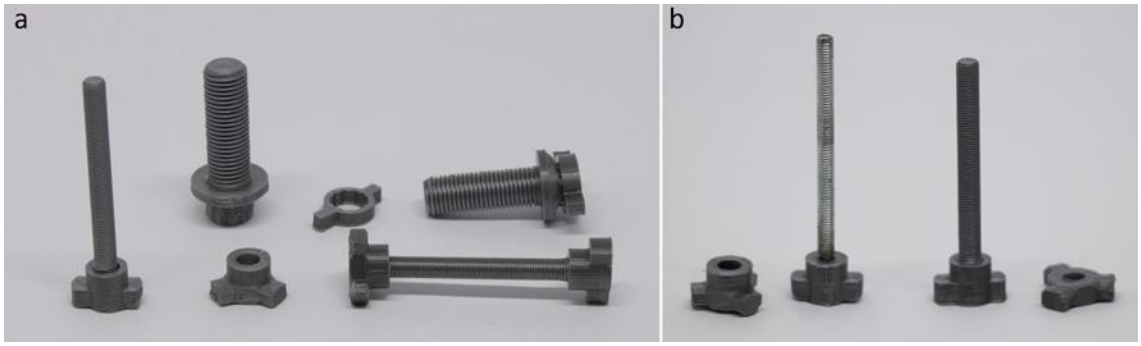


Figura 297. a) Tornillos y tuercas impresas en 3D. b) Diferencia entre el tornillo convencional y el impreso. © Emanuel Sterp Moga.

El sistema diseñado de las estructuras compuestas por la base, las abrazaderas y los tornillos, el conjunto de esferas, y los mástiles que se alojan en las esferas, proporcionaron un mecanismo fácil, seguro y preciso para estabilizar la posición deseada (figura 298).



Figura 298. Montaje de las estructuras auxiliares. © Emanuel Sterp Moga, Óscar Hernández-Muñoz, Javier del Río Esteban y Alicia Sánchez Ortiz.

6.2.2.6. Ensayo de las adhesiones en el facsímil mediante las estructuras auxiliares

Al obtener el facsímil preparado en las mejores condiciones posibles, se procedió a ensayar las intervenciones haciendo uso de las estructuras auxiliares impresas en 3D (figura 299 a y b). Los materiales utilizados para las adhesiones fueron la resina epoxídica pura Epo 155 con endurecedor K 156, añadiendo un 5% de sílice micronizado Lovel 27. El porcentaje agregado de sílice resultó necesario para proporcionar a la mezcla una ligera viscosidad con el fin de que se adaptara mejor a las irregularidades de las superficies a adherir. Se eligió esta resina para las uniones debido a que es un material que proporciona una buena capacidad de adhesión, pero, además, presenta una elevada flexibilidad, ideal para las piezas de cera. Si bien su fijación se pudo efectuar con otros materiales investigados sobre la cera como Lascaux® 443-95 o PVA (Sánchez

Ortiz, 2015), se consideró que las propiedades adhesivas no iban a ser suficientes para este caso concreto debido al elevado peso de los fragmentos.

Respecto a las reintegraciones volumétricas, se empleó una mezcla de cera microcristalina Lascaux® 443-95 (Gabbriellini et al., 2013, p.48) al 50% con cera de abeja virgen. La cera microcristalina seleccionada se consideró apropiada debido a su composición, parte de cera y parte de resina sintética como elastómero, ya que ofrece unas altas propiedades adhesivas y un óptimo comportamiento mecánico en cuanto a la flexibilidad y maleabilidad, por lo que refuerza la adhesión dotándola de una gran resistencia.

Durante la elaboración del facsímil, así como de los ensayos de adhesiones y de las reintegraciones volumétricas, las condiciones ambientales oscilaron entre 19-21ºC de temperatura y 45-55% HR.

En un primer intento y con el objetivo de asegurar un encaje preciso de cada uno de los fragmentos, se abordaron todas las adhesiones al mismo tiempo (figura 299 c). Durante el proceso se observaron ciertas dificultades. Tras adherir la mano izquierda del obstetra y el pie del feto, el hueco presente entre la mano y la obra impedía realizar la reintegración volumétrica correctamente, ya que el pie obstaculizaba cualquier acceso por la parte frontal. Se pudo acceder por la zona inferior y lateral para efectuar la reintegración volumétrica en dicha área, pero esta no resultó eficaz por la falta de zonas de acceso. Lo mismo sucedió en los casos de los dedos, pues al adherirlos todos al mismo tiempo se impedía una correcta reintegración volumétrica posterior del dedo corazón y anular.



Figura 299. a y b) Preparación del ensayo de intervención. c) Ensayo de adhesión con todos los fragmentos a la vez. © Emanuel Sterp Moga.

Analizados los resultados de este primer intento, se consideró imprescindible adherir cada fragmento individualmente para poder asegurar una correcta adhesión y reintegración volumétrica. Por tanto, se efectuó cada una de las adhesiones por separado, primero la mano izquierda del obstetra; en segundo lugar, el pie del feto; en tercer lugar, el dedo corazón; en cuarto lugar, el dedo anular y, por último, el dedo meñique. Se estimó necesario dejar un periodo de tiempo entre cada proceso de adhesión y reintegración volumétrica de 48 horas, para que el adhesivo curara y que la nueva cera aplicada solidificase.

Comenzando con la adhesión de la mano, en primer lugar, se procedió a ubicar con la máxima precisión posible el fragmento en su sitio de origen (figura 300 a y b). Posteriormente, se colocó el soporte correspondiente para sujetar y ubicar milimétricamente la mano (figura 300 c). La estructura diseñada permitió un amplio movimiento de la plataforma que sustenta la mano gracias a la esfera que se aloja en las abrazaderas. El soporte recogió de modo exacto el volumen de la mano, a excepción de una pequeña parte. Durante la simulación, se observó que una de las

esquinas del soporte, ubicada en la zona superior izquierda, rozaba con el modelo de cera mínimamente. Por tanto, se procedió a corregir esta pequeña imperfección lijando la superficie con el fin de evitar posibles abrasiones en la cera. Una vez establecida la posición, se aseguró con la ayuda de los tornillos presentes en las abrazaderas la estabilidad de la mano, impidiendo cualquier movimiento durante la adhesión. Mediante el tornillo que permite elevar la esfera y, con ello, todo el sistema de la abrazadera, el soporte de la mano se pudo subir para ajustarlo en la posición exacta como se requería.

Tras ubicar la mano en su posición de origen, se procedió a aplicar el adhesivo por goteo en la zona donde se alojaban los pernos metálicos (figura 300 d). Transcurridas las 48 horas del curado del adhesivo, con el fin de asegurar la estabilidad del conjunto escultórico, se procedió a reintegrar volumétricamente la zona, ya que presentaba una separación considerable debido a la falta de material. Para ello, se colocó una pared fina de cera de abeja a modo de tope en la zona hueca con el fin de evitar que la nueva cera se expandiera más allá del área requerida (figura 301 a y b). Una vez establecida, se reintegraron volumétricamente las cavidades inyectando la pasta de cera compuesta por un 50% de cera microcristalina Lascaux® 443-95 y otro 50% de cera de abeja virgen (figura 301 c). La temperatura de la nueva cera incorporada fue alrededor de 60ºC. Se dejaron otras 48 horas con el propósito de que la pasta de reintegración fuera solidificando (figura 301 d) y, posteriormente, se aplicó una capa de cera de abejas para igualar el tono de la obra, ya que la nueva cera adquirió un acabado más blanquecino (figura 301 e y f). El material ceroso colocado a modo de tope se retiró después con facilidad. Finalmente, zonas puntuales de la reintegración volumétrica se retocaron con la ayuda de la micro-espátula térmica a una temperatura de 50ºC.

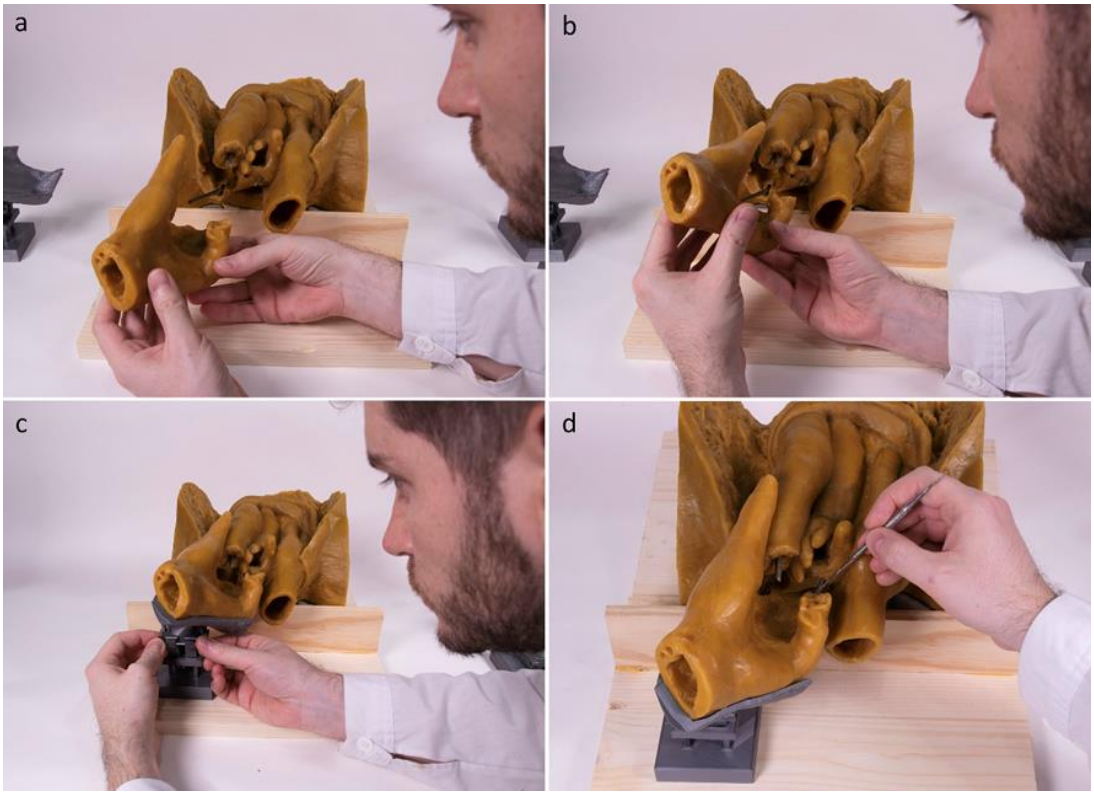


Figura 300. Proceso de adhesión de la mano izquierda del obstetra. a y b) Ubicación de la mano en su sitio de origen. c) Ajuste de la posición exacta mediante la estructura auxiliar. d) Aplicación de adhesivo en los pernos metálicos. © Emanuel Sterp Moga.

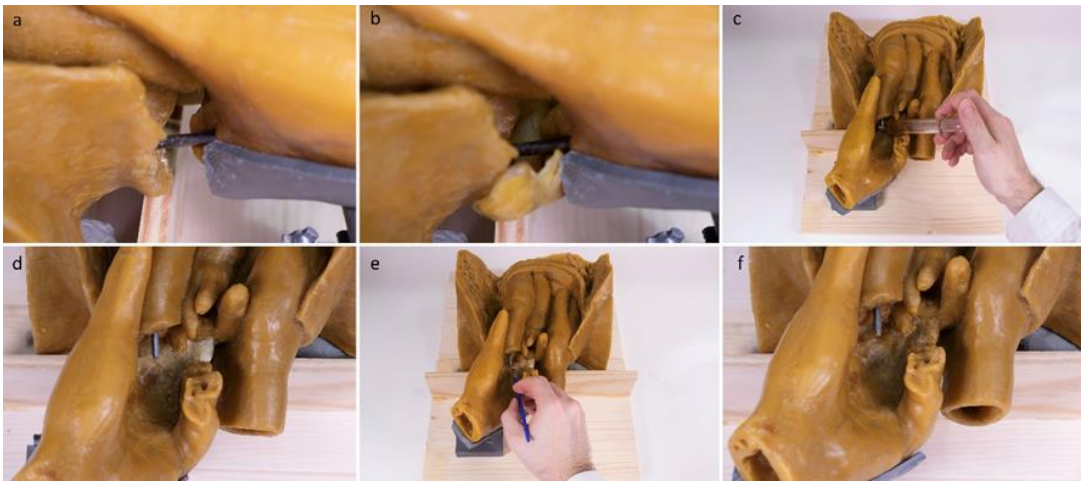


Figura 301. a) Espacio presente entre la mano y la obra debido a la falta de cera. b) Colocación de una barrera de cera para evitar que la nueva cera se expanda durante el vertido. c) Aplicación de la cera en el hueco presente entre la mano y la obra. d) Resultado de la reintegración volumétrica. e) Aplicación de cera de abejas para igualar el tono cromático. f) Resultado final de la adhesión y la reintegración cromática. © Emanuel Sterp Moga.

En cuanto a la adhesión del pie, el proceso resultó ser menos complejo que el de la mano. Durante la colocación de este en la plantilla que lo sujeta, también se apreció que el fragmento de cera rozaba mínimamente en una zona concreta de la misma, en la esquina inferior derecha. Por tanto, se procedió a lijar esta pequeña parte para evitar que se dañara la escultura cerosa. Una vez solventado el problema, el soporte encajó perfectamente, proporcionando una gran estabilidad al pie. En el transcurso del ensayo, la estructura permitió trabajar con agilidad y seguridad (figura 302 a, b y c).

Tras aplicar un punto de adhesivo sobre el perno metálico en la parte donde encaja en el pie, se apreció una pequeña separación fruto de las irregularidades que presentan las superficies de contacto. Por ello, se procedió a reintegrar volumétricamente inyectando la pasta de cera microcristalina Lascaux® 443-95 en un 50% con otro 50% de cera de abeja virgen (figura 25 d) después de que curara el adhesivo. Finalmente, la reintegración volumétrica se repasó con la ayuda de una micro-espátula térmica para igualar el tono de la cera del facsímil (figura 302 e y f).

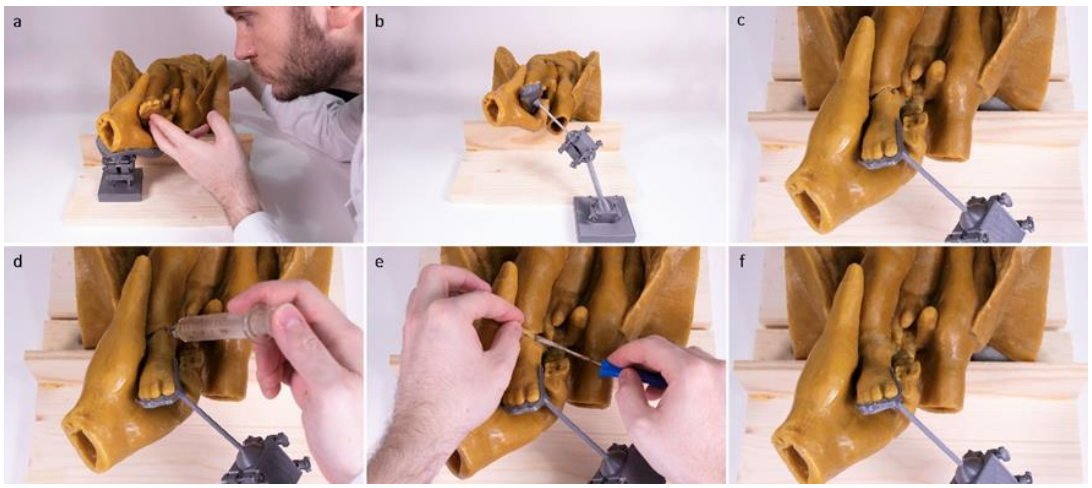


Figura 302. Proceso de adhesión del pie. a) Ubicación del pie a su zona de origen. b y c) Aplicación y sujeción del pie mediante la estructura auxiliar. d) Aplicación de la cera en los huecos presentes en la unión. e) Aplicación de cera de abejas para igualar el tono cromático. f) Resultado final de la adhesión y la reintegración volumétrica. © Emanuel Sterp Moga.

Respecto al proceso de adhesión de los dedos, en primer lugar, se adhirió el dedo corazón, posteriormente, el dedo anular y, finalmente, el dedo meñique. La estructura permitió ubicar con gran precisión cada elemento a unir. Asimismo, el cabezal dotado de una cinta elástica sujetó con seguridad los dedos. En el caso del dedo corazón, se consideró imprescindible alojar en su interior una espiga de fibra de vidrio, ya que la zona requirió de una mayor resistencia al insertar el perno metálico ubicado en la falange media del dedo índice (figura 303 a). Respecto al dedo anular, teniendo en cuenta sus dimensiones, también se valoró la colocación de la fibra de vidrio para ofrecer mejor estabilidad. En cuanto al dedo meñique, dadas las dimensiones tan pequeñas de este, no se consideró necesaria su incorporación (figura 303 b). En los tres fragmentos se aplicó una gota de resina para adherirlos. Por último, como en los casos anteriores, una vez concluida la adhesión se procedió a reintegrar volumétricamente las pequeñas zonas de unión.

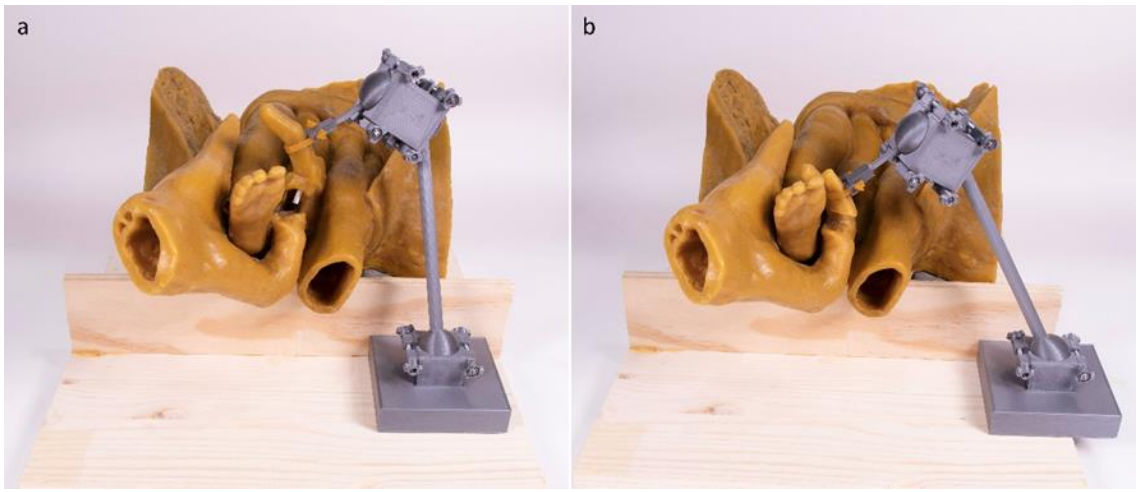


Figura 303. Proceso de adhesión de los dedos. a) Ubicación del fragmento perteneciente al dedo corazón para la adhesión. b) Ubicación del dedo meñique para su adhesión. © Emanuel Sterp Moga.

Tras finalizar las intervenciones (figura 304) y con la finalidad de poder analizar el nivel de similitud que presenta el facsímil respecto a la anastilosis virtual realizada inicialmente, se procedió a calcular los rangos de error mediante los *mapas de distancias*. Para ello, se escaneó el facsímil por medio de la máquina Artec Space Spider. En gran parte de la superficie, el rango de error medio osciló -0.12 mm hasta 0.11 mm (figura 305). Ello reflejó un grado de similitud muy alto con el original.



Figura 304. a) Estado inicial del facsímil. b y c) Resultado final tras realizar las adhesiones de los fragmentos y las reintegraciones volumétricas (Ver modelo 3D). © Emanuel Sterp Moga.

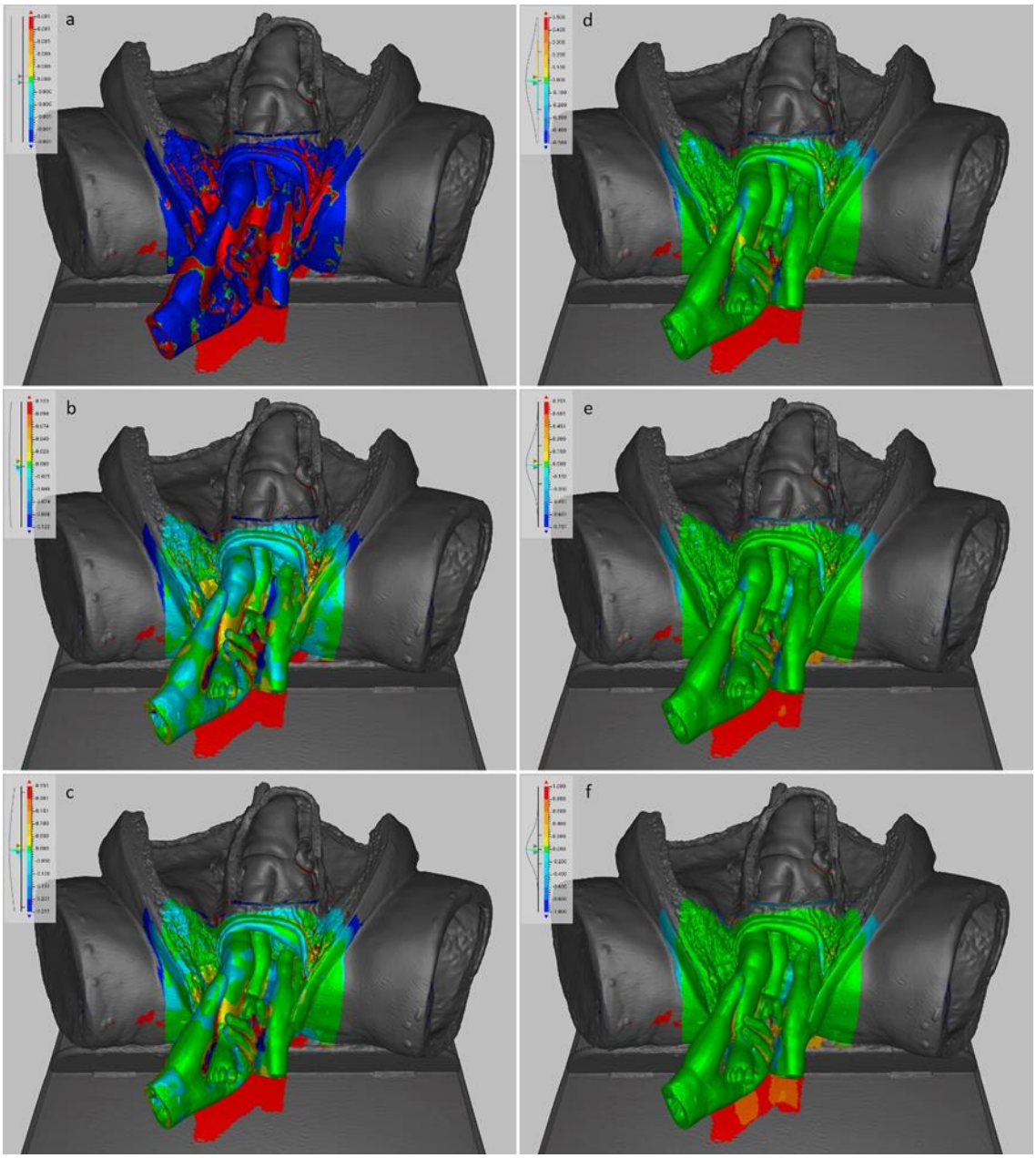


Figura 305. Medición de la diferencia volumétrica entre el modelo obtenido con la anastilosis virtual y el facsímil obtenido tras finalizar los tratamientos de adhesión mediante *mapas de distancias*. a) Distancia 0.001 mm. b) Distancia 0.123 mm. c) Distancia 0.251 mm. d) Distancia 0.500 mm. e) Distancia 0.751 mm. g) Distancia 1 mm. © Emanuel Sterp Moga.

Por último, transcurrido seis meses después de los tratamientos, con el fin de comprobar la reversibilidad de los materiales aplicados, se procedió a retirar los fragmentos adheridos del facsímil. La pasta de cera mostró una alta reversibilidad, ya que en su composición la cantidad de resina proporciona cierta maleabilidad. Con la ayuda de diferentes sondas y mini-espátulas, se logró retirar todo el material aplicado. En cuanto a la resina epoxídica utilizada en los pernos, también mostró una gran reversibilidad, puesto que aplicando una determinada fuerza de tracción sobre las piezas se conseguía separarlas.

6.2.3. Intervención en la obra real

Los tratamientos de la obra real se llevaron a cabo según la metodología experimentada en el facsímil, ya que los resultados obtenidos fueron muy satisfactorios. Se emplearon los mismos materiales, en el caso de las adhesiones, la resina epoxídica pura Epo 155 con endurecedor K 156 con un 5% de sílice micronizado Lovel 27, y para las reintegraciones volumétricas, la pasta de cera compuesta por un 50% de cera de abejas virgen con un 50% de cera microcristalina Lascaux® 443-95. Su aplicación se hizo con ayuda de jeringas, micro-espátula térmica y diversas pinzas y sondas (Sterp Moga et al., 2022b).

A diferencia del facsímil, en los pernos metálicos de la obra real se consideró necesario aplicar dos capas de papel japonés mediante Paraloid® B72 en acetona con un doble propósito. El primero, para proteger el perno metálico de la nueva cera y adhesivo a aplicar y, el segundo, con la intención de crear una superficie que asegurara mayor agarre a la cera (figura 306 a).

En cuanto al orden de las adhesiones, también se siguió el mismo método llevado a cabo en el facsímil. Primero, se ubicó la mano izquierda del obstetra (figuras 306 y 307); en segundo lugar, el pie del feto (figura 308); posteriormente, el dedo corazón; en cuarto lugar, el dedo anular y, por último, el dedo meñique (figura 309). Respecto a la adhesión y reintegración volumétrica también se dejó transcurrir un periodo de tiempo de 48 horas.

Durante los tratamientos no se produjeron imprevistos más allá de los detectados en el ensayo del facsímil que ayudaron a evitar posibles percances. Las intervenciones llevadas a cabo fueron muy precisas, seguras y con unos tiempos de actuación bastante más reducidos, ya que el aprendizaje en el facsímil facilitó enormemente la metodología operativa y los medios necesarios (figura 310). Por último, las condiciones ambientales en el museo durante las intervenciones fueron de entre 19-20ºC de temperatura y 50-55% de humedad relativa.



Figura 306. Proceso de adhesión de la mano del obstetra. a) Aplicación del adhesivo en el hueco donde se aloja el perno metálico. b) Ajuste de la posición y altura de la estructura. c) Posición establecida. d) Inyección de la cera en los huecos faltantes. e) Modelado de la reintegración volumétrica realizada. f) Ajuste cromático de la reintegración volumétrica con cera de abejas. © Alicia Sánchez Ortiz y Emanuel Sterp Moga.



Figura 307. Proceso de adhesión de la mano del obstetra. a) Hueco presente entre la mano y la obra. b) Colocación de una pared de cera en la zona necesaria a reintegrar. c) Aplicación de la cera por inyección. d) Proceso de aplicación finalizado. e) Modelado de la reintegración volumétrica. f) Ajuste cromático de la reintegración volumétrica con cera de abejas. © Alicia Sánchez Ortiz y Emanuel Sterp Moga.



Figura 308. a) Proceso de adhesión del pie. b) Aplicación del adhesivo sobre el perno metálico. c) Ajuste de la posición y altura de la estructura. d) Posición establecida. © Alicia Sánchez Ortiz y Emanuel Sterp Moga.



Figura 309. a) Proceso de adhesión de los dedos. a) Ubicación del dedo corazón. b) Ubicación del dedo anular. c) Aplicación del adhesivo en la espiga de fibra de vidrio perteneciente al dedo anular. d) Posición establecida. © Alicia Sánchez Ortiz y Emanuel Sterp Moga.

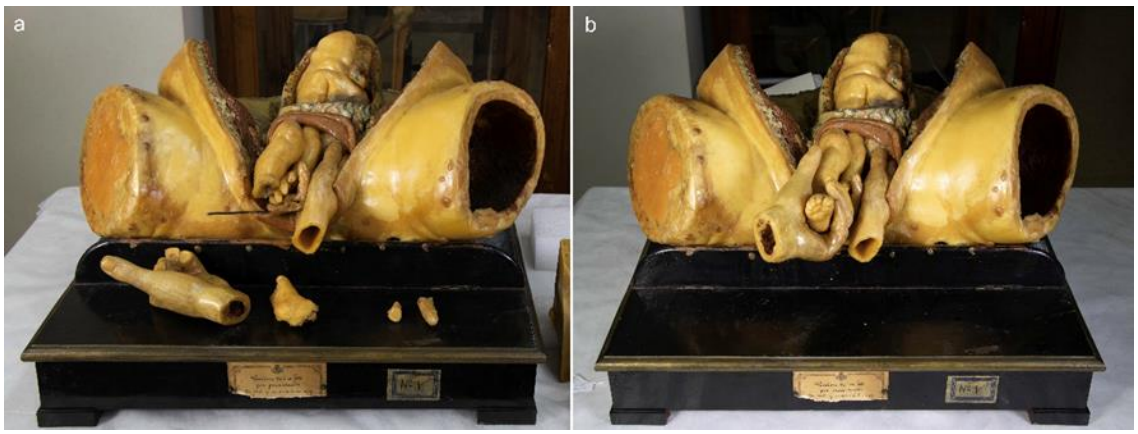


Figura 310. a) Estado inicial de la obra antes de intervenir. b) Estado actual tras realizar la intervención. © Emanuel Sterp Moga.

6.2.4. Resultados y discusión

La utilización de las técnicas digitales 3D, basadas en la digitalización, modelado digital e impresión 3D, han demostrado ser unas herramientas alternativas eficaces para el análisis de intervenciones, diseño de estructuras y moldes, así como la elaboración del facsímil y los posteriores ensayos de los tratamientos.

La obtención del modelo escaneado ha sido un proceso trascendental, ya que ha permitido efectuar numerosos estudios para encontrar las mejores soluciones a implementar en los tratamientos de restauración. La alta resolución alcanzada de 0.2 mm en el modelo principal y 0.1 en los diferentes fragmentos, ha posibilitado registrar con gran detalle todos los elementos

anatómicos, un factor determinante para la creación de los moldes y estructuras auxiliares. Asimismo, el análisis de la anastilosis virtual ha permitido estudiar con detalle la orientación de los fragmentos, proceso que ha servido para comprender y analizar exactamente la posición de cada uno de ellos.

Comenzando con los moldes virtuales, la morfología de cada pieza que los constituye, junto a las diferentes llaves ubicadas de manera estratégica, han sido claves para poder unirlos con precisión y asegurar un proceso de desmoldeo fácil y seguro. La impresión por medio del material PLA Tough, apenas ha registrado las líneas generadas por la orientación de la deposición del filamento gracias al ángulo establecido a 45º, siendo prácticamente inapreciable en la mayor parte de las superficies. En este caso, el uso del PVA como material de soportes también ha facilitado la producción de mínimos detalles, aunque con el ángulo establecido apenas se requirieron sobre las superficies del molde a reproducir, siendo ubicados todos prácticamente en el exterior del modelo.

En cuanto a la creación del facsímil, la metodología desarrollada mediante las técnicas digitales 3D, ha resultado ser mucho más rápida, si la comparamos con un procedimiento tradicional, es decir, modelado de la pieza en barro o plastilina profesional, y luego la generación de moldes en silicona y el posterior positivado en cera.

El sistema utilizado, a fin de reforzar los moldes con las cintas elásticas y la plastilina colocada en las juntas, ha dotado al conjunto de una gran estabilidad. Ello ha permitido que en el transcurso del proceso del vertido de la cera y los diferentes movimientos necesarios para hacer llegar el material a todos los rincones del molde, el proceso fuera seguro. En cuanto al vertido de la cera por capas, ha dotado al positivo de una gran fusión y resistencia.

Respecto al proceso de desmoldeo, el diseño de cada pieza del molde en relación con la posición y a los ángulos, junto con el empleo de la vaselina, han facilitado enormemente el proceso sin sufrir complicaciones. Ello ha evitado crear alteraciones en el positivo de cera por las posibles adhesiones del material a los moldes o debido a la falta de espacio para retirar cada pieza encajada. La calidad obtenida en la impresión de los moldes se ha reflejado en el positivo de cera, plasmando todos los detalles superficiales con una alta precisión y calidad. Los *mapas de distancias* han corroborado la gran fidelidad y exactitud que presenta el facsímil frente a la obra real.

La creación del facsímil ha permitido probar diferentes soluciones metodológicas para comprobar la mejor opción para tener en cuenta en los tratamientos en la obra real. En primer lugar, se ha podido experimentar sobre la fragilidad y maleabilidad que presenta la cera tras obtener el positivo. Su estado mordiente llevó a considerar necesario acelerar el envejecimiento de manera artificial para que la cera tuviera mayor parecido a la cera original antes de realizar las adhesiones. De haber realizado las adhesiones en el momento de la obtención del facsímil, los resultados y la experiencia hubieran sido muy diferentes, ya que el contacto entre piezas presentaba una gran capacidad de adhesión debido al estado mordiente de la cera. Todo ello, ha permitido conocer mejor las propiedades del material ceroso y su comportamiento frente a las manipulaciones necesarias durante las intervenciones.

Por otro lado, el facsímil ha permitido determinar el orden necesario de las operaciones, tras un primer intento de adherir todos los elementos a la vez. Los constantes análisis acerca de la

ubicación exacta y manejo de las piezas durante los ensayos han sido muy reveladores, ya que una inadecuada colocación de algún fragmento, por minuciosa que sea, alteraría la posición y encaje de las demás partes.

Gracias a la determinación del peso exacto de cada fragmento, se han podido analizar y ensayar los puntos de adhesión necesarios con rigor, así como la ubicación de las espigas para asegurar su estabilidad. Asimismo, se ha podido comprobar la gran resistencia y seguridad de cada una de las uniones tras establecer un intervalo de tiempo de 48 horas entre cada proceso.

Respecto al modelado digital de las estructuras auxiliares han permitido generar piezas que se adaptan milimétricamente a las superficies del volumen y que permiten una gran combinación entre ellas. La impresión 3D de las mismas, se ha beneficiado por el empleo de los dos extrusores, dada la complejidad geométrica que presentan. Ello ha contribuido a que el material PVA utilizado para los soportes refuerce la impresión en los puntos complejos, siendo prácticamente todos los soportes retirados con facilidad de manera mecánica, sin dañar la impresión. En las zonas de pequeño tamaño o formas complejas, donde resultó imposible retirar el material del soporte de manera mecánica, este se disolvió gracias a su sumersión en agua. Con ello, se obtuvieron piezas de altísima calidad con un acabado perfecto. El PLA ha ofrecido una gran resistencia y precisión en cada una de las piezas que las conforman gracias a las características de impresión establecidas en cuanto a la posición horizontal a 90º prácticamente en todas ellas, con el patrón de *rejilla* y con una densidad de relleno del 100%.

Las bases que sustentan la estructura y que permiten alojar en su interior el conjunto de abrazaderas han demostrado ser un sistema muy rígido y eficaz. El sistema articulado mediante las esferas, se adaptaron perfectamente a las zonas correspondientes entre las abrazaderas, proporcionando estas una gran firmeza. Respecto a las abrazaderas que recogen las dobles esferas, resultaron ser muy fáciles de manejar, permitiendo sujetar con gran fuerza dichas esferas en una determinada posición gracias a los tornillos incorporados. Por otro lado, los mástiles que se alojan en las esferas también ofrecieron una enorme resistencia y posibilitaron el acoplamiento a la zona hueca de la esfera con una gran precisión y seguridad. La variedad de piezas, incluyendo distintos cabezales y diferentes tamaños en los mástiles, ha permitido múltiples combinaciones entre ellos, ofreciendo un amplio abanico de opciones para alcanzar la posición correcta en cada tratamiento.

En relación con la pieza del soporte que se adapta a cada uno de los fragmentos que es preciso fijar, la impresión 3D permitió fabricar con exactitud las necesarias para cada caso concreto. De esta forma se pudo conseguir un ajuste perfecto que no se hubiera logrado de otra manera. Todo el sistema diseñado ha resultado ser un proceso bastante rápido en cuanto al montaje y desmontaje de las estructuras.

La simulación y comprobación de la efectividad de las estructuras en el facsímil han sido clave con la finalidad de evaluar la seguridad que proporcionan. Aparte de probar su rendimiento, también han servido para detectar pequeños errores que se han corregido para garantizar de esta manera una adecuada seguridad y precisión antes de la intervención en la obra real. En todo momento mediante estos sistemas se han asegurado los fragmentos en su posición exacta.

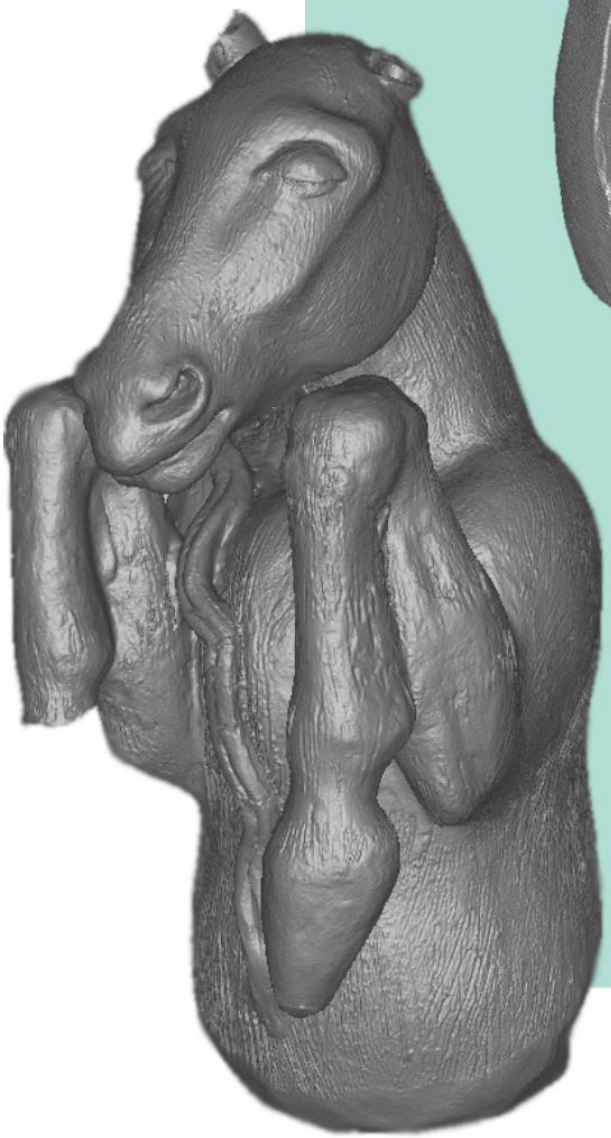
Respecto a los materiales empleados, la resina epoxídica pura Epo 155 con endurecedor K 156 y la adición de un 5% de sílice micronizado, Lovel 27, así como la pasta de cera compuesta por un 50% de cera de abejas virgen con un 50% de cera microcristalina, Lascaux® 443-95, han

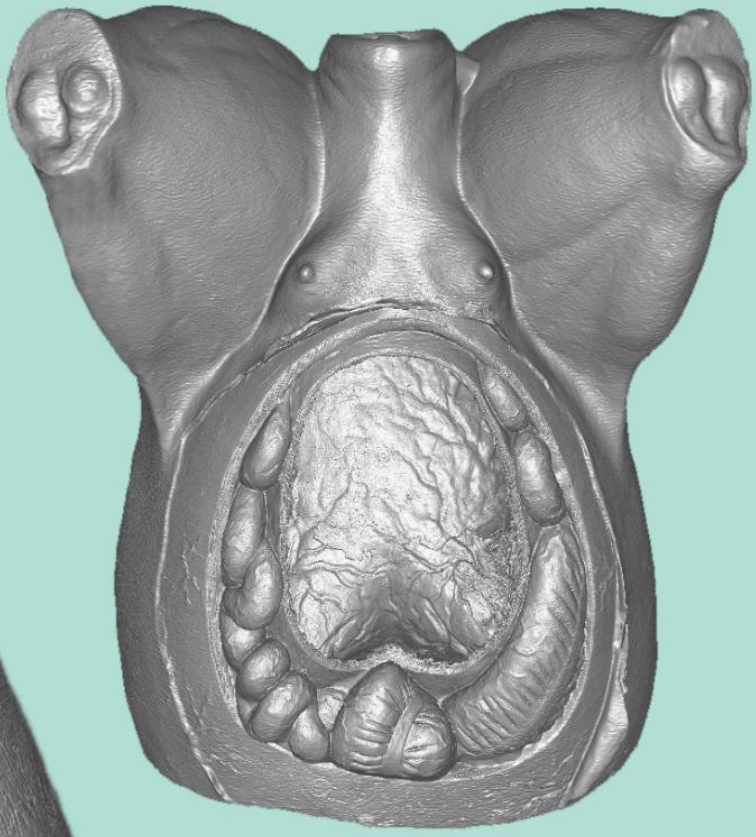
resultado ser altamente compatibles con el material ceroso, quedando patente su eficacia y alta reversibilidad.

Durante los tratamientos en la obra real, las adhesiones de los diferentes fragmentos se han mostrado estables, aunque la estabilidad completa de la zona tratada solo se ha logrado después de realizar la reintegración volumétrica, sobre todo en la parte de la mano izquierda del obstetra. La decisión de incorporar el dedo corazón, a pesar de no conservarse el original, se tomó al ser este elemento una pieza clave para la estabilidad estructural de la mano, ya que en su interior se ha insertado el perno metálico proveniente del dedo índice. Respecto a los tiempos establecidos de 48 horas entre cada tratamiento, han proporcionado unos resultados óptimos.

CASO 3

GESTACIÓN DE YEGUAS





Museo Veterinario Complutense

Digitalización e impresión 3D para la reconstrucción de elementos estructurales

6.3. Caso 3: Gestación de yeguas. Museo Veterinario Complutense. Digitalización e impresión 3D para la reconstrucción de elementos estructurales

El tercer caso de estudio se refiere a dos modelos anatómicos, *Gestación de yeguas, Pelvis equina con útero abierto, presentación posterior* (n.º Ref.: MV-681) y *Pelvis equina con útero abierto, presentación anterior* (n.º Ref.: MV-683), construidas por el vice-catedrático de anatomía Cristóbal Garrigó en el Laboratorio de piezas de cera del Real Colegio Veterinario de Madrid, en el siglo XIX. El primer modelo tiene unas dimensiones de 55,8 x 42,8 x 26,9 cm y el potro mide 23,1 x 10,3 x 13,8 cm (figura 311 a); en cuanto al segundo, sus dimensiones son 56,6 x 43,1 x 27,1 cm la yegua y 21,5 x 13,2 x 14,1 cm la figura del potro (figura 311 b). Ambas obras están ubicadas en el Museo Veterinario Complutense de la Facultad de Veterinaria (UCM). La presente investigación surgió a raíz del proyecto I+D: *La ceroplástica en Veterinaria: documentación, caracterización de materiales y métodos de conservación y restauración en la colección Complutense*, Ref.: HAR2013-42460.

Cada uno de estos modelos anatómicos representa una etapa diferente del proceso de gestación de la yegua. El primer modelo muestra una de las posiciones más difíciles que el veterinario puede encontrarse dentro del útero durante el parto, ya que la cabeza está ubicada hacia los cuernos uterinos, lo que impide su salida en la dirección del canal de parto (figura 311 a). El segundo, plasma una de las primeras etapas del parto donde el potro está colocado con la cabeza hacia el cuello uterino, es decir, en la posición correcta (figura 311 b).



Figura 311. Estado de conservación inicial de la *Gestación de yeguas*. a) *Pelvis equina con útero abierto, presentación posterior*. b) *Pelvis equina con útero abierto, presentación anterior*. © Luis Castelo.

6.3.1. Estado de conservación de las dos gestaciones de yeguas

Ambos modelos anatómicos han sufrido deterioros constantes debido a la funcionalidad didáctica que tuvieron en origen. A ese uso, se suma el desamparo que han padecido a causa de los cambios metodológicos en la enseñanza, lo que llevó a que estas herramientas terminarán por ser retiradas de las aulas y acabarán olvidadas en sótanos o almacenes sin las condiciones mínimas de conservación. Las dos esculturas presentaban un crítico estado de conservación.

Los diversos tratamientos relativos a la limpieza de particulado atmosférico depositado en la superficie escultórica, la remoción de las películas filmógenas de recubrimiento no originales, así como la adhesión de gran parte de los fragmentos y las reintegraciones volumétricas en los potros, se llevaron a cabo dentro del proyecto I+D mencionado anteriormente (Rodríguez González de Canales, 2023). No obstante, una de las intervenciones más complejas se encontraba en la parte correspondiente a la membrana amniótica. Dada la dificultad que suponía realizar dicho tratamiento, se consideró necesario efectuar su intervención en el momento en el que se dispusiera de los medios más adecuados.

La membrana amniótica es un tejido muy fino, semitransparente, ubicado entre la placenta y el potro. Dichas membranas prácticamente no se conservan debido a las múltiples fracturas que han sufrido (figura 312). Estas piezas resultan ser claves, ya que la figura del potro en cada una de las esculturas se apoyaba en origen sobre ellas adoptando una determinada posición. Su extremada fragilidad se debe al espesor tan fino que presentaba, entre 0.6 y 1.2 mm aproximadamente, compuestas por dos láminas de cera (figura 313). La estabilidad estructural que proporcionó resultó ser poco eficaz, puesto que las numerosas manipulaciones y golpes ocasionados durante su uso en las aulas ocasionaron la aparición de grietas, fracturas y pérdidas volumétricas. La reconstrucción de estas partes dañadas se consideró esencial para poder reubicar los potros en su posición original y de ese modo completar el conjunto escultórico recuperando su significado.

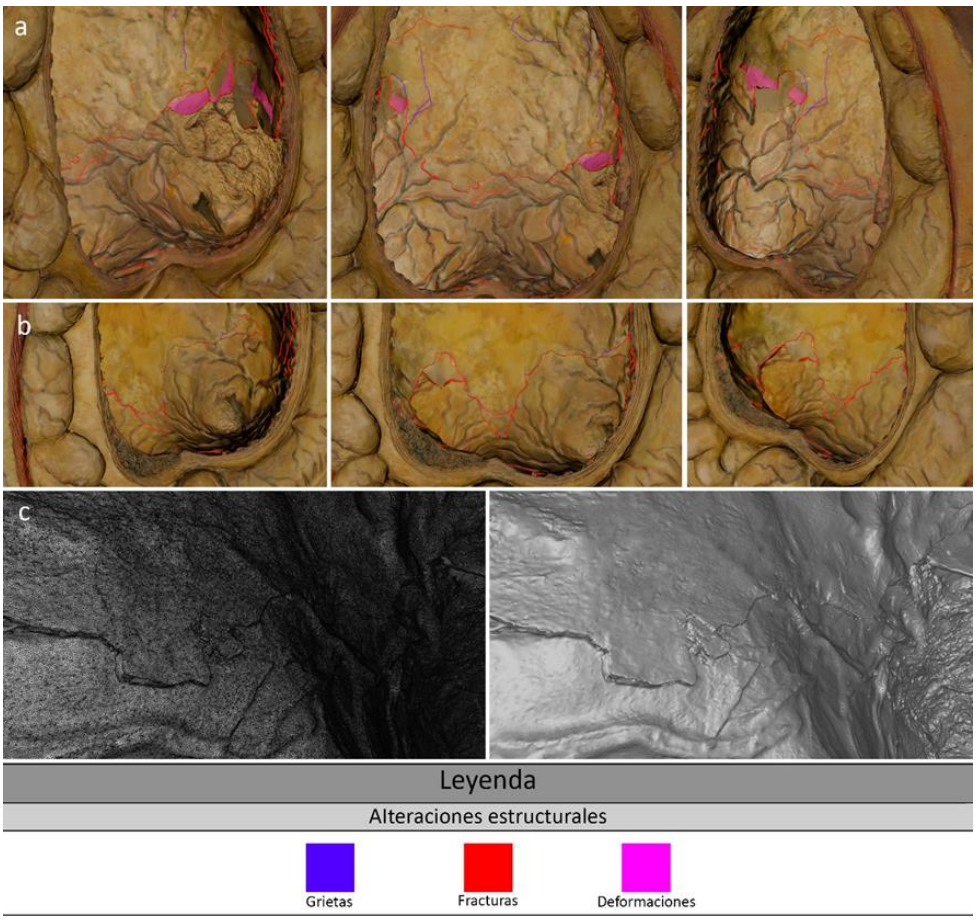


Figura 312. Cartografías de patologías estructurales 3D de la *Gestación de yeguas*. a) *Pelvis equina con útero abierto, presentación posterior*. b) *Pelvis equina con útero abierto, presentación anterior*. c) Detalle de las fracturas registradas en la malla. © Emanuel Sterp Moga.

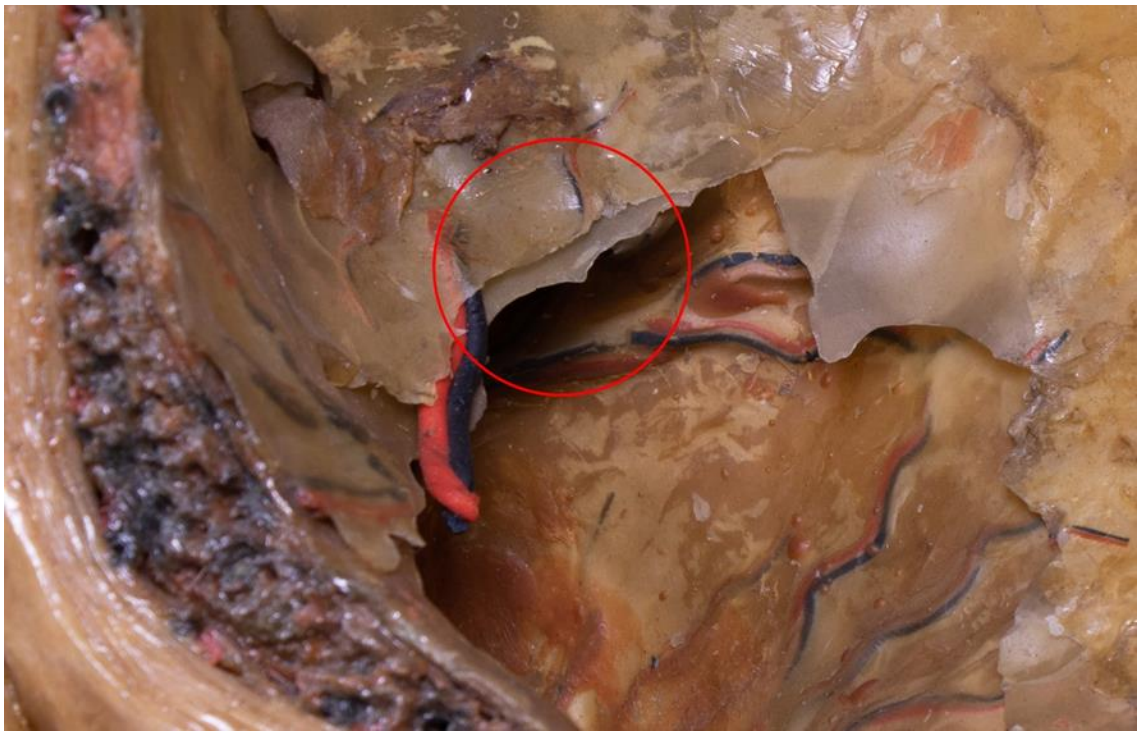


Figura 313. Detalle de las dos capas de cera que compone la membrana amniótica. © Emanuel Sterp Moga.

Ante la problemática descrita, la tarea encomendada y el objetivo principal fue reconstruir las membranas amnióticas, adaptándolas con la máxima precisión posible y rigor a fin de poder ubicar cada elemento en su sitio de origen. Ante la complejidad técnica que suponía abordar dichos tratamientos, fue necesario recurrir a los sistemas digitales 3D basados en la digitalización, modelado virtual e impresión 3D para asegurar una alta precisión y seguridad en la reconstrucción volumétrica.

La primera tarea consistió en digitalizar las piezas mediante los escáneres de luz estructurada Artec Eva y Artec Space Spider. Concluida esta fase, y una vez procesados los modelos, se realizaron diferentes estudios sobre su técnica constructiva con el fin de poder comprender mejor la manufactura empleada en cada caso. Por otro lado, se efectuaron diversos análisis virtuales sobre la posición exacta que los potrillos adquirían durante el parto. Posteriormente, se modeló en 3D la membrana amniótica, adaptándose perfectamente a la superficie volumétrica de cada obra y se diseñó el molde. La siguiente fase consistió en imprimir en 3D los moldes generados para poder, finalmente, positivar en cera dichas membranas y ubicarlas en la obra real.

6.3.2. Creación de las membranas amnióticas pérdidas

6.3.2.1. Digitalización 3D

Los modelos obtenidos mediante los escáneres Artec Eva y Artec Space Spider (figura 314), mostraron una altísima calidad (figura 315). En la tabla 20 se recogen las características de las mallas obtenidas.

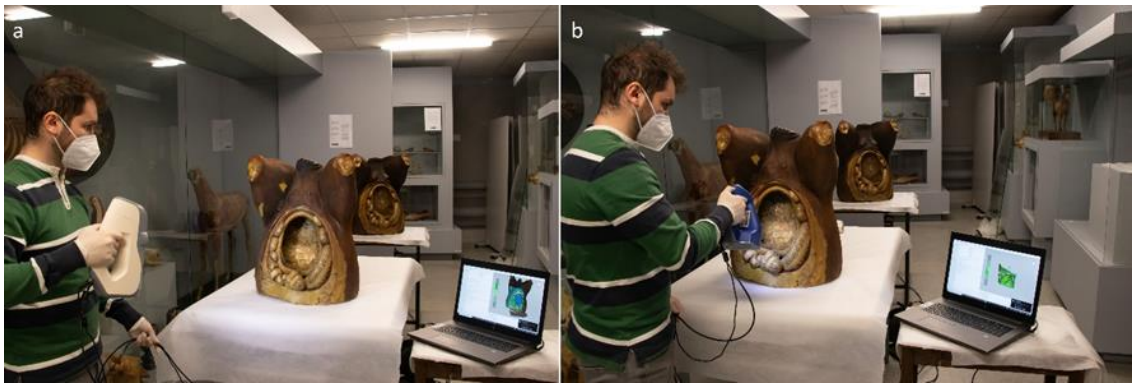


Figura 314. Proceso de escaneado de la *Gestación de yeguas*. a) Escaneado general con Artec Eva. b) Escaneado de detalle con Artec Space Spider. © Alicia Sánchez Ortiz.

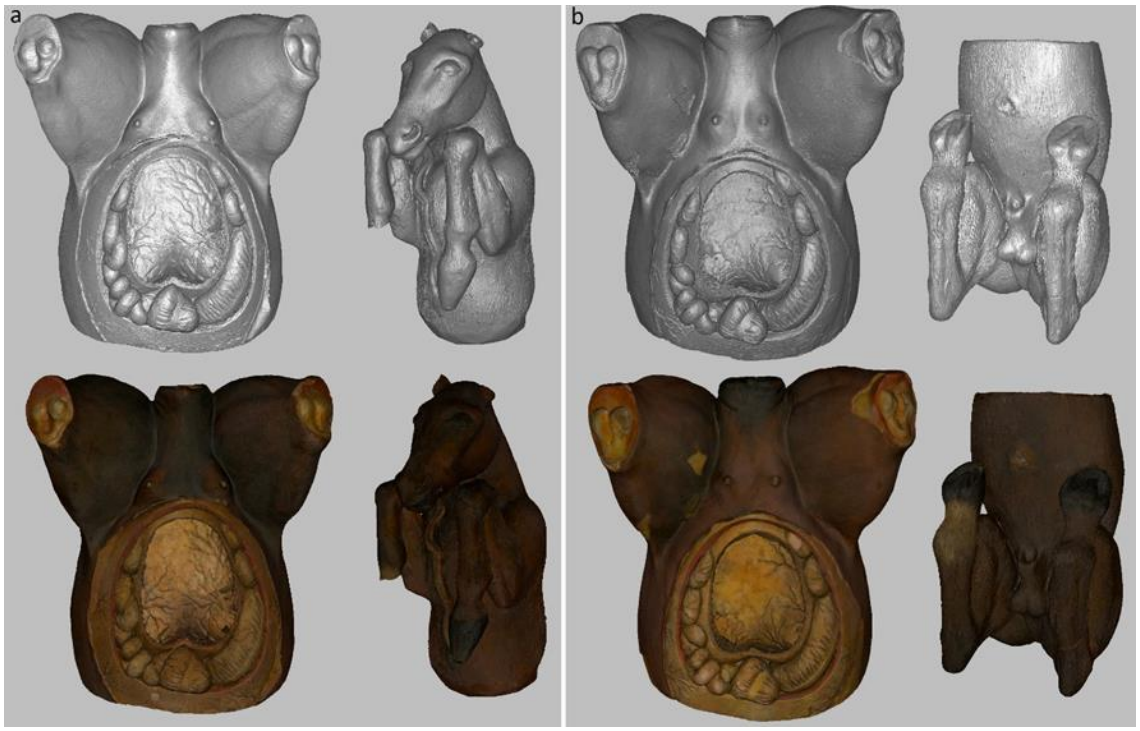


Figura 315. Modelos escaneados de la *Gestación de yeguas*. a) *Pelvis equina con útero abierto, presentación posterior*. b) *Pelvis equina con útero abierto, presentación anterior*. © Emanuel Sterp Moga.

Obra	Modelo	Escáneres	Resolución	Polígonos
Pelvis equina con útero abierto, presentación posterior	Yegua	Artec Eva y Artec Space Spider	0.2	17.589.364
	Potro	Artec Space Spider	0.1	10.861.684
Pelvis equina con útero abierto, presentación anterior	Yegua	Artec Eva y Artec Space Spider	0.2	18.671.219
	Potro	Artec Space Spider	0.1	9.165.575

Tabla 20. Características y resultados obtenidos en la malla de los modelos anatómicos. © Emanuel Sterp Moga.

La resolución de 0.2 mm, lograda en el conjunto de las yeguas y de 0.1 mm en los potros, fue suficiente para plasmar todos los detalles visibles del modelo, un factor determinante para realizar el análisis comparativo de la técnica constructiva, así como el estudio acerca de la posición de los potros en el vientre y la reintegración volumétrica de las membranas amnióticas.

6.3.2.2. Análisis de la técnica constructiva: comparación de las yeguas

Hasta la fecha no se ha localizado ninguna documentación histórica acerca de la manufactura específica de estas gestaciones o grabados que tuvieran un gran parecido con la obra real en los que pudiera haberse inspirado Garrigó para la creación de sus esculturas.

Es probable que el artífice empleará los procedimientos técnicos habituales en el arte de la ceroplástica anatómica, con el uso de moldes y positivos en cera a partir de especímenes diseccionados, pero dadas las dimensiones tan reducidas de estos artefactos en comparación con los modelos naturales cabe también la posibilidad de que recurriera al modelado en barro. Los detalles como la imitación del pelaje, las venas y las arterias parecen haber sido realizados a mano con un utillaje específico. Las figuras de las dos yeguas tienen un grado de similitud muy elevado, por lo que se pudo utilizar un mismo molde para ambas.

Con el fin de comprobar dicha hipótesis, se procedió a efectuar diversas mediciones lineales y geodésicas (figura 316). Las discrepancias dimensionales encontradas reflejan algunas diferencias en las glándulas mamarias y en la parte de los muslos (figura 317).

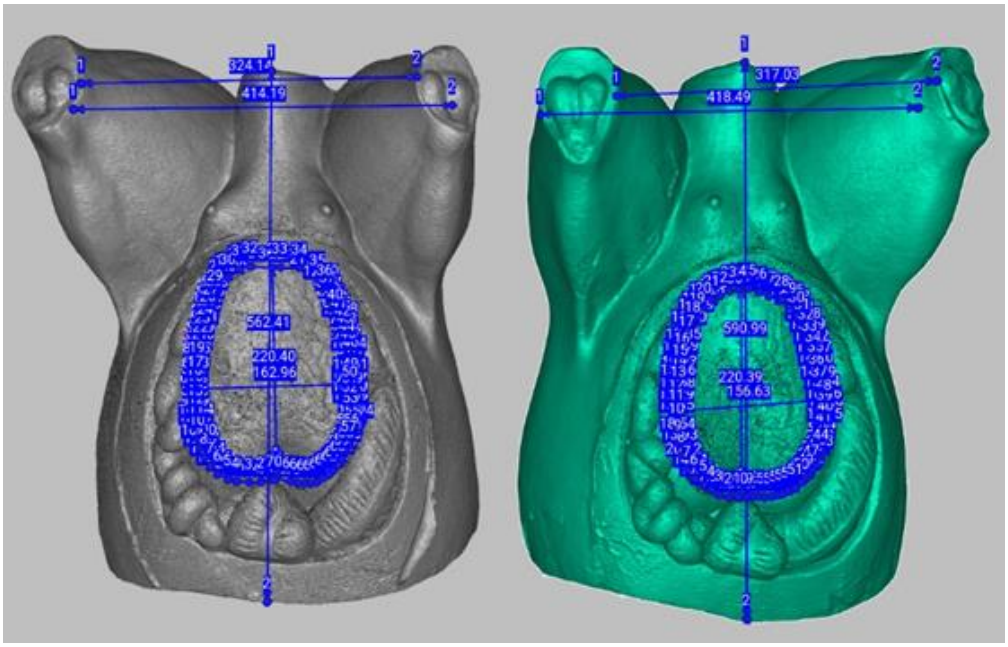


Figura 316. Mediciones lineales y geodésicas de la *Gestación de yeguas*. © Emanuel Sterp Moga.

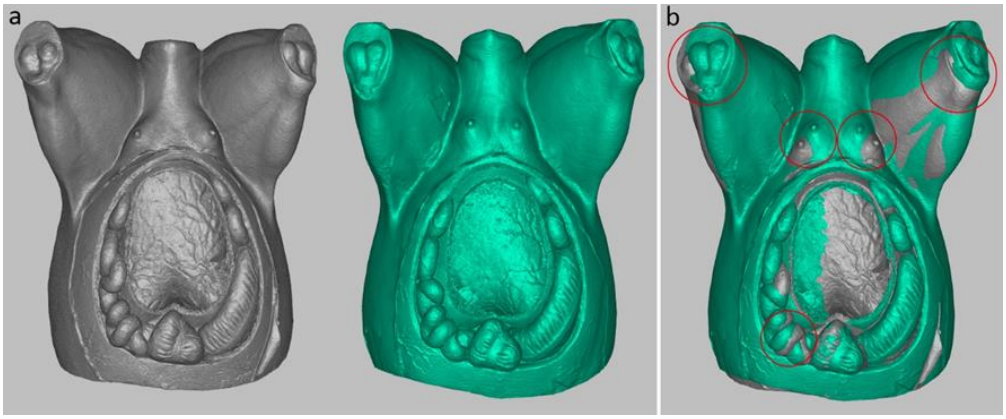


Figura 317. *Gestación de yeguas*. a) A la izquierda *Pelvis equina con útero abierto, presentación posterior* y a la derecha *Pelvis equina con útero abierto, presentación anterior*. b) Superposición. © Emanuel Sterp Moga.

Para determinarlo con mayor precisión, se recurrió a los *mapas de distancias* (figura 318). Los modelos, en gran parte de la superficie, mostraron una diferencia de entre -10 mm a 14 mm, con discrepancias según cada área, lo que reveló un alto parecido. Con los resultados hallados se dedujo que, para el volumen general, es decir, la parte interior de ambas yeguas, se emplearon los mismos moldes dado el alto parecido. Las pequeñas desviaciones localizadas seguramente se hayan producido durante la unión de las diversas piezas que conforman el modelo. En cuanto a las diferencias dimensionales, todo apunta a que están más relacionadas con la última capa de cera correspondiente a la piel y pelo de la yegua.

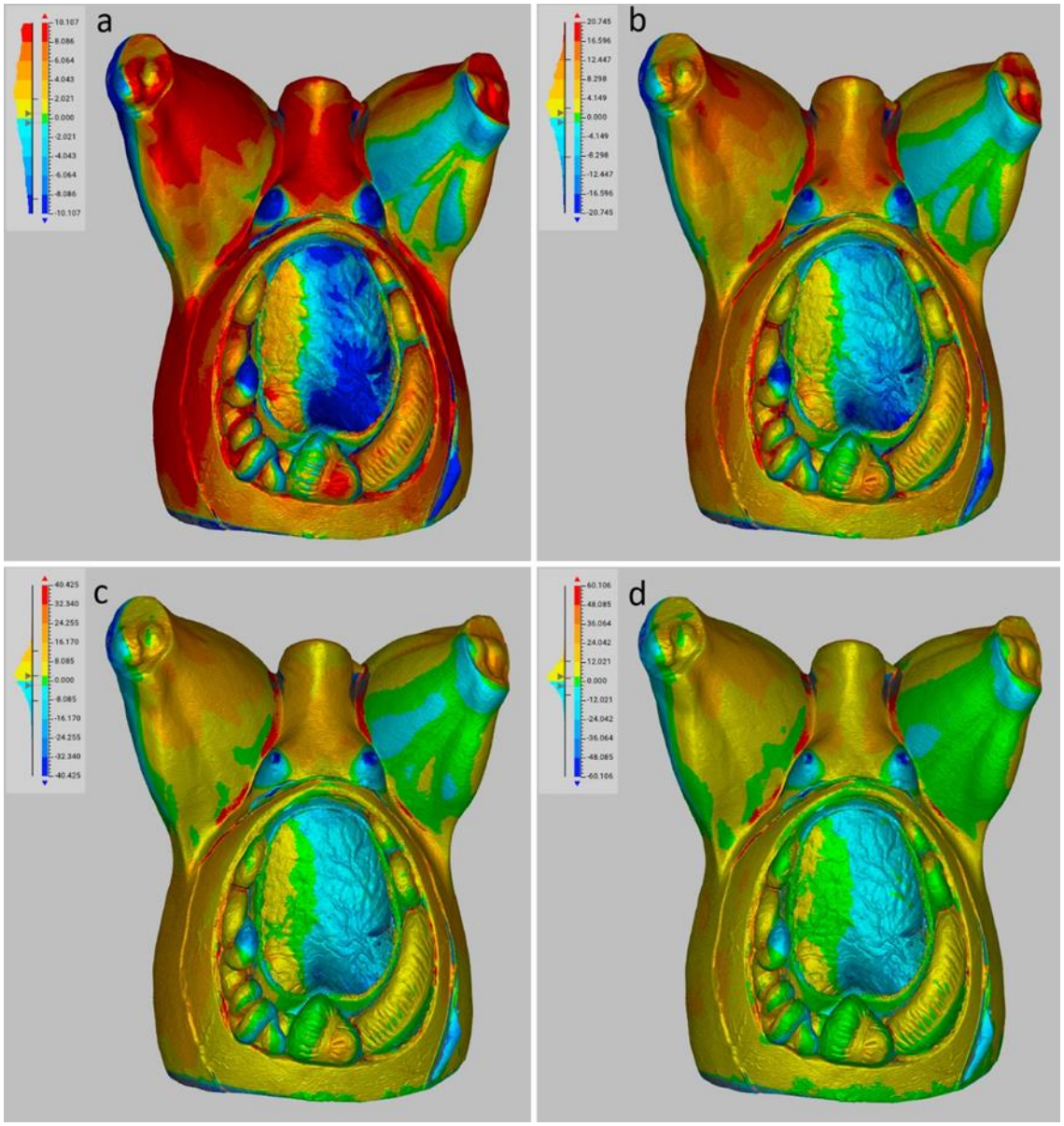


Figura 318. Medición de la diferencia del volumen entre los dos modelos mediante *mapas de distancias* superpuestos. a) Distancia 10 mm. b) Distancia 20 mm. c) Distancia 40 mm. d) Distancia 60 mm. © Emanuel Sterp Moga.

Con el fin de analizar las partes desviadas, se procedió a superponer las zonas de cada obra, haciéndolas coincidir, sobre todo, en el caso de los muslos y el vientre (figura 319). Los resultados mostraron un altísimo parecido con una diferencia dimensional de entre -3 mm a 7 mm, prácticamente en toda la superficie superpuesta.

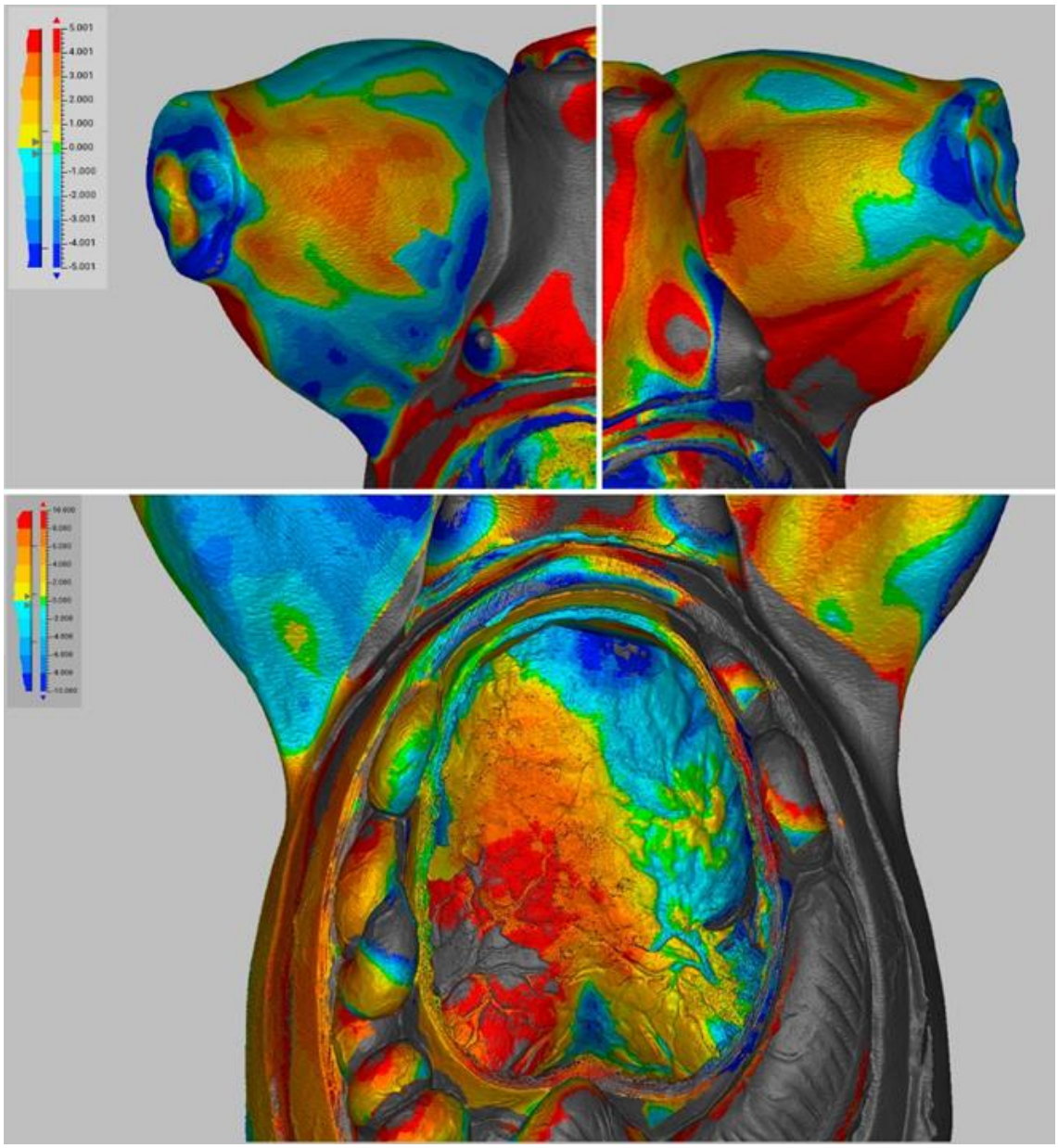


Figura 319. Superposición del volumen coincidente en ambas esculturas mediante *mapas de distancias*. © Emanuel Sterp Moga.

Finalmente, los pequeños detalles de la última capa de cera, correspondiente a la piel y pelo de la yegua, no coinciden en ninguno de los dos modelos. Las incisiones son totalmente diferentes, de lo que se deduce que su elaboración se realizó de manera manual sobre el positivo o lámina de cera aplicada, al igual que las arterias y venas, de ahí las pequeñas diferencias dimensionales halladas entre los dos modelos.

6.3.2.3. Análisis de las posiciones de los potros y reintegración virtual de las membranas amnióticas perdidas

Comenzando con la parte correspondiente a la ubicación de los potrillos, la alta precisión lograda en la malla de los modelos virtuales permitió analizar con detalle el volumen del vientre de cada yegua en relación con los potros. Durante el estudio se ha contado con la supervisión de expertos en partos de yeguas para determinar la posición exacta de cada potro. En el caso del

parto donde el potro adquiere una posición con la cabeza hacia el cuello uterino, las dimensiones halladas fueron mínimamente inferiores al orificio generado del vientre (entre 4 y 15 mm en las zonas con menos acceso), lo que dio lugar a ciertas dificultades a la hora de manipularlo y ubicarlo en el interior de la yegua (figura 320). Durante las mediciones se pudieron analizar las diversas posiciones que el potrillo necesitaba para colocarlo correctamente en el interior del vientre.

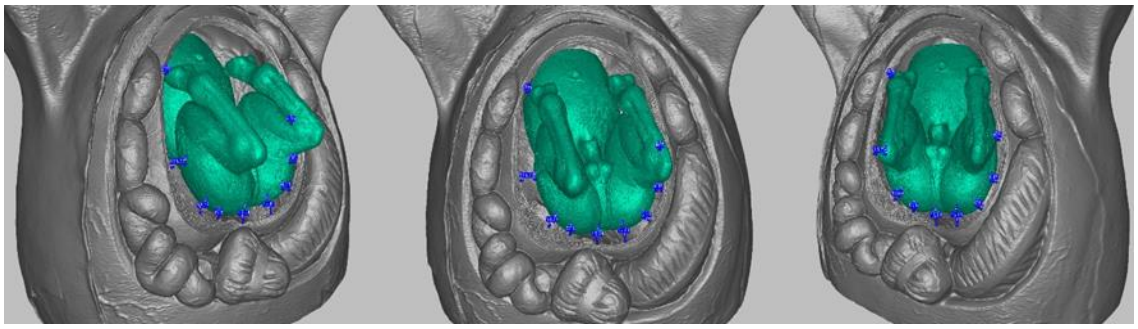


Figura 320. Mediciones de los espacios presentes durante las manipulaciones necesarias para insertar el potro en el vientre. © Emanuel Sterp Moga.

Mediante un análisis detallado de los modelos y tras diversas pruebas, se pudo estimar la posición y ángulo de inclinación aproximado, teniendo en cuenta el poco margen de espacio del vientre con el cual se contaba con respecto al volumen del potro (figuras 321 y 322).

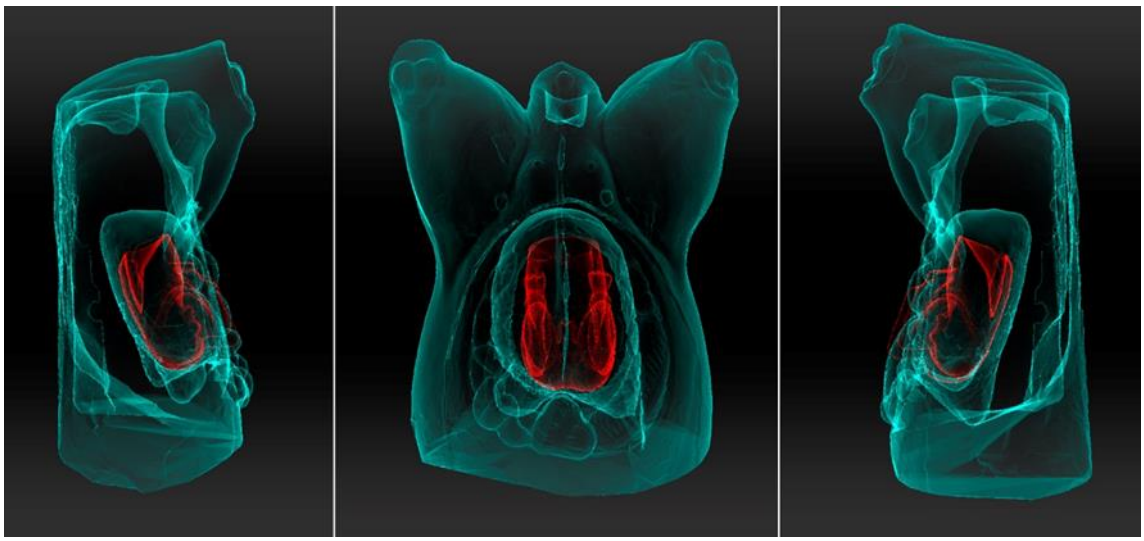


Figura 321. Análisis de la posición y ángulo del potro en la *Gestación de yegua; Pelvis equina con útero abierto, presentación anterior*. Visión X-Ray (Ver modelo 3D). Visión con textura de color (Ver modelo 3D). © Emanuel Sterp Moga.

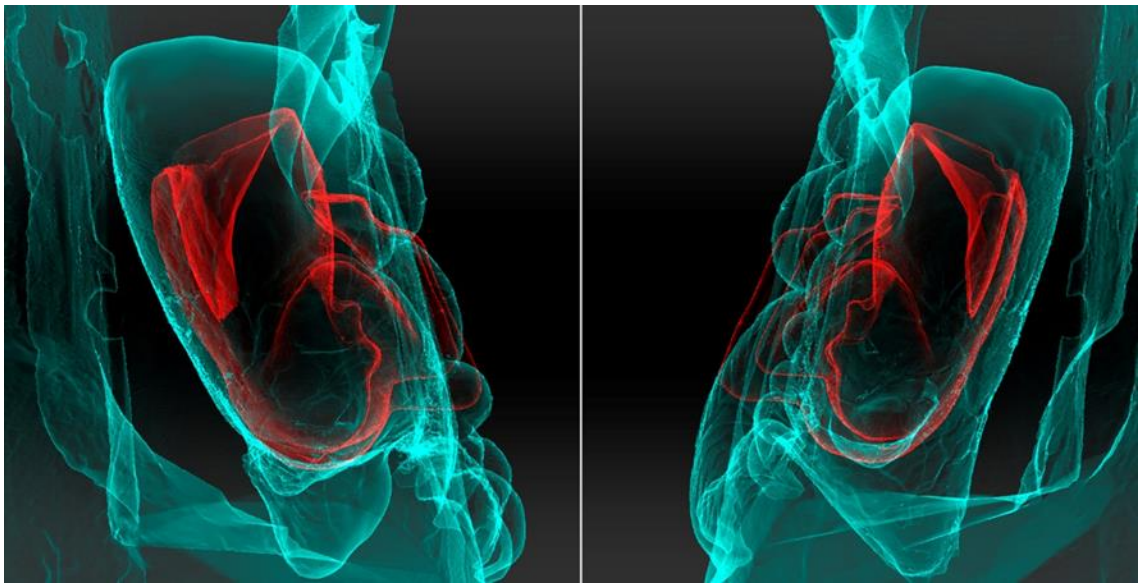


Figura 322. Detalle del análisis de la posición y ángulo del potro en la *Gestación de yegua; Pelvis equina con útero abierto, presentación anterior*. Visión X-Ray (Ver modelo 3D). Visión con textura de color (Ver modelo 3D). © Emanuel Sterp Moga.

La posición final que el potrillo adquirió dependió del diseño y la reintegración volumétrica de la membrana amniótica. Entre las nalgas, el potro dispone de una zona volumétrica ligeramente más exenta correspondiente al maslo de la cola (figura 323 a y b). Durante la ubicación del potro en el vientre, el maslo coincidió exactamente con la estrecha zona central perteneciente a la bifurcación de los dos cuernos uterinos (figura 323 c y d). Debido a que las nalgas disponen levemente de menor altura respecto al maslo, el modelo inicialmente quedaba muy desequilibrado, ya que se apoyaba solamente en el maslo en la zona central mencionada y, por tanto, la pieza podría vencerse hacia los lados con mucha facilidad.

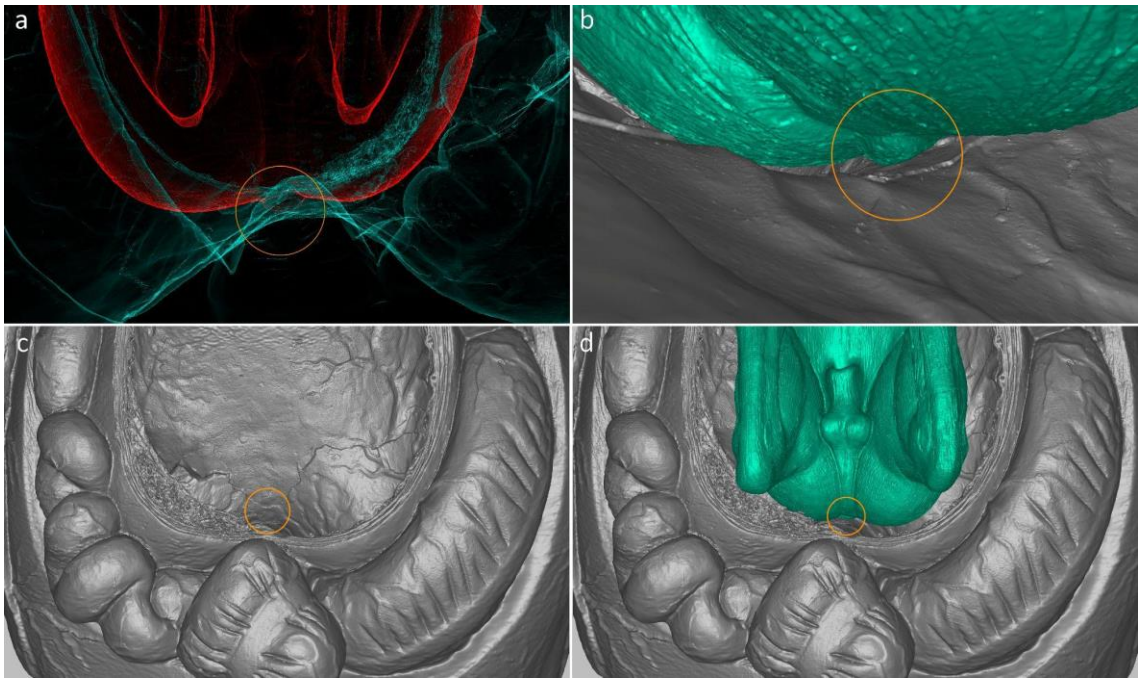


Figura 323. a y b) Análisis del volumen del maslo y su ubicación. c) Zona central de la bifurcación de los cuernos uterinos. d) Zona central de la bifurcación de los cuernos uterinos donde apoya el maslo del potro (Ver modelo 3D). © Emanuel Sterp Moga.

Con el fin de poder proporcionarle mayor estabilidad a la posición del potro, se procedió a modelar la membrana amniótica. Durante las diversas fases de modelado se consultó nuevamente con expertos en partos de yeguas para diseñar la forma que pudo tener y poder ajustarla con precisión a los bordes fracturados. A pesar de que la membrana amniótica en el parto real envuelve el potro, en este caso el artífice la ha ubicado de manera separada para poder extraer la figura.

Dicha membrana en el modelo está compuesta por dos capas de cera (figura 313), siendo la segunda la más fina de aproximadamente 0.6 mm, ubicada cerca de la fractura de mayor grosor. Se consideró que dicha capa no era imprescindible para asegurar la estabilidad estructural, al menos durante el modelado virtual. Por ello, se procedió a modelar la membrana partiendo de las fracturas de mayor grosor. Las marcas de las fracturas fueron muy reveladoras para poder reconstruir la membrana; sin embargo, en la zona central correspondiente al fondo de cada cuerno uterino fue más difícil de hallar (figura 324). Al finalizar el modelado de la membrana, el potrillo seguía con el único elemento de apoyo perteneciente al maslo situado en la zona central de la bifurcación de los cuernos uterinos (figura 325).

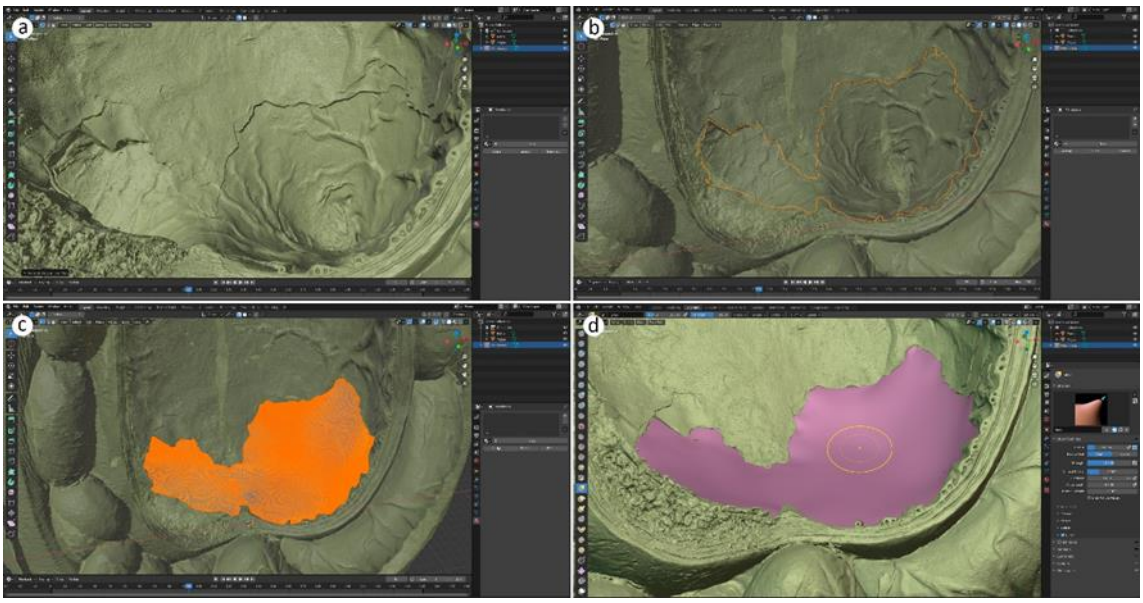


Figura 324. Proceso de modelado de la membrana amniótica. a) Análisis de la forma de la fractura. b) Extrusión de los vértices adaptándose a la forma de fractura. c) Solidificación de la malla creada. d) Modelado orgánico de la malla (Ver modelo 3D). © Emanuel Sterp Moga.

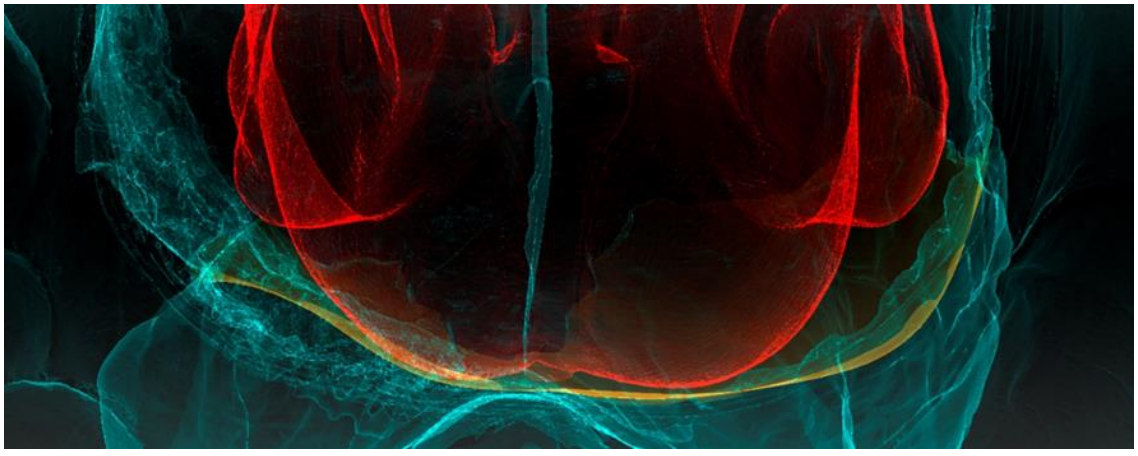


Figura 325. Análisis de la distancia entre la membrana amniótica y el potro. Visión X-Ray. © Emanuel Sterp Moga.

Se halló una distancia de 2 mm en la nalga izquierda y 1 mm en la nalga derecha del potro respecto a la membrana amniótica. Dada la mínima separación y con el objetivo de proporcionar mayor estabilidad a la figura, se decidió elevar 5 mm la parte modelada de la membrana en las zonas cercanas al área central de la bifurcación de los cuernos uterinos coincidentes con las nalgas. Con ello, se logró un contacto directo entre la membrana y las nalgas del potro (figura 326). Además, se consiguió obtener la forma final que pudo tener la membrana, ya que se dedujo que el diseño original tuvo que disponer de ciertos contactos con las nalgas porque, de lo contrario, el potro no se podría mantener en la posición correcta. Para reproducir fielmente el volumen de la membrana en la zona donde apoyarían las nalgas y el maslo, se recurrió a las operaciones *booleanas* (figura 327).

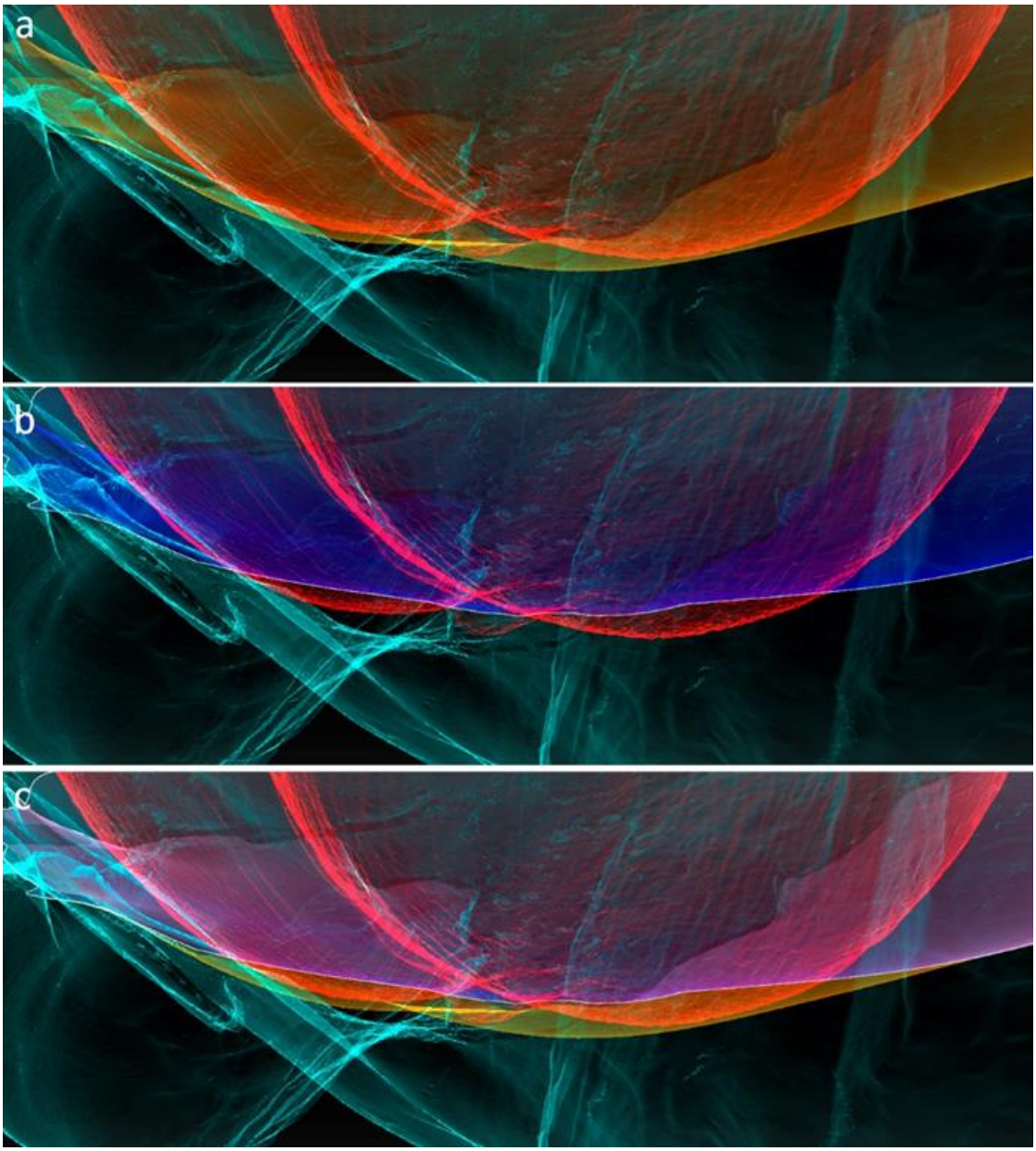


Figura 326. Modelado de la membrana amniótica. a) Estado de la membrana en el que las nalgas del potro no entran en contacto con la misma. b) Membrana tras elevarla 5 mm en la parte de las nalgas del potro. Se observa el contacto que presenta tras esta modificación. c) Diferencias entre las dos membranas. Visión X-Ray. © Emanuel Sterp Moga.

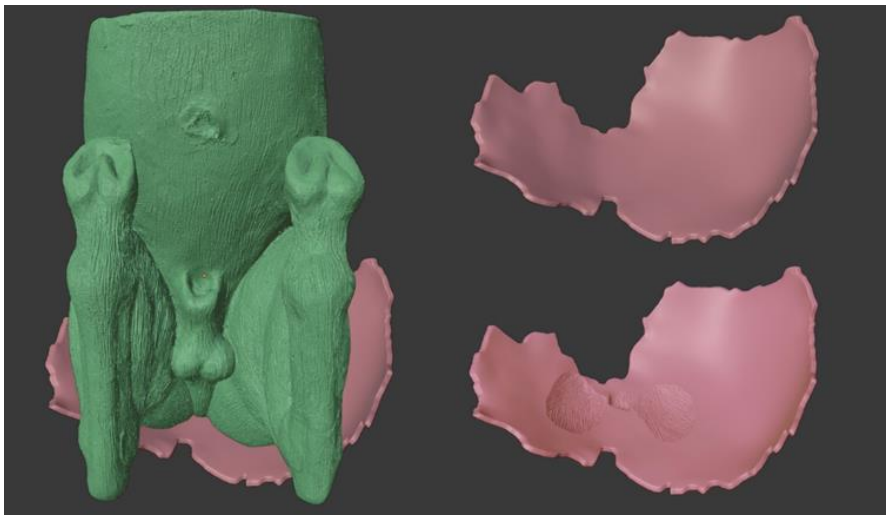


Figura 327. Aplicación de las *booleanas* para crear el volumen del potro que incide en la membrana. © Emanuel Sterp Moga.

Respecto al potro ubicado con la posición de la cabeza hacia los cuernos uterinos, el modelo resultó ser bastante más pequeño en comparación con el caso anterior, lo que no mostró dificultades (distancia entre 15 y 35 mm en las zonas con menos acceso) a la hora de manipularlo y colocarlo dentro del vientre (figura 328). Durante el análisis minucioso acerca de la ubicación del potrillo, se estimó la posición y ángulo de inclinación (figuras 329 y 330).

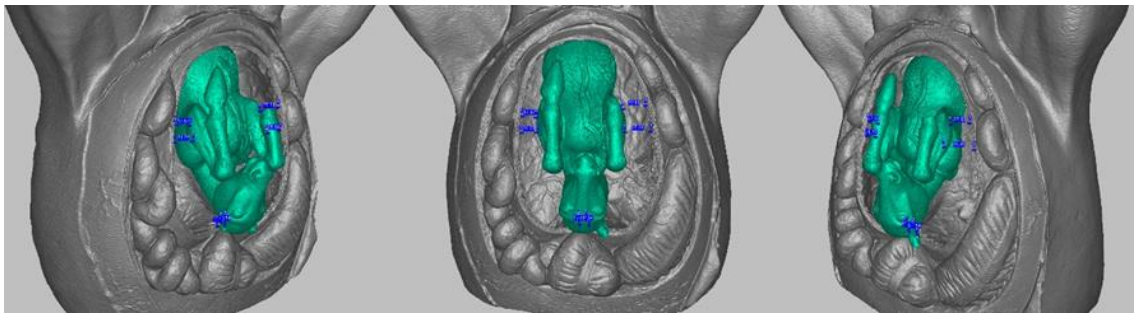


Figura 328. Mediciones de los espacios presentes durante las manipulaciones necesarias para insertar el potro en el vientre. © Emanuel Sterp Moga.

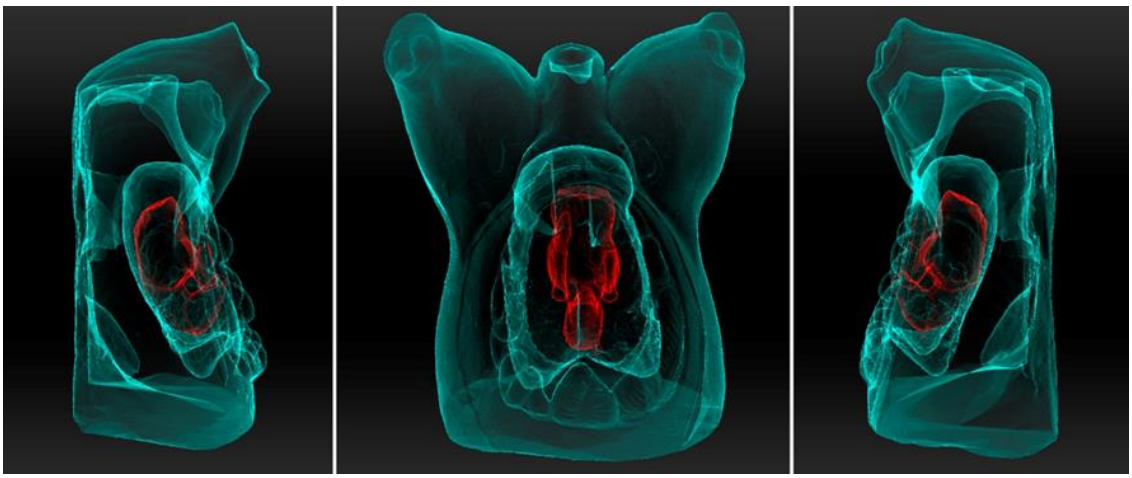


Figura 329. Análisis de la posición y ángulo del potro en el vientre de la *Gestación de yegua; Pelvis equina con útero abierto, presentación posterior*. Visión X-Ray (Ver modelo 3D). Visión con textura de color (Ver modelo 3D). © Emanuel Sterp Moga.

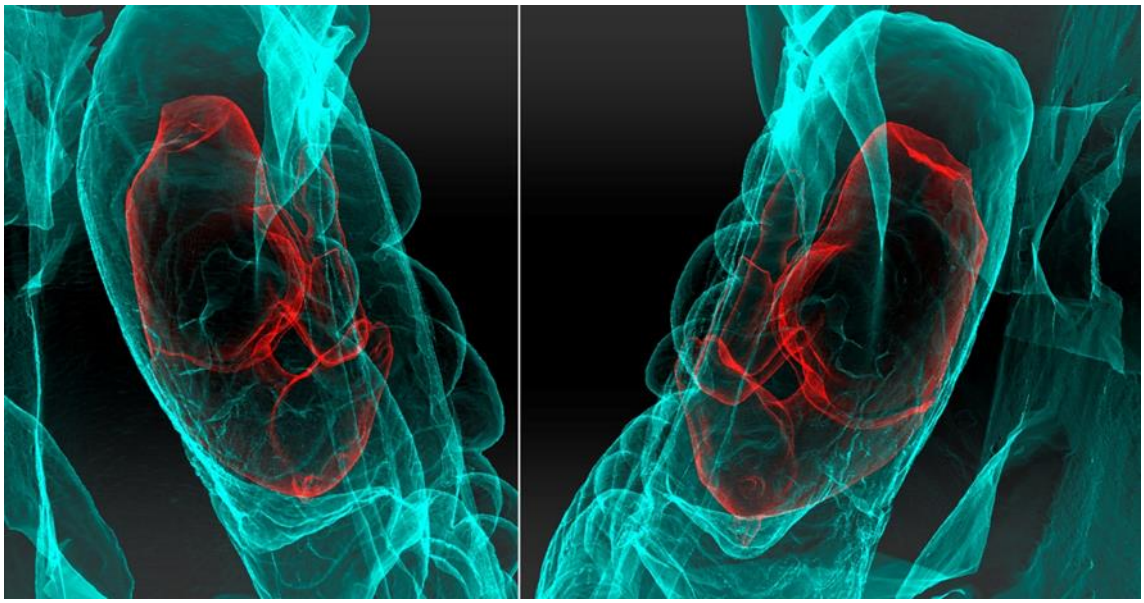


Figura 330. Detalle del análisis de la posición y ángulo del potro en el vientre de la *Gestación de yegua; Pelvis equina con útero abierto, presentación posterior*. Visión X-Ray (Ver modelo 3D). Visión con textura de color (Ver modelo 3D). © Emanuel Sterp Moga.

Al estar ubicado con la cabeza hacia abajo, la dificultad encontrada para poder estabilizar la pieza en la posición y ángulo de inclinación establecidos resultó realmente alta. Al igual que el caso anterior, la zona de contacto de la pieza correspondiente a la cabeza del potro, en concreto, a la parte del mechón y nuca, recae sobre la estrecha franja central de la bifurcación de los cuernos uterinos (figura 331). En este caso, debido a que el potro solamente se apoya sobre esta zona tan delicada, resulta imposible estabilizar la pieza. Por ello, de manera idéntica que, en el caso anterior, se modeló la membrana amniótica siguiendo las referencias de las fracturas con mayor espesor, así como la orientación de la superficie de zonas adyacentes (figura 332).

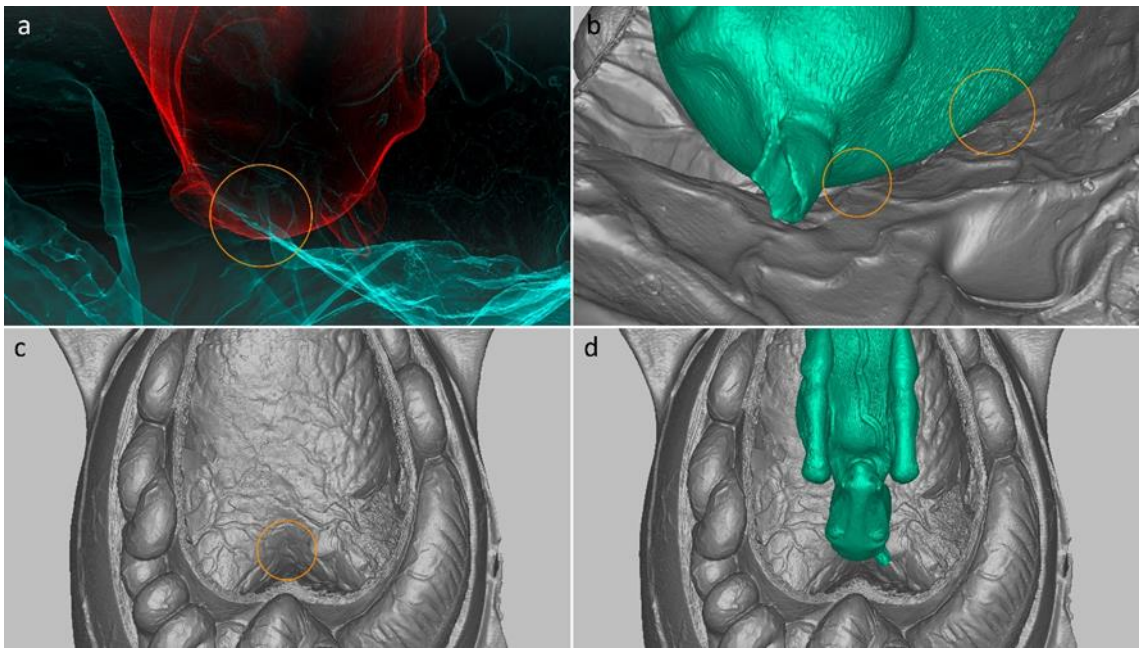


Figura 331. a y b) Análisis del volumen en la parte de la nuca y el mechón. c) Zona central de la bifurcación de los cuernos uterinos. d) Zona central de la bifurcación de los cuernos uterinos donde apoya la cabeza del potro (Ver modelo 3D). © Emanuel Sterp Moga.

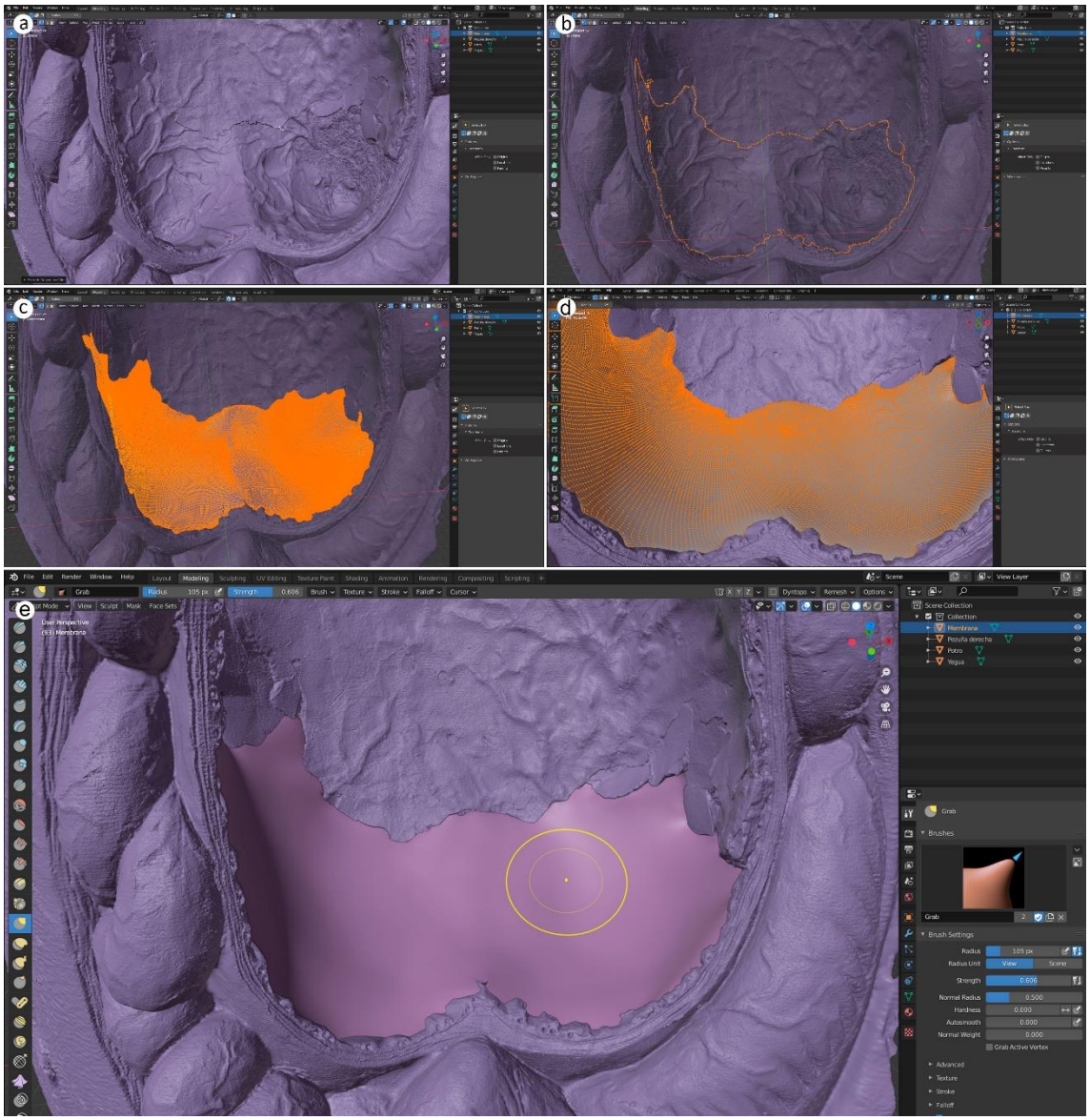


Figura 332. Proceso de modelado de la membrana amniótica. a) Análisis de la forma de la fractura. b) Extrusión de los vértices adaptándose a la forma de fractura. c y d) Solidificación de la malla creada. e) Modelado orgánico de la malla (Ver modelo 3D). © Emanuel Sterp Moga.

Una vez concluida, se observó que la parte del mechón y de la nuca se apoyaba perfectamente sobre la membrana. Por otro lado, se detectó que la oreja derecha hacía un contacto mínimo con la membrana, por lo que se dedujo que era un elemento de apoyo y equilibrio muy importante (figura 333 a). Para lograr mayor estabilidad en la oreja derecha se reintegró volumétricamente una pequeña zona perteneciente al interior de la misma, ya que resultó ser determinante para reforzar dicha área (figuras 333 b y c). Cabe destacar que las orejas ya no conservan la forma original, puesto que las fracturas indican una pérdida del material en dichas zonas. Estos elementos tuvieron que ser más alargados como cualquier modelo natural. Sin embargo, dada la carencia de información sobre este aspecto y teniendo en cuenta la enorme fragilidad que tendrían al ubicar el potro en esta posición, se decidió no reconstruirlas por completo. Por otro lado, al no conservar la oreja izquierda, siendo esta un elemento imprescindible para equilibrar la pieza, se procedió a clonarla tomando como referencia la oreja derecha (figura 333 d y e). Finalmente, en

las zonas cercanas a las orejas, se levantó la membrana 3 mm para lograr un mayor contacto con las orejas y, por tanto, mayor seguridad y estabilidad en la posición del potro.

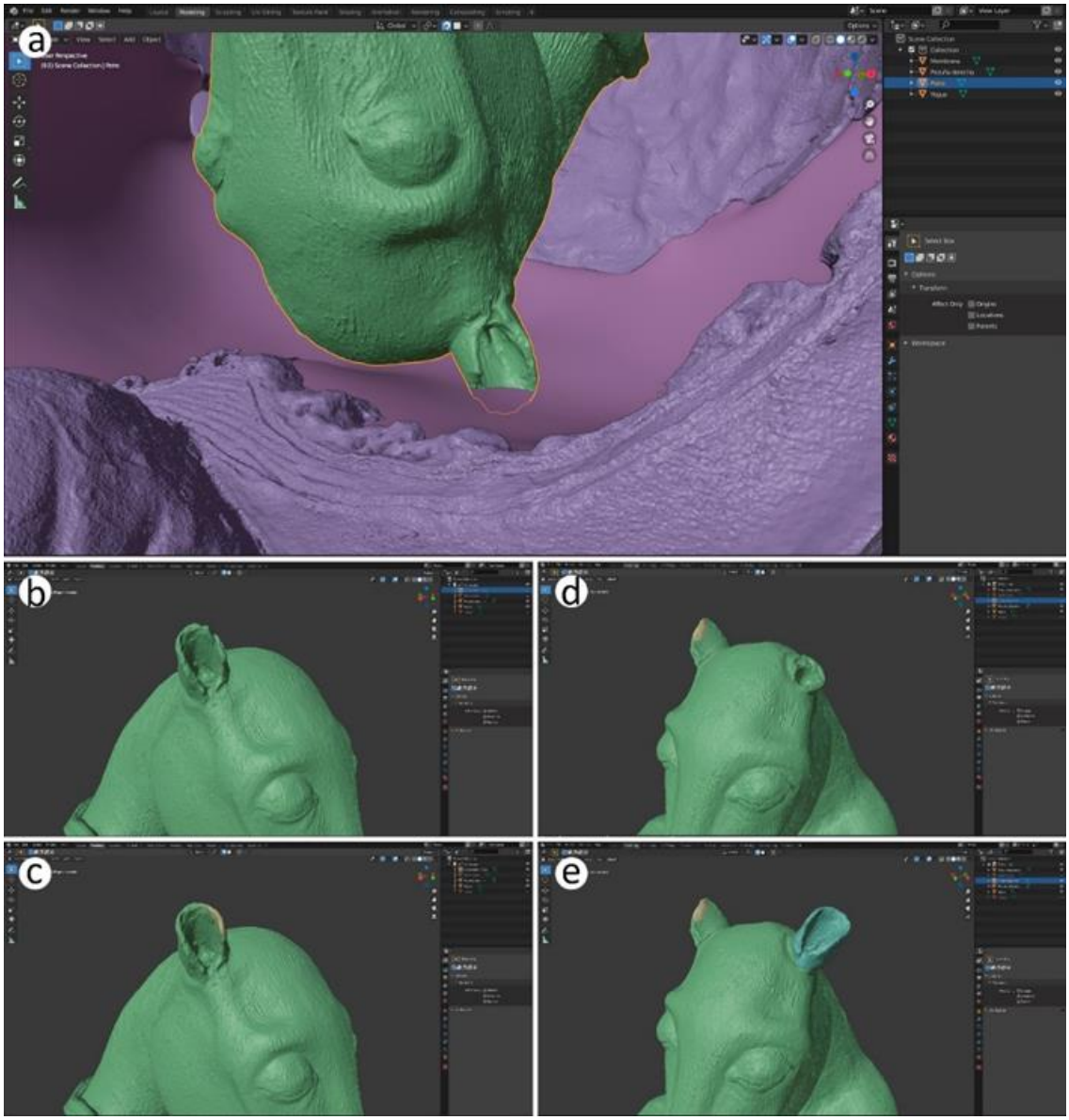


Figura 333. a) Contacto de la membrana con la oreja derecha. b) Antes de reintegrar volumétricamente la parte interior de la oreja derecha. c) Después de reintegrar volumétricamente la parte interior de la oreja derecha. d) Antes de reconstruir la oreja izquierda. e) Después de reconstruir la oreja izquierda. © Emanuel Sterp Moga.

Las dos orejas resultaron ser piezas claves para lograr el equilibrio del modelo (figura 334). Ambas, al tener un contacto directo con la membrana amniótica de 4 mm, se adaptaron perfectamente para que pudieran alojarse en el interior de la membrana sin ninguna complicación mediante las *booleanas* (figura 335).

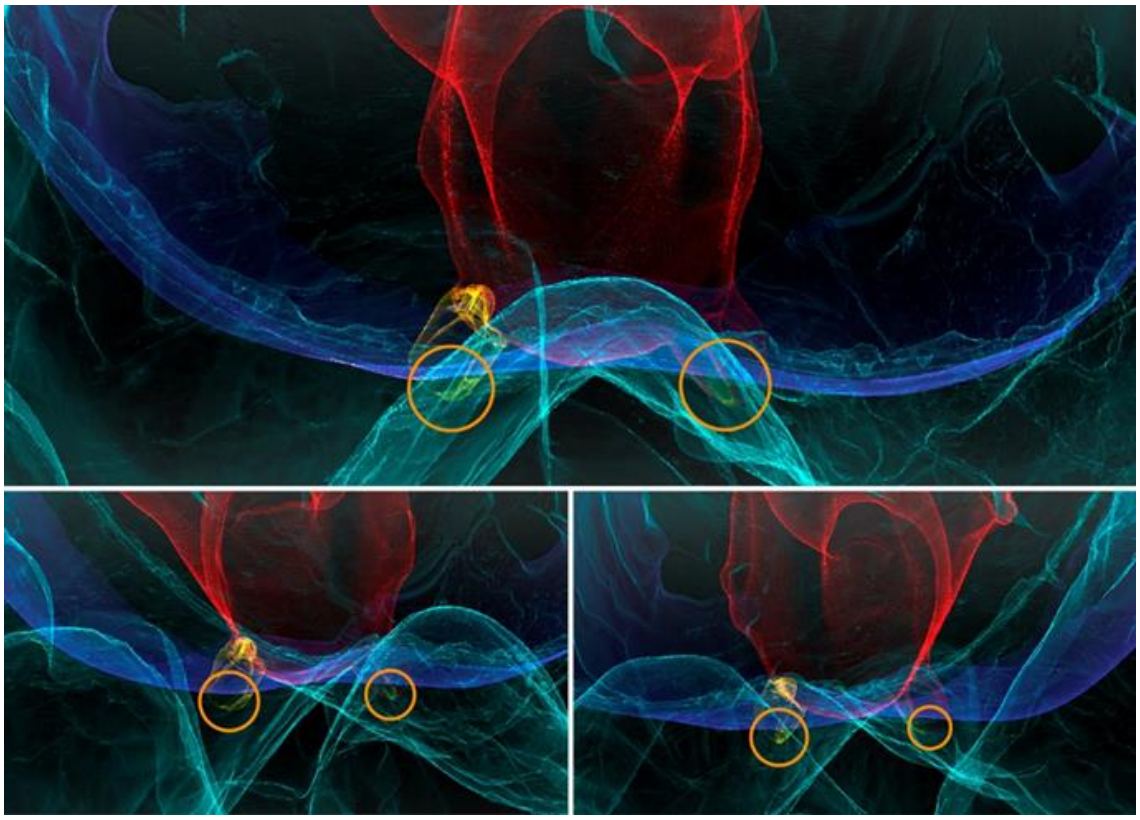


Figura 334. Análisis del grado de inserción de las orejas en la membrana amniótica. Visión X-Ray. © Emanuel Sterp Moga.

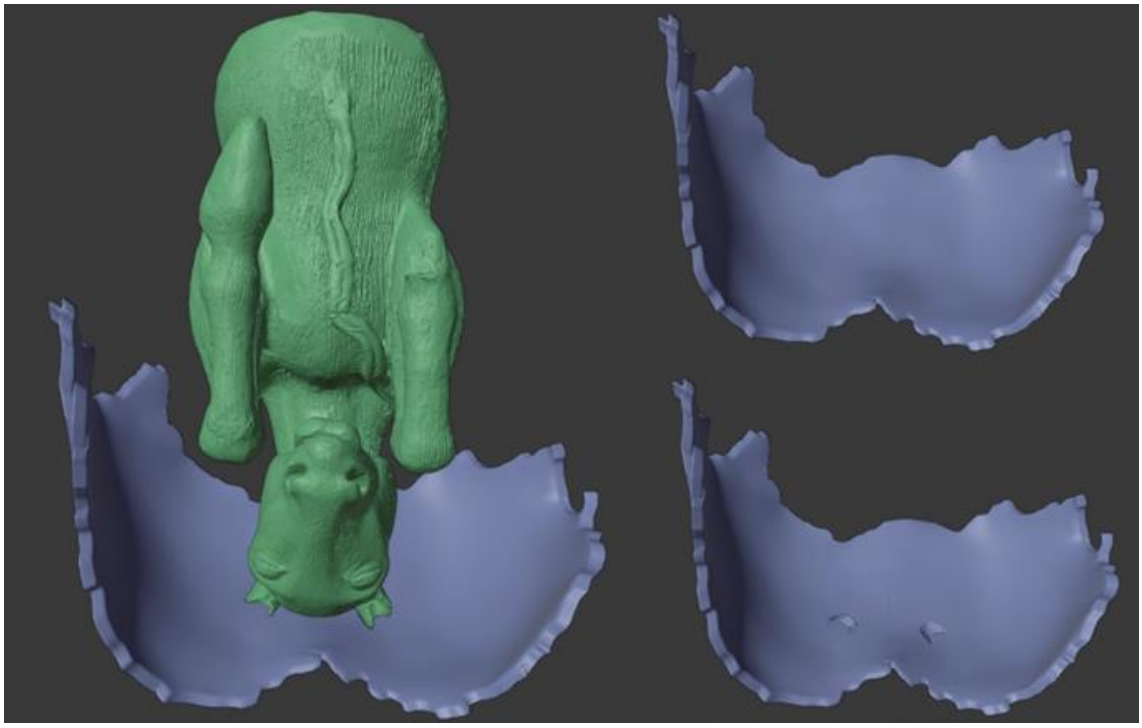


Figura 335. Aplicación de las *booleanas* para crear el volumen del potro que incide en la membrana. © Emanuel Sterp Moga.

Concluidas las dos membranas amnióticas, se crearon los moldes correspondientes a cada una de ellas. Debido al gran volumen que presentan y al espesor tan fino, resultó realmente complejo realizar un molde cerrado, ya que durante el proceso de desmoldeo, la membrana acarrearía problemas. Además, por el reverso no era necesario lograr la máxima calidad, sino únicamente en la parte del anverso, por lo que se desestimó este diseño. El anverso de la membrana, es decir, la zona que entra en contacto con los potros es la más importante, por tal razón, se elaboró un molde abierto compuesto por una única plancha con la forma necesaria para reproducirla.

En ambos casos, se aprovechó la membrana amniótica modelada. Debido a que los huecos de las membranas en los cuales se apoyan y encajarían los potrillos estaban elaborados de manera negativa, es decir, con las cavidades en el interior de la misma (figura 336 a), fue necesario invertir la superficie exterior para obtener el volumen a reproducir en positivo (figura 336 b). De este modo, al aplicar la cera sobre la membrana en positivo generaría los huecos necesarios para que posteriormente encajen los potros. Con el fin de asegurar un acoplamiento más seguro en los potrillos, las superficies de contacto se suavizaron mínimamente con el fin de reducir los detalles (figura 336 c y d). Finalmente, con el objetivo de evitar que la materia se excediera de la superficie y volumen necesario, se incorporó a la plancha unos bordes de 5 mm de altura (figura 336 e y f).

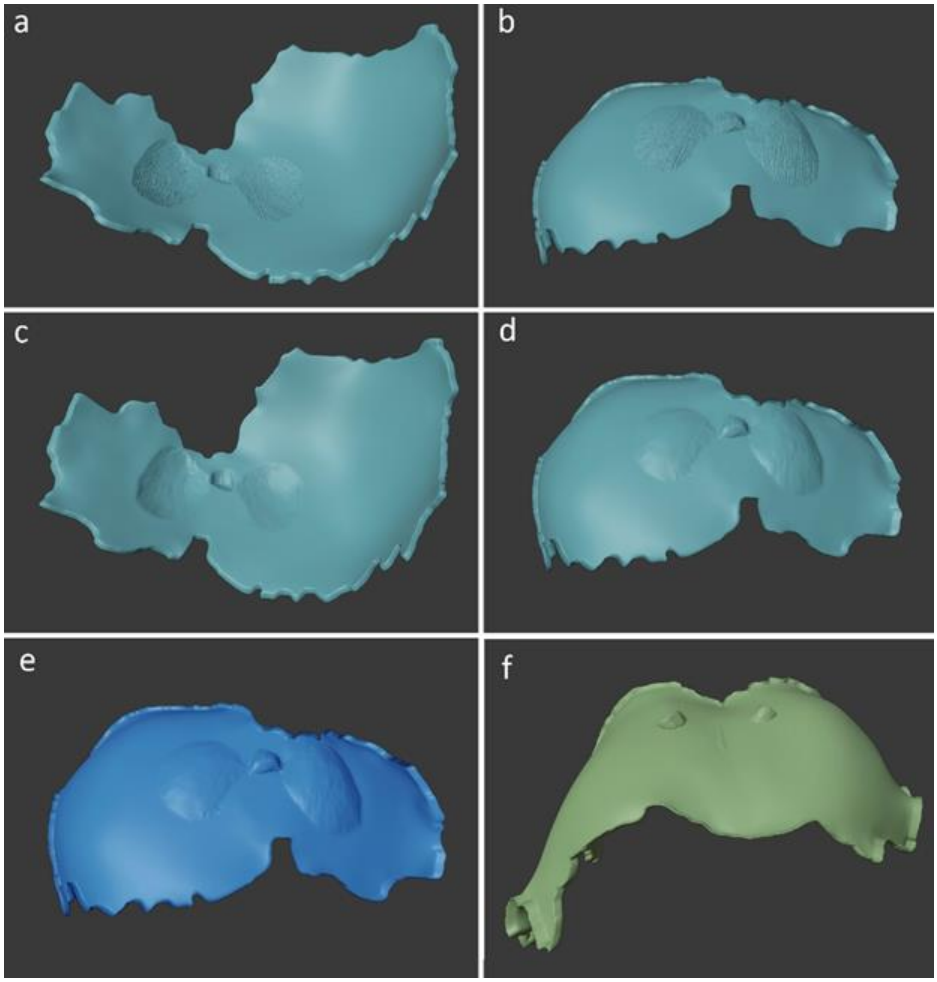


Figura 336. a) Positivo de la membrana con las cavidades registradas para depositar el potro. b) Negativo de la membrana donde la parte positiva se ha invertido. c y d) Suavizado de las zonas de contacto. e) Molde de la membrana perteneciente al potro ubicado con la cabeza hacia el cuello uterino. f) Molde de la membrana perteneciente al potro ubicado con la cabeza hacia el cuerno uterino. © Emanuel Sterp Moga.

6.3.2.4. Impresión 3D de los moldes y reproducción de las membranas amnióticas

Concluidos los diseños de los moldes virtuales, se procedió a imprimirlos en 3D mediante el material PLA Tough, estableciendo un ángulo de 75º respecto a la plataforma de impresión. Tanto el material como la posición de impresión resultaron ser los más apropiados para este fin dadas las características de las piezas. Finalmente, se logró una adecuada calidad tanto en la reproducción volumétrica como en los acabados superficiales (figura 337).

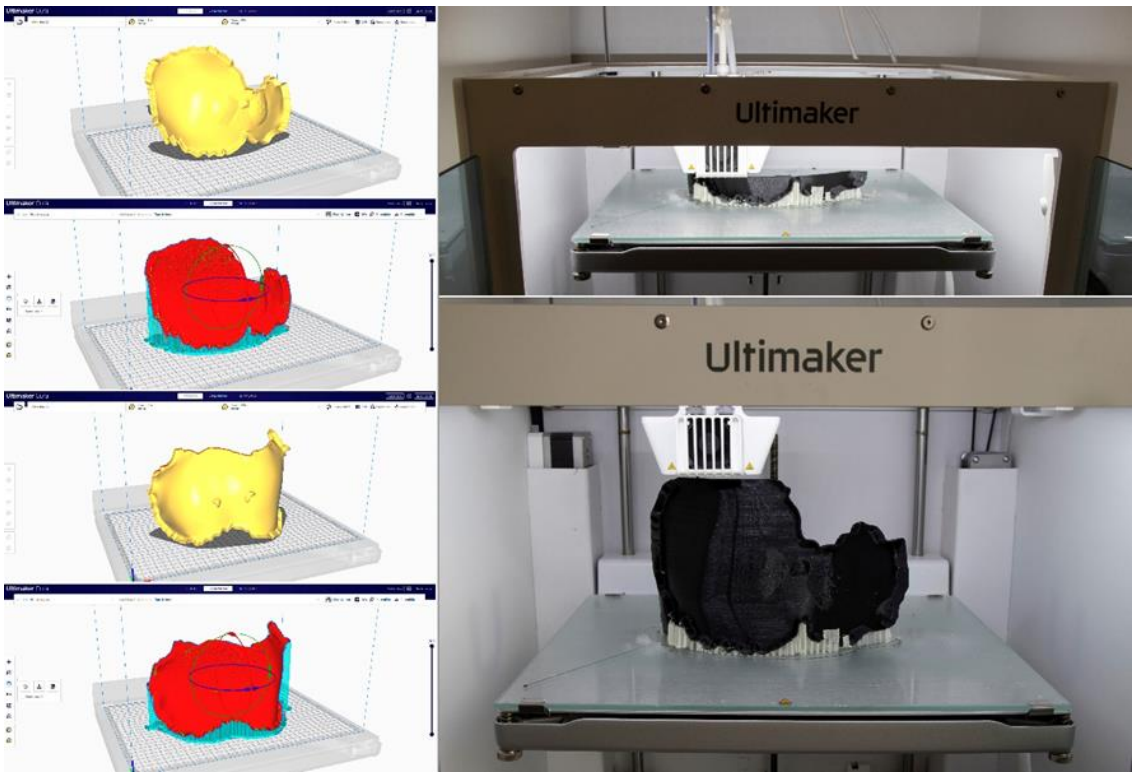


Figura 337. Configuración e impresión 3D de los moldes para la creación de las membranas amnióticas. © Emanuel Sterp Moga.

Una de las cuestiones de carácter técnico-procedimental que resultó más complejas fue lograr determinar el nivel de transparencia que tuvieron en origen dichas membranas. Estas fueron elaboradas con láminas finas, compuestas por pasta de cera de abejas, a la que los ceroescultores adicionaban resinas naturales y otros aditivos para aportar una cierta translucidez que permitiera visualizar los detalles anatómicos subyacentes como, por ejemplo, los cuernos uterinos. Es importante destacar que esta lámina de cera sirvió de soporte a la figura de cada uno de los potros. La manipulación constante de estos durante las explicaciones en las aulas, unida a los procesos de envejecimiento natural de los materiales empleados, han podido ser la causa por la que finalmente las membranas se fragmentaron y deterioraron hasta tal punto que dejaron de cumplir con su función. Dada la falta de documentación original que guiase la reconstrucción de la zona dañada, se consultó con los especialistas en partos de yeguas y con el propio director responsable del museo Complutense para valorar la toma de decisión a adoptar, teniendo muy presente que era un elemento esencial para recolocar en su posición original cada uno de los potros con el fin de recuperar la legibilidad y el sentido de las esculturas. Tras valorar las posibles opciones, se decidió intervenir guiados por los principios de la máxima compatibilidad, reversibilidad, seguridad y respeto por el artefacto original.

Para el proceso de positivado en cera de cada una de las membranas amnióticas, en primer lugar, se aplicó una capa de vaselina sobre el molde con el fin de evitar que se adhiriese la cera (figura 338 b y c). Acto seguido, se pinceló la cera en sucesivas capas (figura 338 d, e y f).



Figura 338. Proceso de positivado en cera de las membranas. a) Molde de las membranas. b) Aplicación de vaselina en el molde de la oreja. c) Aplicación de vaselina en uno de los moldes de las membranas. d, e y f) Pincelado de la cera. © Emanuel Sterp Moga.

Aunque las membranas finales solo necesitan dos capas de cera, es decir, dos pinceladas aproximadamente con un grosor de 1.2 mm, similar a la original, se aplicaron varias capas de más para poder extraer con seguridad la pieza del molde. En las pruebas llevadas a cabo con el fin de retirar la membrana del molde con dos aplicaciones de cera únicamente esta operación resultó realmente compleja, ya que se fracturaba por múltiples partes. Por ello, se decidió emplear varias capas hasta lograr un grosor de 4 mm (figura 339). Posteriormente, una vez que la cera se había endurecido, se procedió a retirar con facilidad las capas pinceladas hasta obtener un resultado con un grosor entre 0.6-1.2 mm (figuras 340 y 341). La cera utilizada estaba compuesta por una mezcla del 75% de cera de abeja virgen y 25% de cera microcristalina Lascaux® 443-95. La incorporación de 25% de la cera microcristalina se debió a sus altas propiedades adhesivas y características mecánicas en cuanto a la flexibilidad, lo que proporcionó mayor elasticidad al conjunto de las membranas.

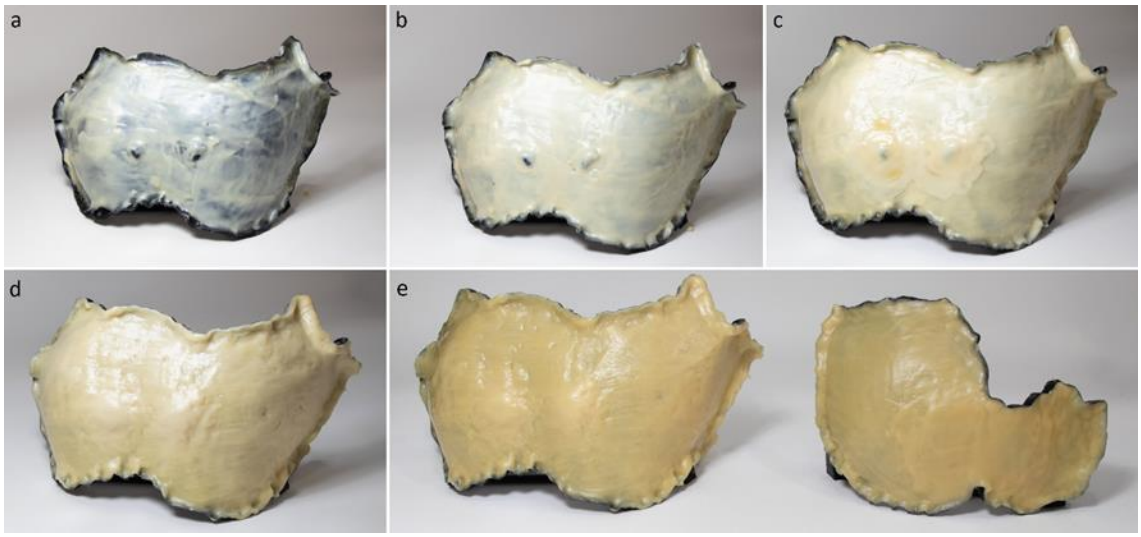


Figura 339. a, b, c y d) Proceso de positivado en cera de las membranas. e) Proceso finalizado. © Emanuel Sterp Moga.

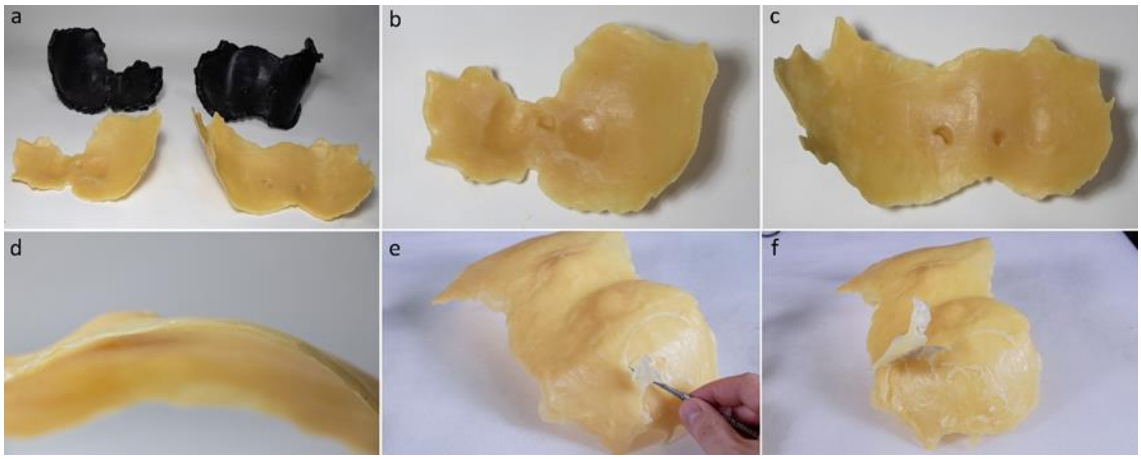


Figura 340. a) Obtención de las membranas de la *Gestación de yeguas*. b) Membrana *Pelvis equina con útero abierto, presentación anterior*. c) Membrana *Pelvis equina con útero abierto, presentación posterior*. d) Detalle del espesor de las membranas iniciales. e y f) Proceso de eliminación por capas. © Emanuel Sterp Moga.

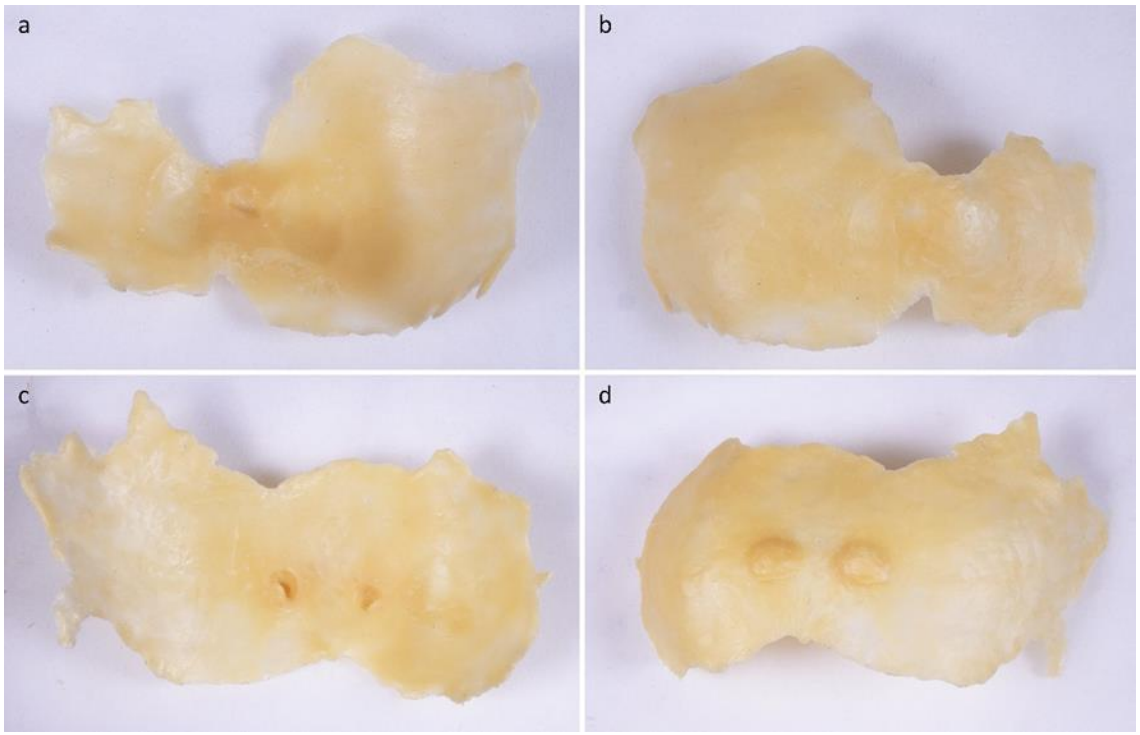


Figura 341. a) Membranas finales de la *Gestación de yeguas*. a y b) Membrana *Pelvis equina con útero abierto, presentación anterior*. c y d) Membrana *Pelvis equina con útero abierto, presentación posterior*. © Emanuel Sterp Moga.

Fue bastante complejo lograr un acabado parcialmente translúcido en la pasta de cera. Al reducir el grosor de la membrana aproximadamente entre 0.6 y 1.2 mm, de modo que se asemejará a la original, excepto en las zonas donde interactuaba con el potro, que requería de un mayor espesor debido a la fuerza que van a ejercer (3 mm), se logró cierto grado de translucidez. Esta translucidez se asemeja a la primera capa aplicada sobre las venas y arterias (figura 342 a). A pesar de ello, la transparencia solo se hizo evidente cuando otro material entraba en contacto directo, como las venas, por ejemplo. En esta composición de cera, a medida que se aumentaba la distancia entre el material que antes se veía en pleno contacto con la membrana, se distinguía con más dificultad. También se realizó un exhaustivo análisis de la translucidez de los fragmentos

de cera de las membranas conservadas cerca de las áreas fracturadas. En dichas zonas las dos capas de cera ocultan prácticamente por completo los cuernos uterinos, habiendo una distancia entre ellas de entre 5 y 15 mm (figura 342 b). Con ello, se dedujo que las capas de cera tan finas influyen en la observación de los materiales subyacentes según aumenta la distancia. Dada la separación de 70 mm aproximadamente entre las membranas y el fondo de los cuernos uterinos, surge la incertidumbre sobre hasta qué punto estos úteros eran perceptibles a través de las membranas.

Debido a los factores mencionados, a las nuevas membranas se les proporcionó el espesor similar al original como ya se ha indicado. Sin embargo, resultó ser demasiado frágil y susceptible de doblarse con facilidad. En consecuencia, se decidió no rebajar más el grosor, con el fin de garantizar una mayor estabilidad, aunque a costa de una pérdida de translucidez prácticamente completa. Ante todas las complicaciones encontradas, se priorizó proporcionar un equilibrio entre la estabilidad de esta reintegración, la seguridad del potro y recuperar la intencionalidad de la obra.

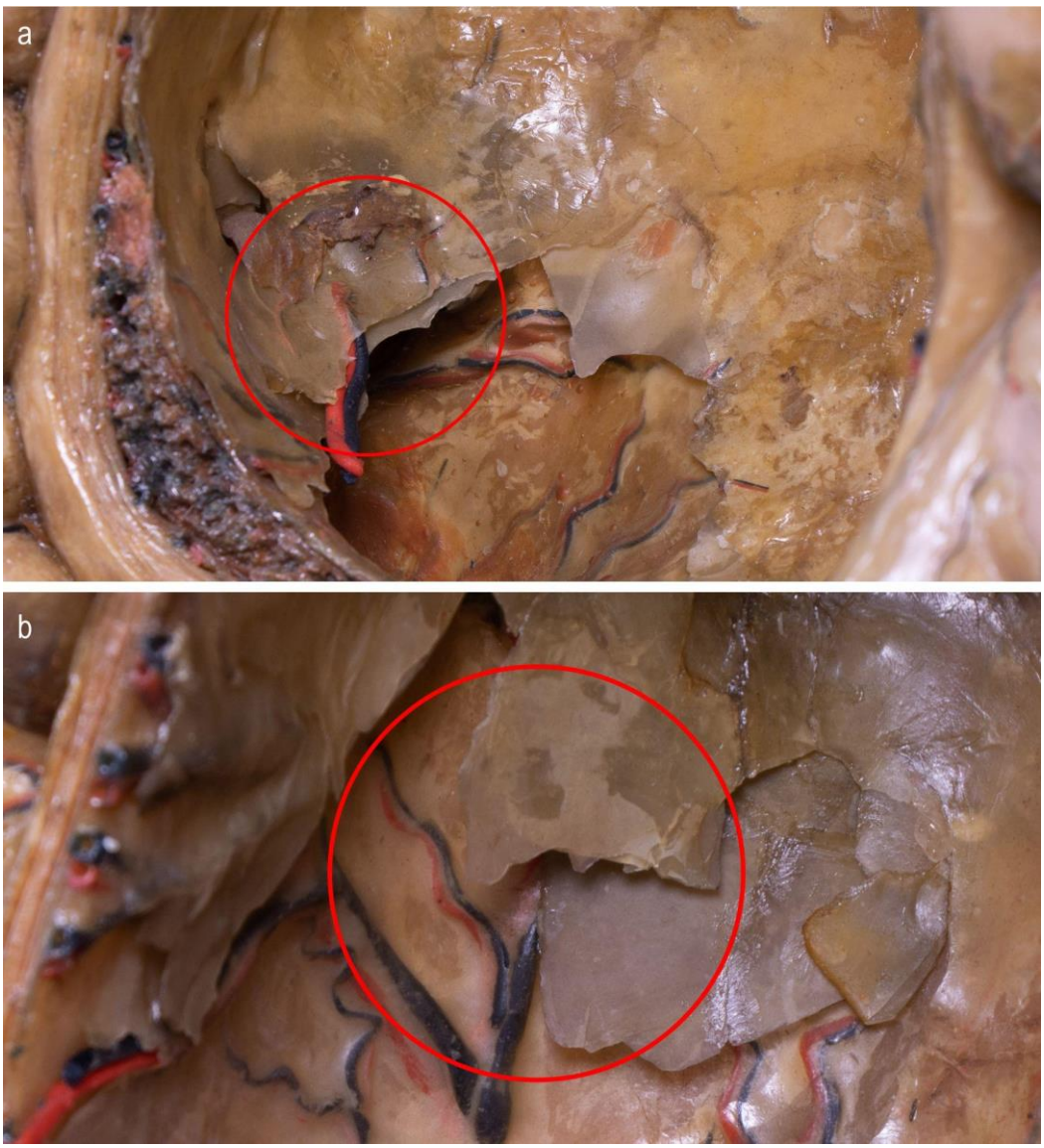


Figura 342. Capas de cera de la membrana amniótica que cubre las venas y arterias de los cuernos uterinos. © Emanuel Sterp Moga.

6.3.3. Intervención en la obra real

Previamente a los tratamientos de adhesión de las membranas amnióticas, se procedió a consolidar las áreas frágiles que presentaban deformaciones y desprendimientos pertenecientes a la membrana amniótica. Para las consolidaciones se empleó una cera compuesta por una mezcla del 50% de cera de abeja virgen y 50% de cera microcristalina Lascaux® 443-95 (figura 343). Al incorporar un 50% de cera microcristalina, se consiguió obtener una pasta con gran capacidad de adhesión y alta reversibilidad. Con el fin de comprobar su comportamiento, se realizaron varias pruebas y los resultados fueron óptimos. Entre cada fase de adhesión, se estableció un tiempo de 48 horas para que la pasta de cera solidificara correctamente.

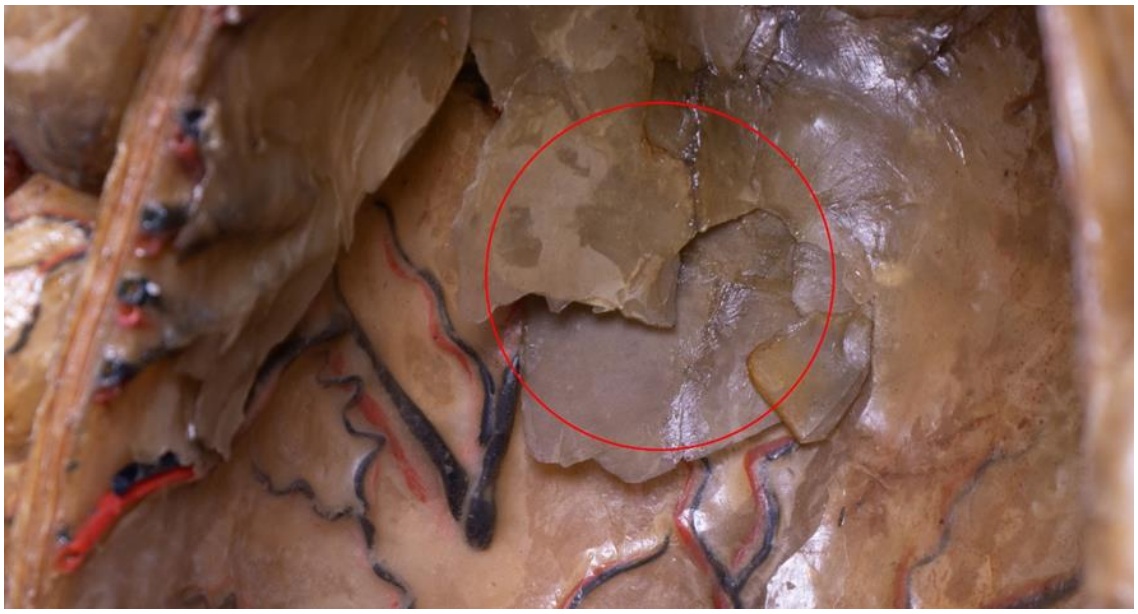


Figura 343. Consolidación de los fragmentos conservados de la membrana amniótica. © Emanuel Sterp Moga.

Al igual que las consolidaciones de las partes más vulnerables, a la hora de adherir las membranas se utilizó la misma composición de cera. Su aplicación se llevó a cabo exclusivamente en los bordes de las membranas mediante pincelado. Al unir la membrana a lo largo del perímetro, y dadas las características del material empleado para su adhesión, se ha conseguido garantizar que la intervención fuese totalmente retratable.

Transcurridas 48 horas, se procedió a pincelar con la cera compuesta por 50% de cera de abeja y 50% de cera microcristalina las zonas puntuales correspondientes a las láminas inferiores a 0.6 mm fracturadas de manera muy irregular. Con ello se completó la reintegración volumétrica. La cera microcristalina, al presentar en su composición resina sintética, proporcionó una gran adhesión y flexibilidad en la zona tratada. Este factor resultó primordial de cara a las futuras manipulaciones de los potros, para evitar que cualquier vibración generase fisuras o grietas en la zona adherida y, por tanto, el deterioro de la membrana.

Finalizadas las adhesiones, se procedió a aplicar una veladura mediante las acuarelas QoR® Golden con el fin de proporcionar un color neutro que se asemeje más a la tonalidad de la cera original. El resultado obtenido fue claramente discernible y se integró perfectamente con la zona circundante del original (figuras 344 y 345).



Figura 344. *Gestación de yeguas; Pelvis equina con útero abierto, presentación posterior*. Antes y después de ubicar la membrana amniótica. © Emanuel Sterp Moga.

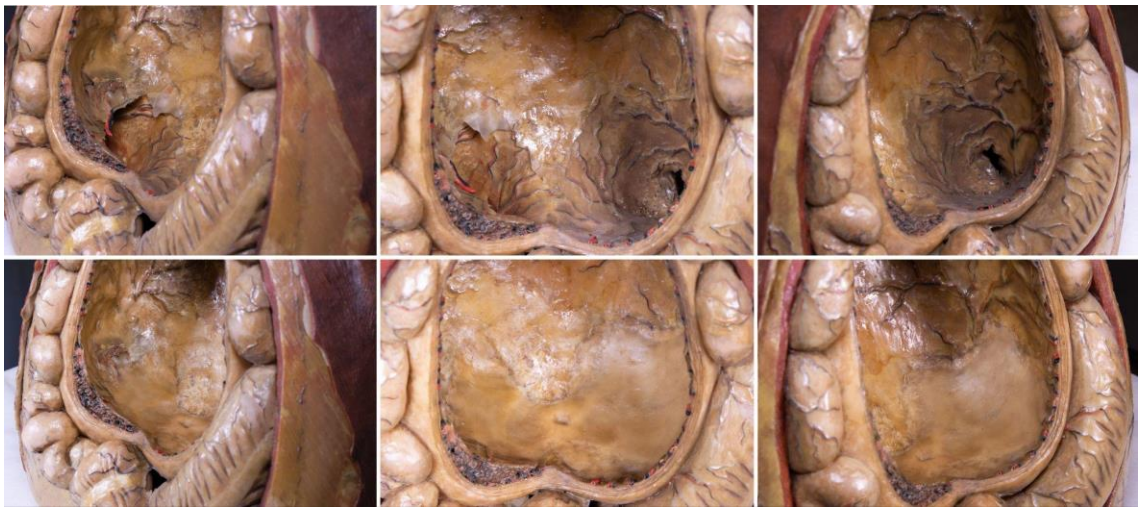


Figura 345. *Gestación de yeguas; Pelvis equina con útero abierto, presentación anterior*. Antes y después de ubicar la membrana amniótica. © Emanuel Sterp Moga.

Respecto a los tratamientos de adhesión, en el caso del potro con la cabeza orientada hacia los cuernos uterinos, la oreja izquierda modelada y reproducida en cera se adhirió mediante dos puntos de resina epoxídica fluida Epo 155 con endurecedor K 156 con un 5% de sílice micronizado Lovel 27. Debido a la importancia estructural y al esfuerzo que recaerá sobre estas partes del potro, fue necesario emplear un adhesivo que tuviera suficiente resistencia. Se logró una unión de una gran firmeza gracias a las características mecánicas de la resina utilizada (figura 346).



Figura 346. Antes y después de la reintegración volumétrica de las orejas. © Emanuel Sterp Moga.

Finalmente, los potros encajaron en el interior de cada yegua adaptándose perfectamente a las membranas y dotando a las figuras de la adecuada estabilidad (figuras 347 y 348).



Figura 347. *Gestación de yeguas*. a) *Pelvis equina con útero abierto, presentación anterior* antes y después de la intervención. b) *Pelvis equina con útero abierto, presentación posterior* antes y después de la intervención. © Emanuel Sterp Moga.



Figura 348. *Gestación de yeguas*. a) Detalle de la *Pelvis equina con útero abierto, presentación anterior*. b) Detalle de la *Pelvis equina con útero abierto, presentación posterior*. © Emanuel Sterp Moga.

6.3.4. Resultados y discusión

Las tecnologías 3D basadas en la digitalización, modelado virtual e impresión 3D, han puesto de relieve su potencial para el diseño e impresión de fragmentos enfocados a reintegraciones volumétricas complejas.

Los modelos escaneados han permitido, gracias a su elevada precisión y resolución, registrar con alto detalle todos los elementos anatómicos de cada uno de los artefactos estudiados. Esto era indispensable para analizar el estado de conservación de las dos yeguas, comparar la técnica constructiva de ambas, examinar la posición de los potrillos y las maniobras necesarias para su colocación, así como para reconstruir con precisión las membranas amnióticas perdidas.

El modelado virtual de las membranas ha hecho posible explorar diversas soluciones y reproducir con precisión los elementos volumétricos necesarios para su reintegración. Con ello, se ha logrado reproducir la forma exacta adaptada a las fracturas, asegurando un perfecto encaje. Por otro lado, los diseños llevados a cabo han permitido analizar con sumo detalle la eficacia a la hora de sustentar y equilibrar los potrillos en las posiciones establecidas.

Respecto a los moldes diseñados mediante la herramienta de *boolean*, se ha logrado reproducir fielmente las zonas de contacto de cada una de las áreas correspondientes a los potros, lo que aseguró una gran estabilidad para los mismos.

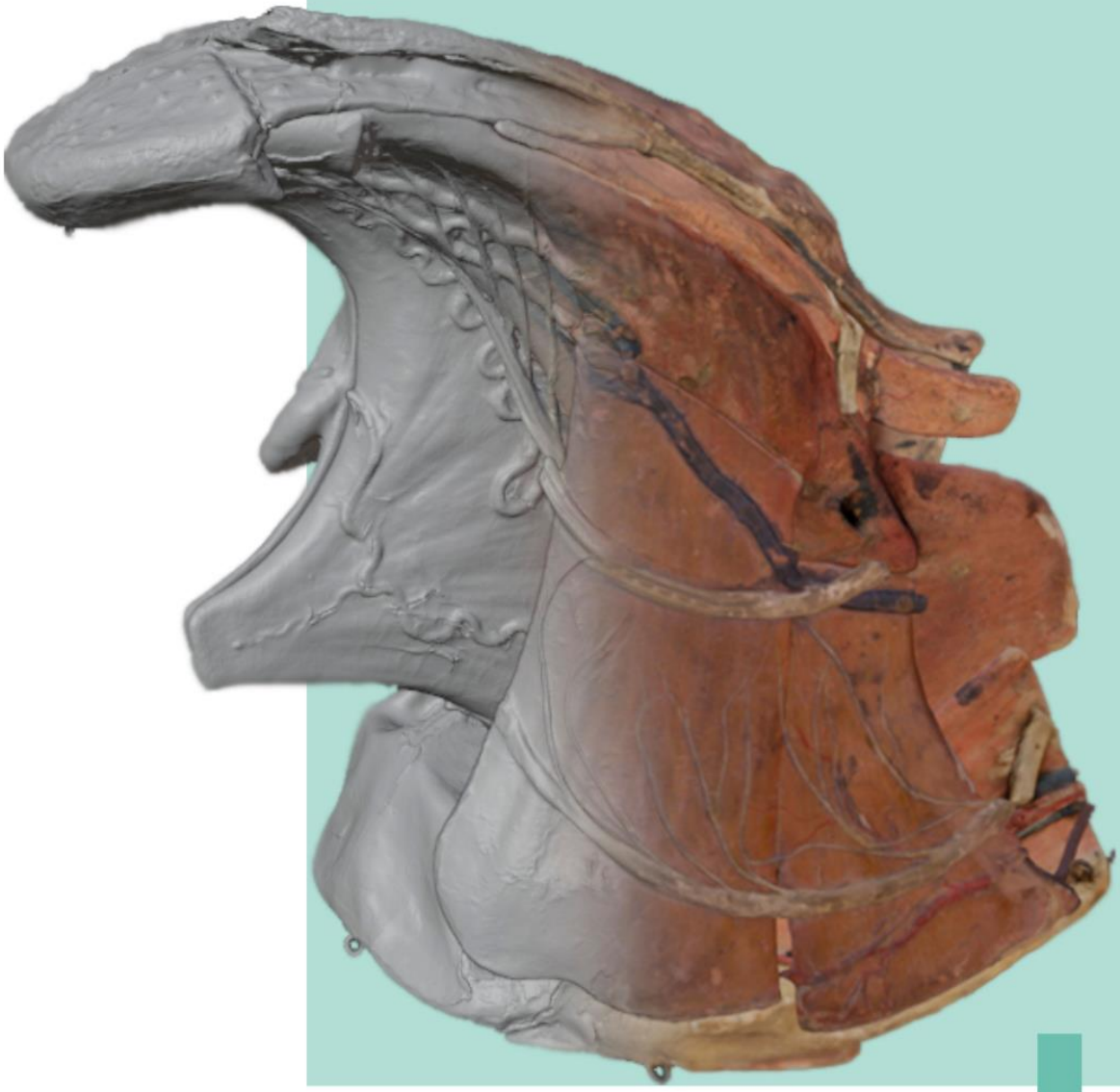
Todos los análisis llevados a cabo sobre el estado de conservación, la posición de los potrillos, así como los diseños virtuales de las membranas, han enriquecido enormemente los conocimientos sobre los tratamientos necesarios.

Los ajustes de impresión utilizados, los ángulos establecidos a 75º para la reproducción de las piezas, así como el material PLA Tough empleado, han sido factores decisivos para la obtención de unos moldes de alta calidad. Su diseño resultó realmente eficaz para poder pincelar la cera. Durante el proceso de desmoldeo, los positivos se han retirado con gran facilidad gracias al empleo de la vaselina. La reducción del espesor de la membrana resultó facilitada al haber sido la cera pincelada por capas, ya que cada una de ellas pudo ser desprendida con bastante facilidad y de forma uniforme.

En cuanto a los tratamientos en la obra real, los tiempos establecidos de 48 horas entre cada una de las adhesiones y reintegraciones volumétricas, han sido esenciales para garantizar una gran resistencia de las mismas. Respecto a los materiales utilizados para la elaboración de las membranas (cera de abejas virgen 75% y 25% de cera microcristalina Lascaux® 443-95) y su posterior adhesión (cera de abejas virgen 50% y 50% de cera microcristalina Lascaux® 443-95), estos han mostrado una gran reversibilidad y compatibilidad con los materiales originales, y también han aportado una notable estabilidad y seguridad. La resistencia de las membranas ha resultado ser muy eficaz, ya que estas han aguantado perfectamente el peso de los potrillos.

CASO 4

LENGUA CLÁSTICA



Museo de Anatomía "Javier Puerta" (UCM)

La restauración virtual como herramienta para analizar los tratamientos de conservación-restauración

6.4. Caso 4: Lengua clástica. Museo de Anatomía "Javier Puerta" (UCM). La restauración virtual como herramienta para analizar los tratamientos de conservación-restauración

El cuarto caso de estudio se ha centrado en uno de los ingeniosos artefactos fabricados por la casa comercial del Dr. Auzoux. Sus investigaciones al llegar a París, en 1816, para estudiar medicina fueron constantes, con una idea clara de crear modelos anatómicos artificiales clásticos adecuados para los estudios anatómicos como sustitutos de las disecciones. El gran secreto del éxito de las piezas, que rápidamente se extendieron por todo el mundo, residía en la mezcla de pasta de papel. A pesar de su aparente delicadeza, este material, en realidad, se mostraba resistente a múltiples manipulaciones y, por lo tanto, más adecuado para los fines pedagógicos. Sus modelos fueron la continuación de los artefactos anteriores, más caros y frágiles como la cera.

La pieza escogida *Lengua clástica* (n.º Ref.: MAJP 000081), está compuesta por 5 piezas que muestran los músculos extrínsecos como geniogloso, palatogloso, faringogloso, los músculos intrínsecos como el transverso, longitudinal superior e inferior, entre otras estructuras y las regiones óseas (figura 349). Este modelo se construyó alrededor de finales del siglo XIX y tiene unas dimensiones de 22,5 x 18,2 x 16,2 cm. En la actualidad, se encuentra expuesto en la sala del Museo de Anatomía "Javier Puerta" de la Facultad de Medicina (UCM). El presente trabajo formó parte del proyecto I+D: *Metodologías innovadoras en conservación de colecciones científicas con modelos didácticos para la enseñanza de Botánica, Anatomía humana y animal basadas en las nuevas tecnologías 3D*, Ref.: PGC2018-098396-B-100.



Figura 349. *Lengua clástica* del Dr. Auzoux. Museo de Anatomía "Javier Puerta" de la Facultad de Medicina, Universidad Complutense de Madrid (Ver modelo 3D). © Emanuel Sterp Moga.

Aparte del modelo conservado en la Universidad Complutense de Madrid, hay otros pertenecientes a diversas instituciones y anticuarios (figura 350). Hasta el momento se han localizado tres artefactos con un alto parecido al objeto de estudio seleccionado que cuentan con la firma original del fabricante. El modelo de la Universidad de Zaragoza está datado en 1879, el de Proantic en 1897 y el de la Van Leest Antiques en 1906. Estos datos son muy relevantes para poder orientarnos y estimar una fecha de creación de la escultura conservada en la colección Complutense, ya que su firma no es legible debido al estado de conservación que mostraba.



Figura 350. *Lengua clástica*. a) © Universidad de Zaragoza. b) © Proantic. c) © Van Leest Antiques.

6.4.1. Estado de conservación de la lengua clásica

El estado de conservación que presentaba la escultura era el resultado de la acción combinada de diversos factores intrínsecos y extrínsecos. El envejecimiento natural de los materiales está relacionado estrechamente con su exposición y almacenaje en condiciones ambientales inadecuadas. La materia celulósica del soporte que compone el modelo resulta ser muy sensible a la acción de la humedad. Las constantes fluctuaciones de humedad relativa y temperatura han generado cambios dimensionales, dando lugar a fisuras y grietas en el propio soporte. Como consecuencia de estas modificaciones, la capa de preparación y las películas pictóricas, extremadamente frágiles y finas, se han visto desprendidas del soporte, provocando fisuras, grietas, descamaciones, cazoletas y pérdidas. Asimismo, la película de gelatina utilizada para dotar al modelo de un aspecto húmedo y, a su vez, destinada a proteger la obra, también ha experimentado cambios dimensionales, provocando numerosas descamaciones.

Todas las alteraciones estructurales generadas por los factores medioambientales se han visto potenciadas por la propia función didáctica del artefacto. Las constantes manipulaciones, tanto por parte de los docentes como de los alumnos, para desmontar y montar las diferentes piezas que conforman el modelo, han aumentado los daños estructurales, dando lugar a pérdidas volumétricas, deformaciones y abrasiones. Las numerosas fricciones y la acumulación de la grasa de los dedos, fruto del constante uso, han provocado el desgaste de zonas muy sensibles, por ejemplo, donde se encontraba la firma de la casa comercial del Dr. Auzoux. Gracias a la localización de modelos iguales en otras colecciones donde sí se han conservado las firmas originales, se ha podido estimar su ubicación y la correspondiente datación de la escultura (figura 351).



Figura 351. Ubicación de la firma en la *Lengua clástica*. a) © Proantic. b) © Van Leest Antiques. c) Lengua de la Universidad Complutense de Madrid. © Emanuel Sterp Moga.

Además de los contaminantes atmosféricos que se han ido depositando sobre la obra, la grasa de los dedos y manos ha generado una capa compacta de suciedad, ocultando el aspecto real que

tuvo el modelo en su origen. Por otro lado, gran parte de las partículas de suciedad han quedado englobadas en la capa superficial gelatinosa debido a unas condiciones ambientales inapropiadas.

Finalmente, las intervenciones históricas, consistentes en barnizar la pieza de manera muy irregular, las reintegraciones volumétricas con materiales poco compatibles y los repintes en varias áreas, han dejado sus huellas sobre el artefacto durante el siglo XX, poniendo en grave peligro la salvaguarda del bien (figura 352).

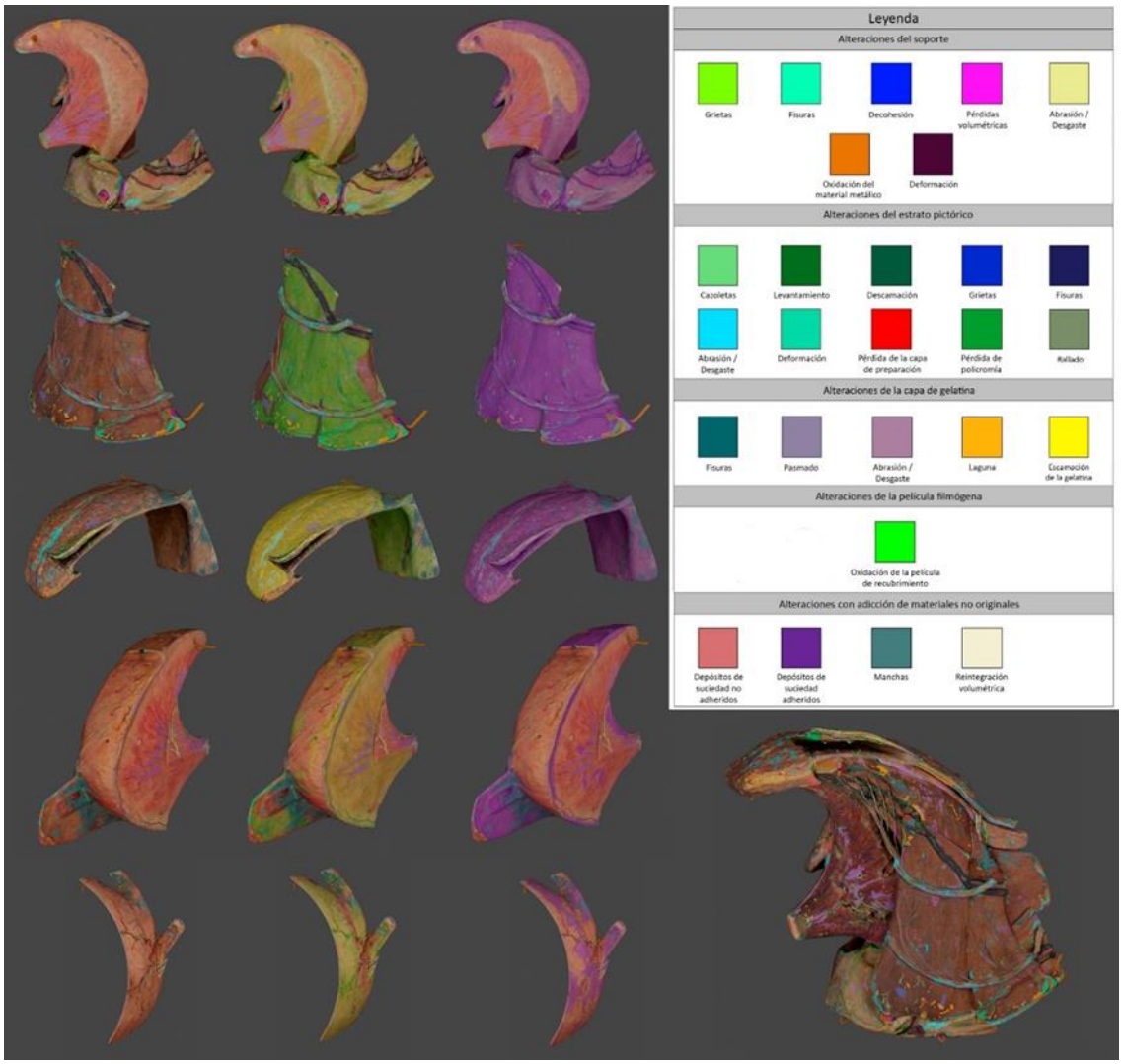


Figura 352. Cartografías de patologías. Ver 1º modelo 3D (Alteraciones del soporte, alteraciones del estrato pictórico y alteración de la capa de gelatina). Ver 2º modelo 3D (Alteraciones del soporte, alteraciones del estrato pictórico, alteración de la capa de gelatina y la oxidación de la película filmógena). Ver 3º modelo 3D (Alteraciones del soporte, alteraciones del estrato pictórico, alteración de la capa de gelatina, oxidación de la película filmógena y alteraciones con adiciones de materiales no originales). © Emanuel Sterp Moga.

Con el propósito de ahondar con mayor detalle en el estado de conservación y analizar diversos tratamientos de restauración, se ha procedido a digitalizar la escultura mediante la fotogrametría. Dada la importancia de lograr la mayor calidad y rigor en la textura de color, se ha recurrido únicamente a esta técnica de registro.

Durante el análisis de la obra real y del modelo virtual, las diferentes capas de suciedad superficial y las películas filmógenas oxidadas han dificultado la correcta lectura anatómica del

modelo. Con el objetivo de conocer el aspecto que pudo tener en el momento de su fabricación y también para analizar el grado de limpieza a alcanzar durante la intervención, se ha recurrido a la restauración virtual. Del mismo modo, se ha considerado interesante realizar diferentes pruebas de reintegración cromática que ayudarán a seleccionar la técnica y el procedimiento de aplicación más apropiados.

Las tareas encomendadas se centraron en el análisis del proceso de limpieza virtual, en la fase de reintegración cromática virtual y en el traslado posterior de los resultados durante la intervención en la obra real. El resto de los tratamientos enfocados a la consolidación del soporte, las reintegraciones volumétricas, la fijación de los estratos pictóricos, el relleno y la nivelación de las lagunas, fueron llevados a cabo por miembros del equipo investigador dentro del marco del proyecto I+D ya referenciado.

6.4.2. Aplicación de la restauración virtual para la toma de decisiones

6.4.2.1. Digitalización 3D

Los modelos obtenidos mediante la fotogrametría (figura 353) mostraron un buen registro volumétrico y una altísima calidad en la textura de color. En la tabla 21 se recogen las características de captura y los resultados alcanzados de las 5 piezas que conforman el modelo clástico (figura 354).



Figura 353. Proceso de registro fotogramétrico. © Emanuel Sterp Moga.



Figura 354. Número de piezas las cuales figuran en la tabla 21 (Ver modelo 3D). © Emanuel Sterp Moga.

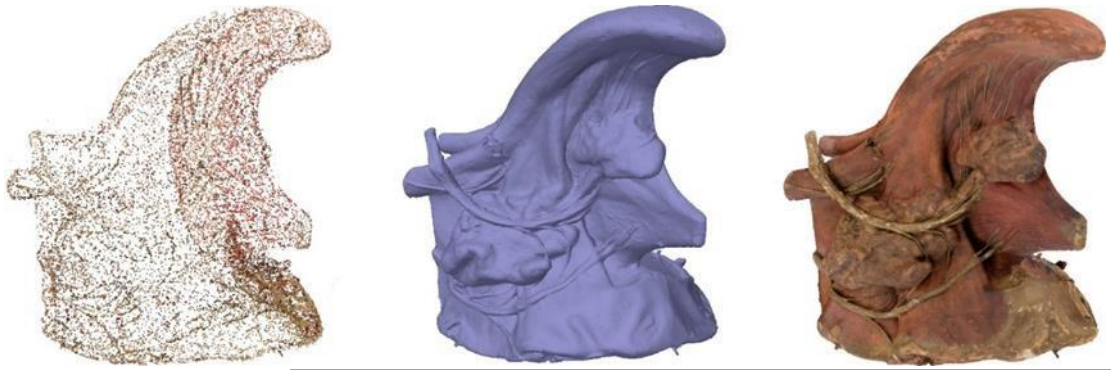
Lengua Clástica					
Fotogrametría Modelo y objetivo: Canon EOS 5D Mark II (50 mm)					
					
	1	2	3	4	5
Parámetros	100 ISO, diafragma f/8 y obturador 1/25	100 ISO, diafragma f/8 y obturador 1/25	100 ISO, diafragma f/8 y obturador 1/25	100 ISO, diafragma f/8 y obturador 1/25	100 ISO, diafragma f/8 y obturador 1/25
Formato de archivo	TIFF	TIFF	TIFF	TIFF	TIFF
Nº fotografías	54	70	124	127	126
Error de reproyección	0 pix	0 pix	0 pix	0 pix	0 pix
Precisión	Máxima	Máxima	Máxima	Máxima	Máxima
Pre-selección	Genérica	Genérica	Genérica	Genérica	Genérica
Calidad	Extra alta	Extra alta	Extra alta	Extra alta	Extra alta
Nube de puntos dispersa	18.289	20.355	39.842	38.548	43.316
Malla a través de mapas de profundidad	1.236.494 faces	1.438.448 faces	3.499.548 faces	3.347.995 faces	3.728.165 faces
Textura	8,192 x 8,192	8,192 x 8,192	8,192 x 8,192	8,192 x 8,192	8,192 x 8,192

Tabla 21. Características de la captura y resultados obtenidos. © Emanuel Sterp Moga.

6.4.2.2. Restauración virtual

6.4.2.2.1. Limpieza virtual

Con el objetivo de obtener unos parámetros fiables, se realizaron numerosas mediciones en diferentes colores para obtener los valores RGB y HSV (Véase el apartado 4.6.2. Limpieza virtual). En primer lugar, se tomaron como referencias todas aquellas zonas que no presentaban suciedad superficial, ni tampoco películas filmógenas oxidadas (figuras 355 a y b y 356 a). Los valores obtenidos serían similares a los colores originales que se tienen que alcanzar durante la limpieza virtual. En segundo lugar, se tomaron varias referencias en diferentes zonas cubiertas por depósitos de suciedad superficial, adherida y no adherida, así como en las películas filmógenas oxidadas para contrastar dichos valores con los hallados en otras áreas donde estos materiales no estaban presentes (figuras 355 c y d y 356 b). Estos parámetros han servido de referencia para guiarnos durante la limpieza virtual.

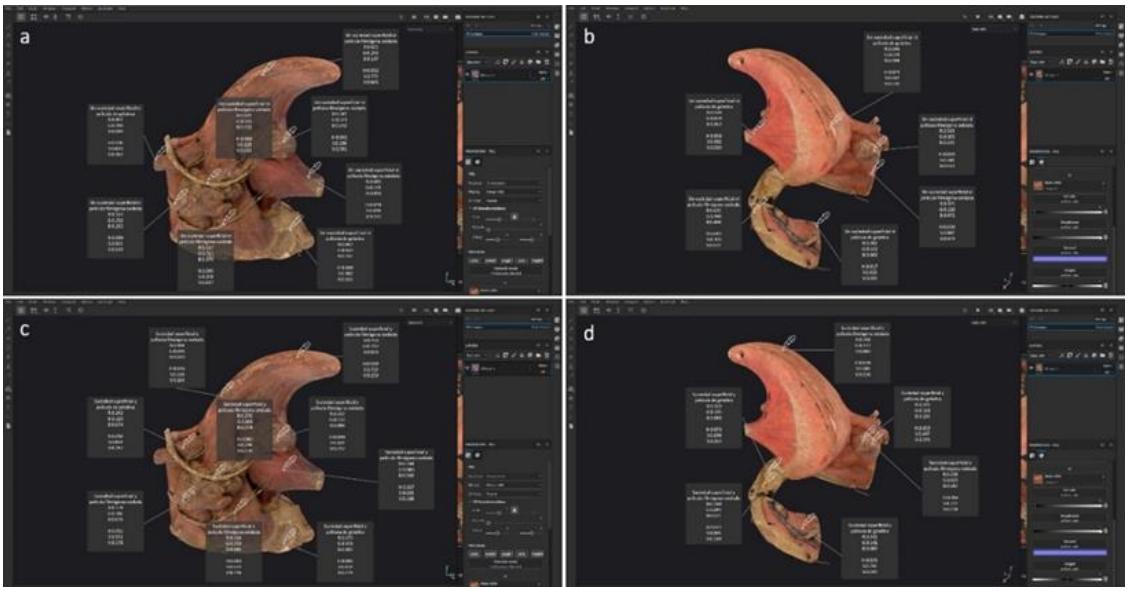


Figura 355. a y b) Medición de los valores cromáticos en zonas donde no presenta suciedad superficial, película de gelatina ni película filmógena oxidada. c y d) Medición de los valores cromáticos en zonas donde presenta suciedad superficial, película de gelatina y película filmógena oxidada. © Emanuel Sterp Moga.

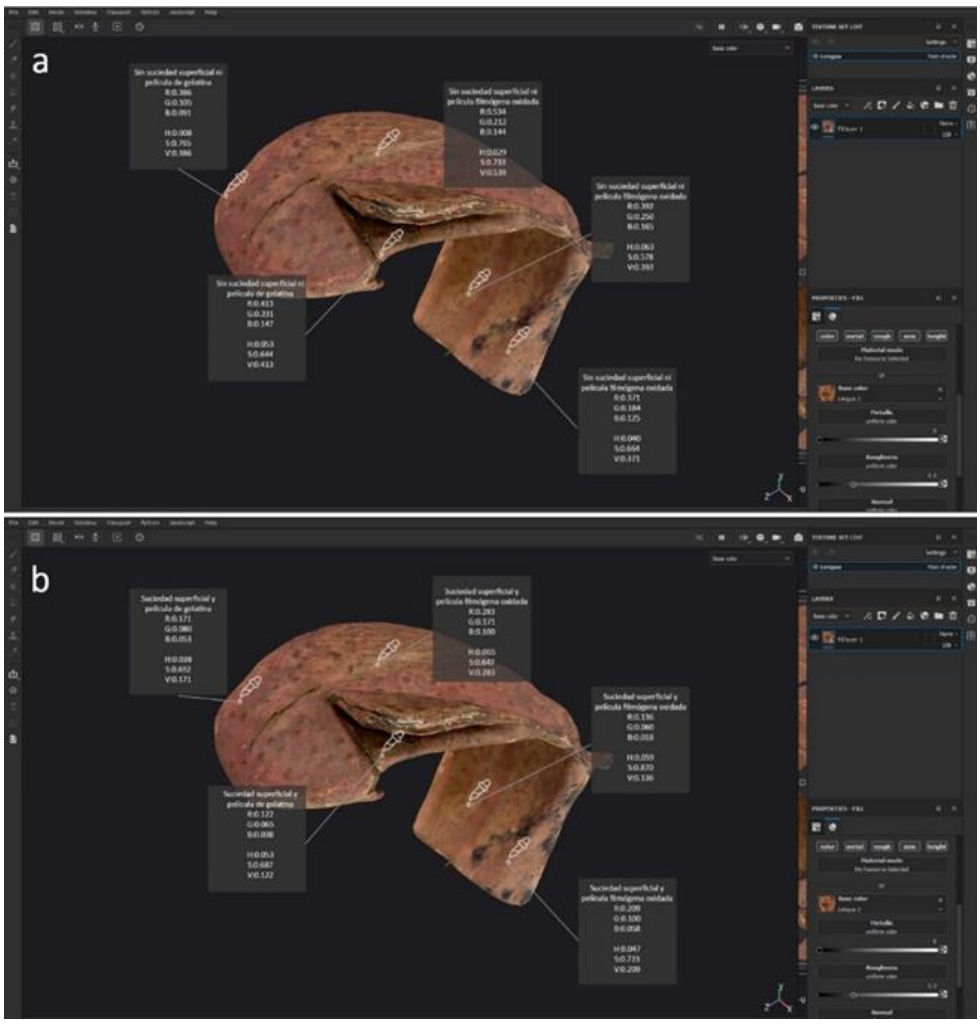


Figura 356. a) Medición de los valores cromáticos en zonas donde no presenta suciedad superficial, película de gelatina ni película filmógena oxidada. b) Medición de los valores cromáticos en zonas donde presenta suciedad superficial, película de gelatina y película filmógena oxidada. © Emanuel Sterp Moga.

Concluida la fase de mediciones, se procedieron a realizar diversos ensayados de limpieza. Primero, se efectuó una prueba para retirar la suciedad superficial, otra para la remoción de las películas filmógenas y, una última para eliminar los repintes. Para ello se emplearon las herramientas *draw y clone* en modo *overlay* (figura 357). Con esta operación, se pudieron estimar los niveles de limpieza necesarios en cada caso y ajustar correctamente los parámetros de las herramientas pertinentes para su ejecución. En todo momento, se efectuó un seguimiento constante de los valores a alcanzar de cada color con la finalidad de lograr la máxima fidelidad, tomando como referencia los parámetros hallados en las mediciones de los colores en los cuales no presentaba suciedad superficial, ni películas filmógenas oxidadas.

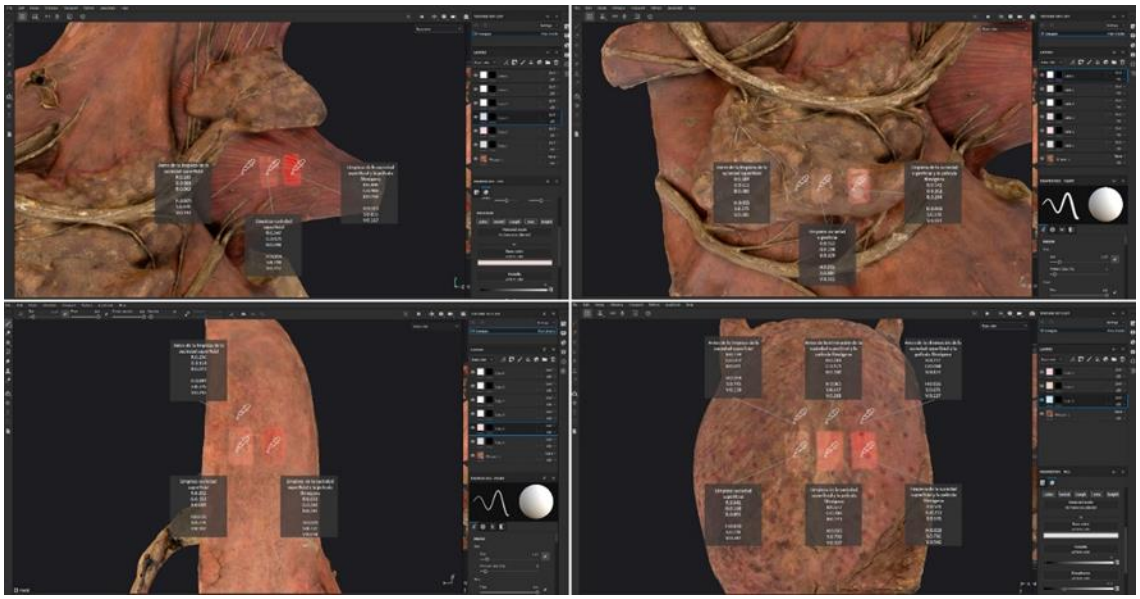


Figura 357. Ensayo de limpieza en diferentes zonas de la obra. © Emanuel Sterp Moga.

En función de los resultados obtenidos en los ensayados, se procedió a realizar la limpieza en toda la escultura. Gracias a los parámetros de referencia, se lograron resultados de gran precisión y rigor en dicho proceso (figuras 358 y 359). Concluida esta fase, se debatieron los resultados alcanzados y finalmente se decidió proceder a la intervención en la obra real con el fin de retirar las sustancias añadidas por el paso del tiempo y la acción humana, así como devolver al modelo un acabado más acorde al que pudo tener en origen. El resultado obtenido ha permitido que el objeto se muestre en todos sus valores, recuperando su correcta lectura e interpretación.

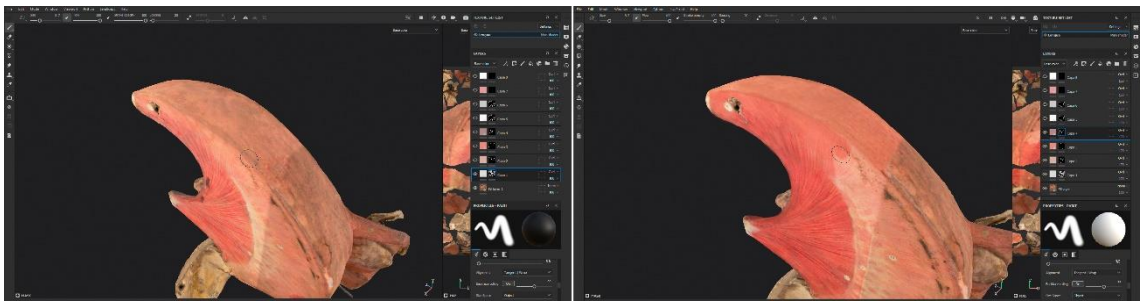


Figura 358. Proceso de limpieza virtual. Remoción de las capas de suciedad superficial no adheridas y adheridas. © Emanuel Sterp Moga.

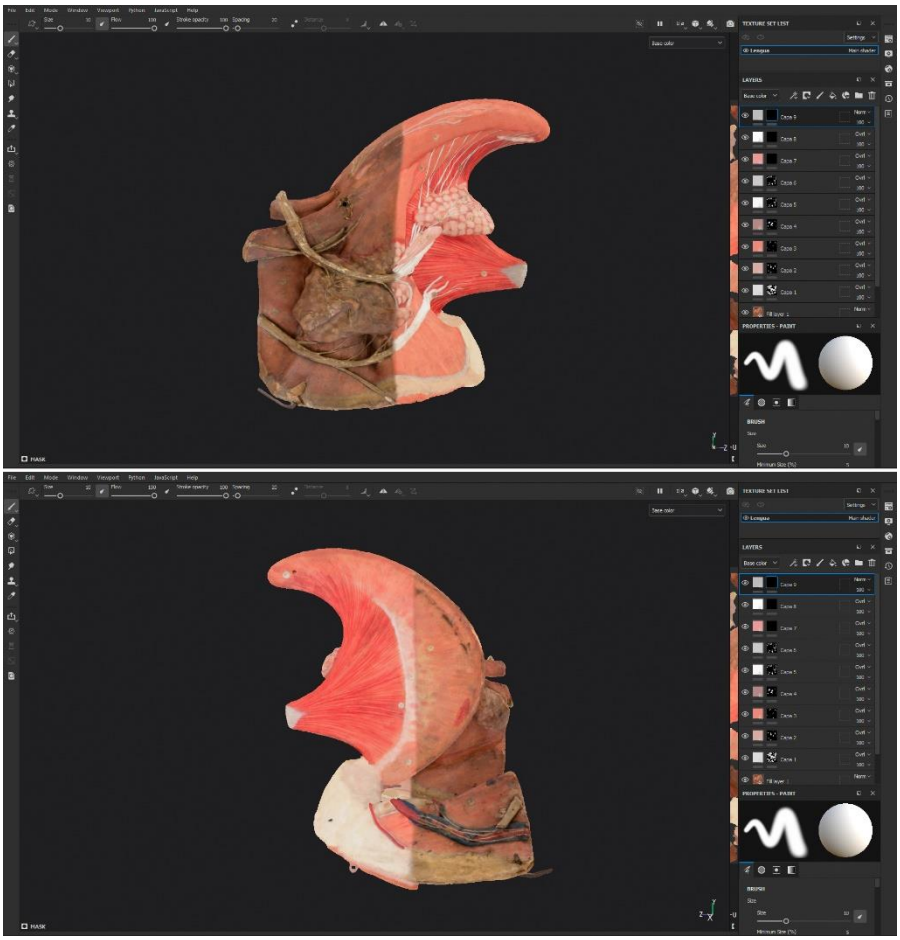


Figura 359. Comparación del estado inicial y de la limpieza virtual en la que se ha eliminado las partículas de suciedad superficial no adheridas y adheridas, así como las películas filmógenas oxidadas y repintes (Ver modelo 3D). © Emanuel Sterp Moga.

6.4.2.2.2. Reintegración cromática virtual

Con el fin de evitar diferentes pruebas sobre la obra original y, con ello, reducir el exceso de manipulaciones y los posibles riesgos derivados de ellas, se optó por ensayar sobre el modelo virtual tanto la técnica como el procedimiento más adecuado para la reintegración cromática de lagunas. En concreto, se examinaron dos técnicas: el puntillismo y la selección cromática (figuras 360 y 362). En cada una de ellas se aplicaron los colores por capas y se recurrió a la elección de los colores primarios cian, magenta y amarillo, siguiendo un modelo similar al de la síntesis sustractiva CMYK y los colores secundarios derivados de los mismos azul, rojo y verde. Para trabajar con la técnica del puntillismo, se recurrió al pincel kyle 53 (figura 361) y, en el caso de la selección cromática, al pincel kyle 71 (figura 363) (Véase el apartado 4.6.4. Reintegración cromática virtual). De esta forma, fue posible determinar el orden de aplicación de las capas de color, la orientación de los puntos y de las líneas, así como la densidad correspondiente a la carga de los pigmentos en cada caso tras realizar un estudio minucioso de los parámetros de opacidad. Teniendo en cuenta las características pictóricas que presentaba el artefacto, las pruebas llevadas a cabo determinaron que el puntillismo era la técnica que permitía conseguir una mejor integración de las lagunas en relación con las calidades estéticas de las zonas circundantes.

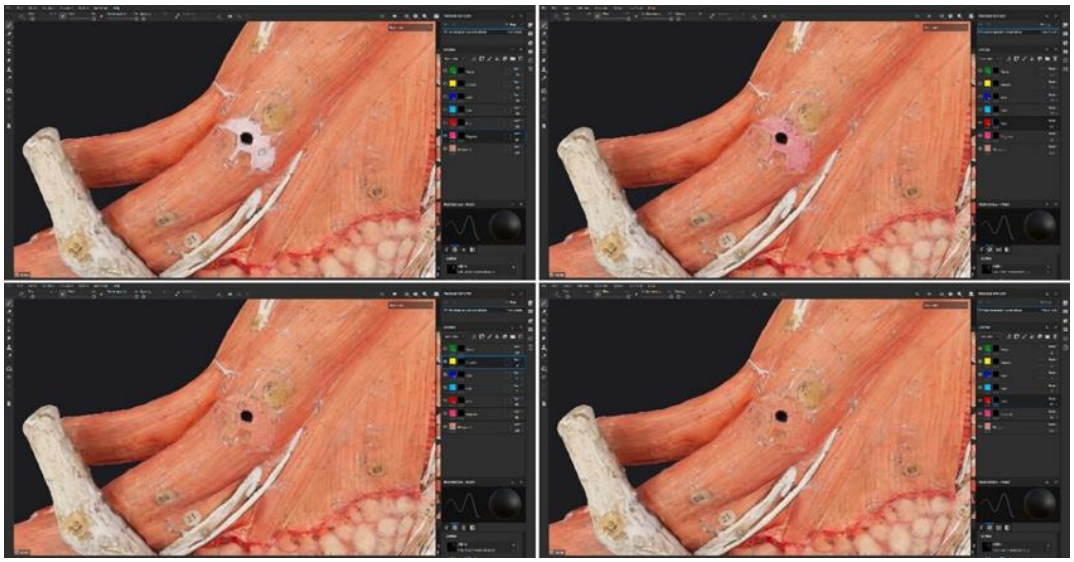


Figura 360. Proceso de reintegración cromática mediante la técnica del puntillismo. © Emanuel Sterp Moga.

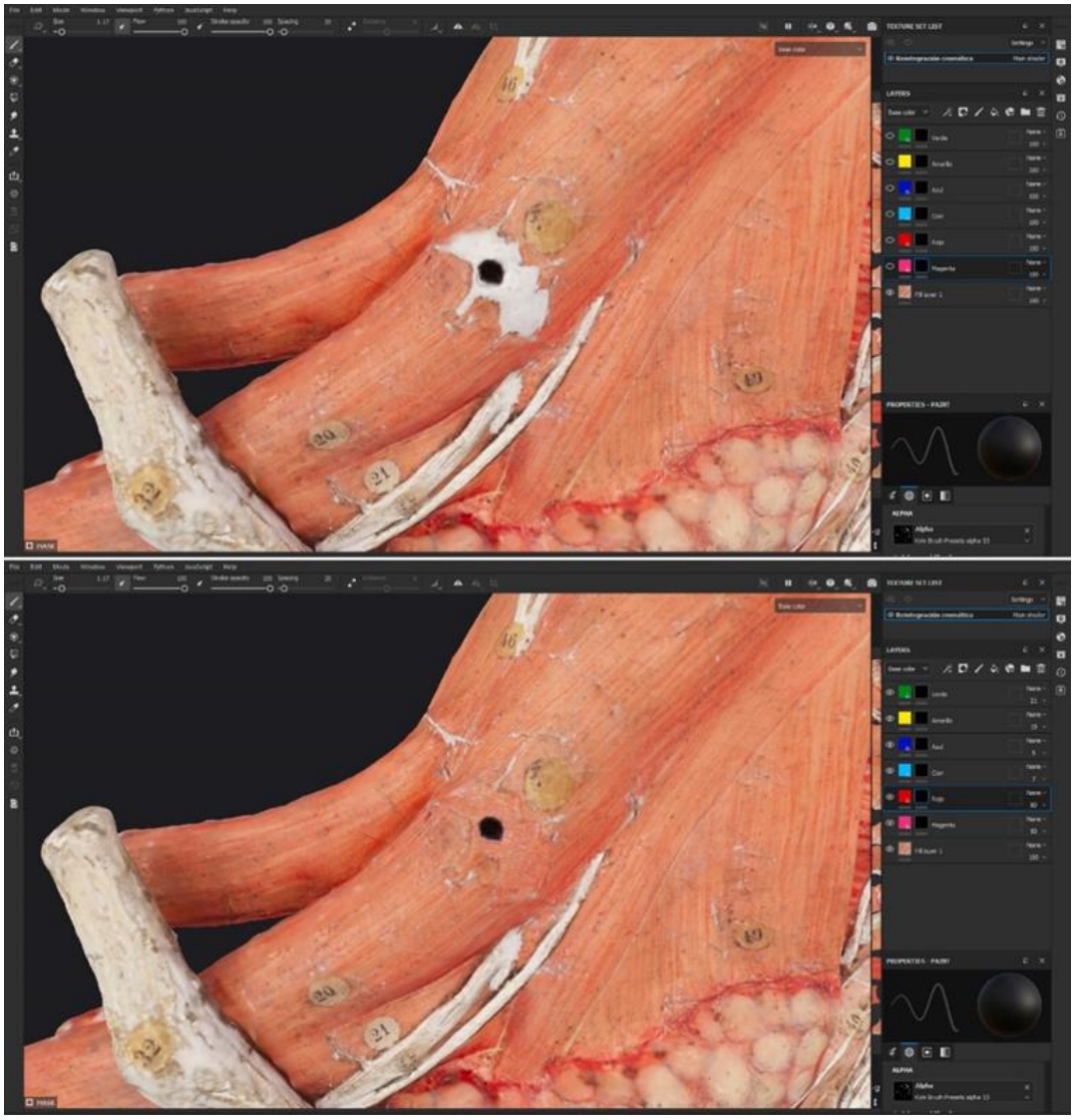


Figura 361. Antes y después de la reintegración cromática mediante la técnica del puntillismo. © Emanuel Sterp Moga.

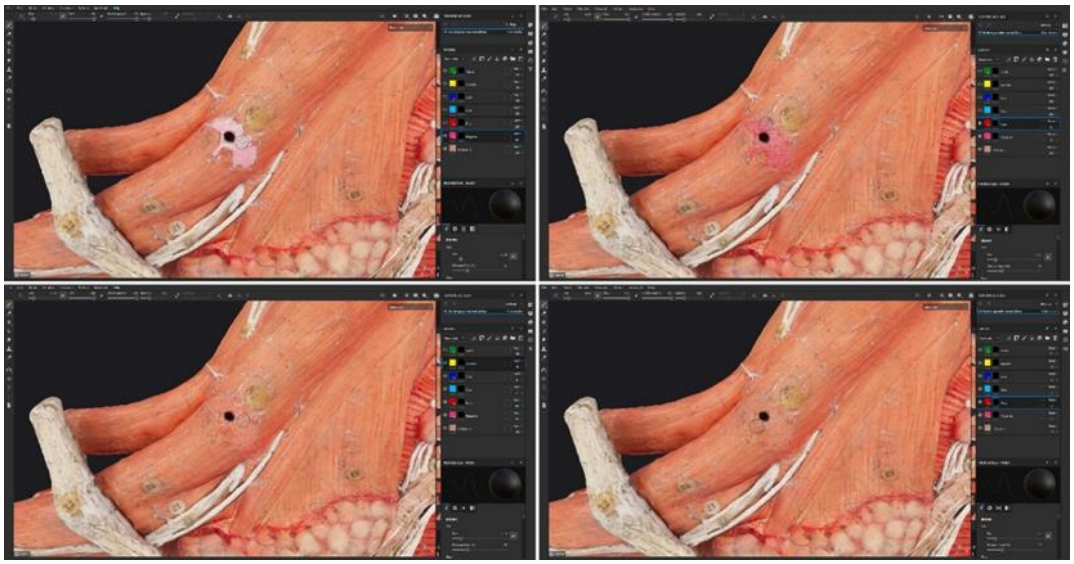


Figura 362. Proceso de reintegración cromática mediante la técnica de la selección cromática. © Emanuel Sterp Moga.

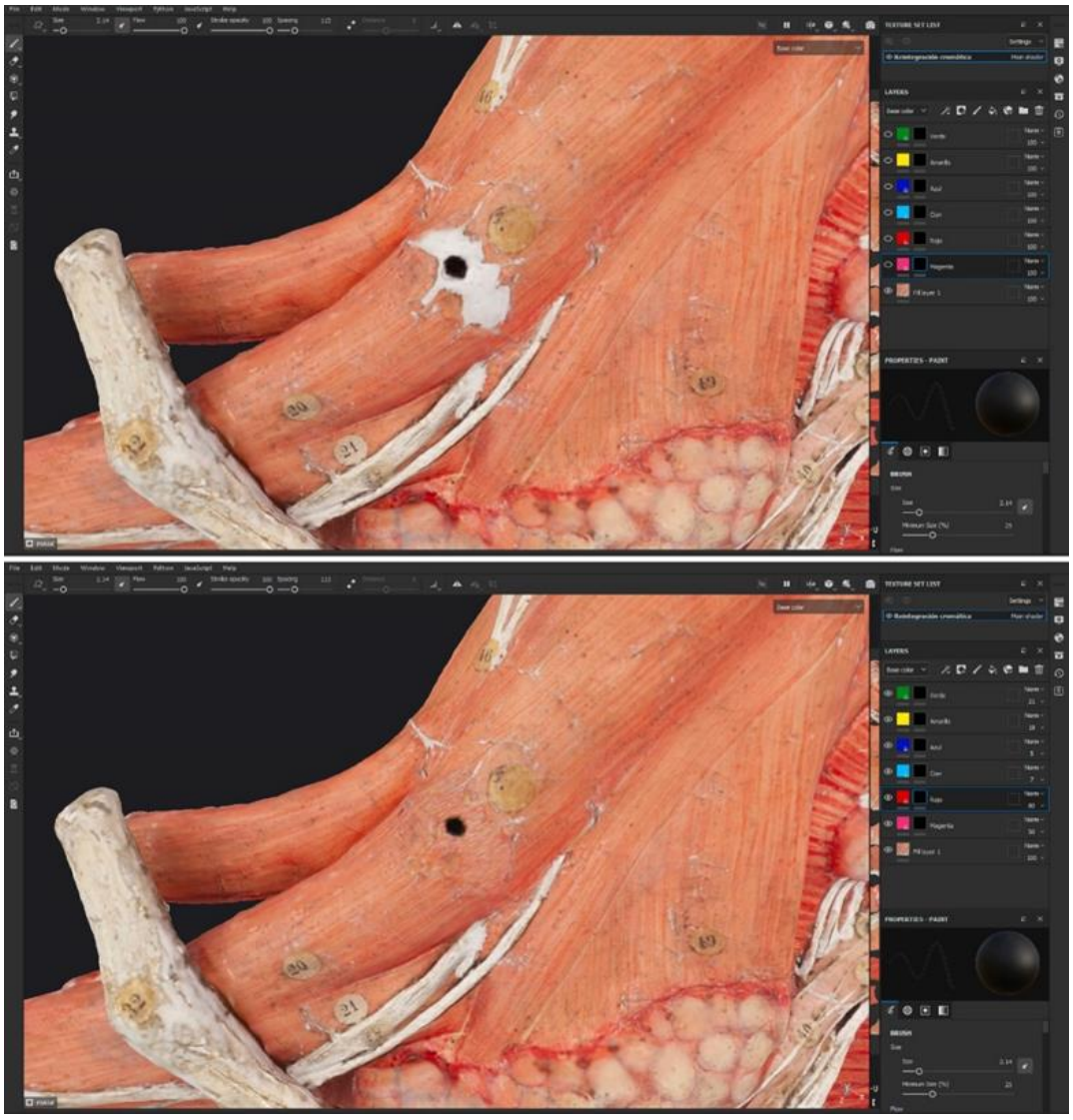


Figura 363. Antes y después de la reintegración cromática mediante la técnica de la selección cromática. © Emanuel Sterp Moga.

6.4.3. Intervención en la obra real

6.4.3.1. Ensayo de limpieza

En función del estado de conservación que presenta la obra y las características materiales, se procedió a analizar su comportamiento y su sensibilidad con el fin de poder establecer los sistemas de limpieza más adecuados.

En las zonas donde la suciedad superficial no estaba firmemente adherida, se procedió a su retirada mediante métodos mecánicos, en seco, empleando diferentes brochas de pelo suave. Durante los movimientos utilizados para su retirada, se recurrió a una micro aspiración con una succión controlada. Sin embargo, este método resultó ineficaz en los casos en que la suciedad superficial se había adherido a la capa de gelatina o películas filmógenas aplicadas con posterioridad. En consecuencia, se recurrió a procesos de limpieza húmedos basados en sistemas acuosos. A pesar de las características materiales de la obra, se consideró que la aplicación de los sistemas acuosos compuestos por bajas concentraciones de ácido cítrico o fosfórico añadido al agua desmineralizada, previo a los ensayados de conductividad eléctrica y pH realizados, podrían ser una alternativa eficaz. Este enfoque permite un proceso de limpieza gradual y libre de riesgos asociados a la presencia de residuos una vez finalizada la fase de aclarado. No obstante, tras efectuar diversas pruebas, los resultados fueron poco eficaces, ya que apenas se removía la suciedad superficial adherida a la película de gelatina. Respecto a las películas filmógenas oxidadas no se removieron en absoluto. Además, en determinadas áreas se producían ligeros hinchamientos del soporte y, con ello, de los estratos de preparación y películas pictóricas. Dicho ensayo de limpieza resultó poco homogéneo y con diferencias en cada una de las áreas de la obra. Dadas las dificultades encontradas, se efectuaron diversos ensayados de limpieza en húmedo utilizando disolventes orgánicos siguiendo el protocolo de prueba de Cremonesi (figuras 364, 365, 366 y 367).



Figura 364. Ensayo de limpiezas con el sistema de disolventes orgánicos en la pieza 4. © Emanuel Sterp Moga.

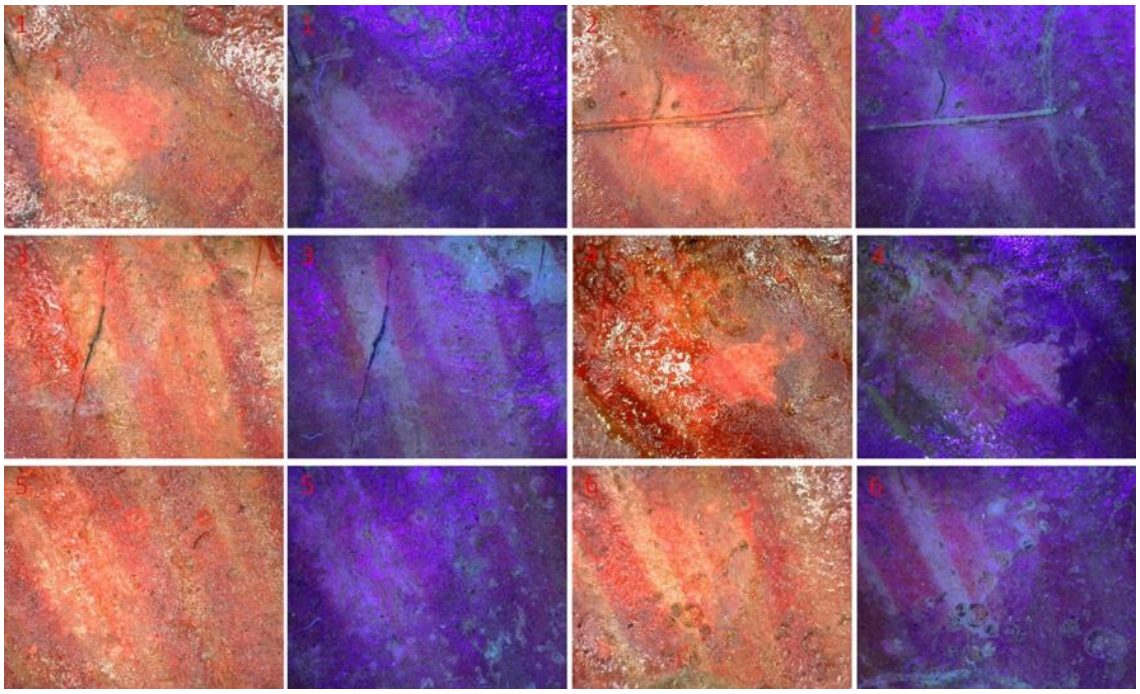


Figura 365. Detalles mediante el microscopio digital Dino-Lite de cada uno de los ensayados de limpiezas con los sistemas de disolventes orgánicos en la pieza 4. Luz visible y fluorescencia visible inducida por radiación UV. © Emanuel Sterp Moga.

En las tablas 22 y 23 se recogen los resultados obtenidos después de aplicar el test de Cremonesi.

Pieza 4							
Prueba nº	Eliminación de la película de barniz	Halo	Blanque amiento	Homogeneidad	Tiempo de trabajo	Nº de aplicaciones	Hinchamiento
1-IA2	Rápida	No	No	Si	10s	1	No
2-IE2	Rápida	No	No	Si	10s	1	No
3-IA4	Muy Rápida	Si	No	Si	6s	1	No
4-IE4	Muy Rápida	No	No	Si	4s	1	No
5-IA6	Muy Rápida	Si	No	Si	2s	1	No
6-IE6	Muy Rápida	No	No	Si	2s	1	No

Tabla 22. Resultados de los ensayos de limpieza en la pieza 4. © Alicia Sánchez Ortiz y Emanuel Sterp Moga.



Figura 366. Ensayo de limpiezas con el sistema de disolventes orgánicos en la pieza 5. © Emanuel Sterp Moga.

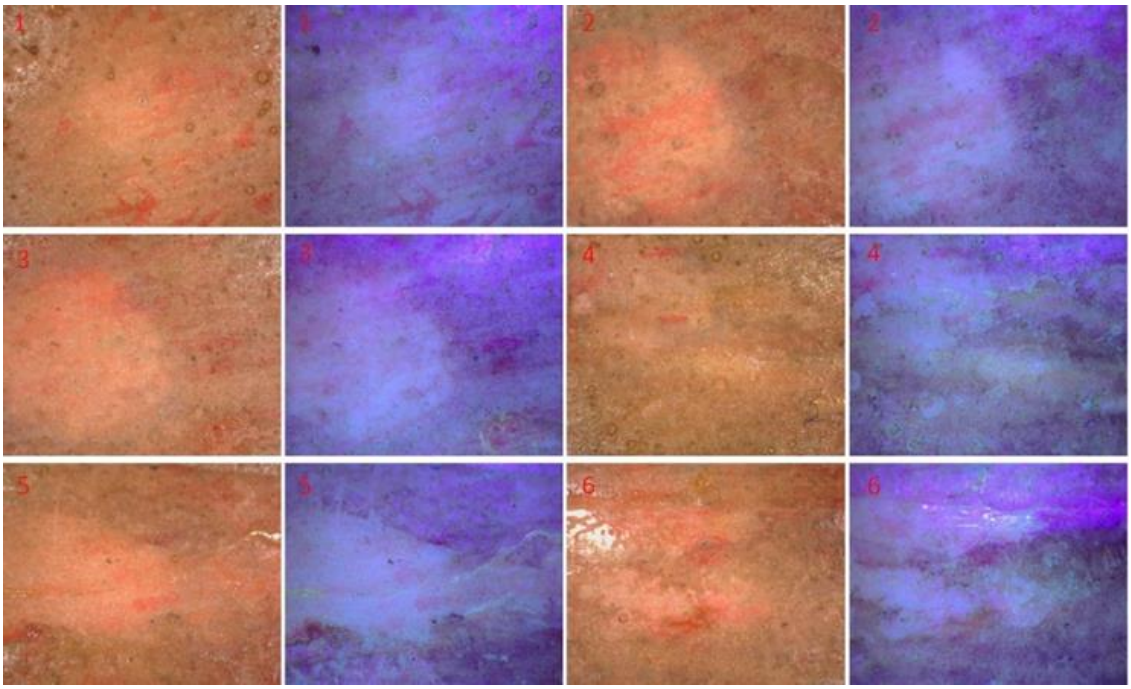


Figura 367. Detalles mediante el microscopio digital Dino-Linte de cada uno de los ensayados de limpiezas con los sistemas de disolventes orgánicos en la pieza 5. Luz visible y fluorescencia visible inducida por radiación UV. © Emanuel Sterp Moga.

Pieza 5							
Prueba nº	Eliminación de la película de barniz	Halo	Blanque amiento	Homogeneidad	Tiempo de trabajo	Nº de aplicaciones	Hinchamiento
1-IA2	Rápida	No	No	Si	10s	1	No
2-IE2	Muy Rápida	No	No	Si	5s	1	No
3-IA4	Muy Rápida	Si	No	Si	5s	1	No
4-IE4	Muy Rápida	No	No	Si	5s	1	No
5-IA6	Muy Rápida	No	No	Si	3s	1	No
6-IE6	Muy Rápida	No	No	Si	1s	1	No

Tabla 23. Resultados de los ensayos de limpieza en la pieza 5. © Alicia Sánchez Ortiz y Emanuel Sterp Moga.

6.4.3.1.1. Resultados y discusiones de los sistemas de limpieza

Los ensayos mediante los disolventes orgánicos basados en el test de Cremonesi permitieron retirar las capas de suciedad adherida y las películas filmógenas oxidadas sin alterar o remover la película original de gelatina. Este último aspecto fue determinante para la elección de los sistemas de limpieza mediante disolventes orgánicos, ya que los sistemas acuosos hinchaban dichos estratos, provocando su desprendimiento y eliminación en determinadas zonas durante la frotación del hisopo.

Las disoluciones más eficaces fueron IA2 y IE2. Sin embargo, en todas las mezclas que incluían acetona en su composición, se produjo un pequeño halo alrededor de la suciedad superficial o película filmógena oxidada, pero no pasmó la superficie de la zona retirada. Para minimizar la aplicación de la humedad durante el proceso de limpieza, se analizaron las propiedades de los disolventes orgánicos. Se observó que la película de gelatina y las capas pictóricas no sufrían ningún hinchamiento, además, su evaporación se producía rápidamente. En consecuencia, se decidió utilizar la disolución con base de etanol formulada con la composición IE2 e IE4, según las zonas requeridas.

6.4.3.2. Aplicación en la obra real

6.4.3.2.1. Limpieza de la suciedad superficial y remoción de las películas filmógenas

Los resultados obtenidos mediante el proceso de limpieza con los sistemas seleccionados fueron muy buenos (figuras 368 y 369). Dado el poco tiempo de contacto necesario con la superficie para remover las capas de suciedad superficial adherida y las películas filmógenas oxidadas aproximadamente 10s, se logró una limpieza muy homogénea. En ningún momento la película de gelatina original se vio alterada o removida (figura 370).



Figura 368. Proceso de remoción de la suciedad superficial adherida, las películas filmógenas oxidadas y repintes. © Emanuel Sterp Moga.

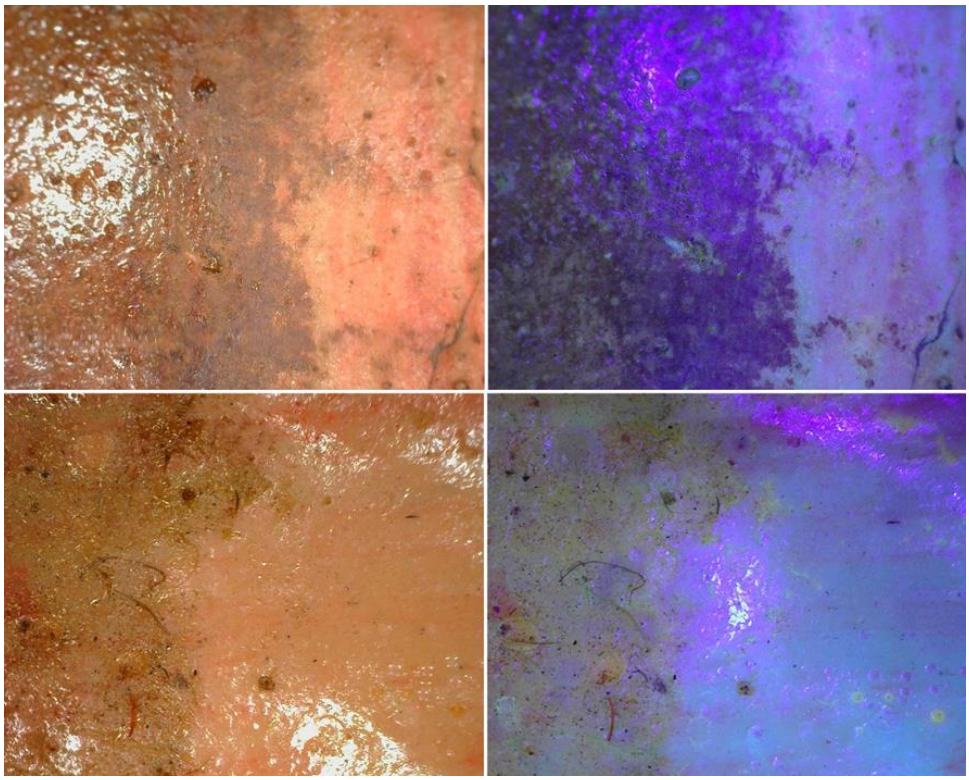


Figura 369. Detalles mediante el microscopio digital Dino-Lite del proceso de remoción de las capas de suciedad adherida y películas filmógenas oxidadas. Luz visible y fluorescencia visible inducida por radiación UV. © Emanuel Sterp Moga.

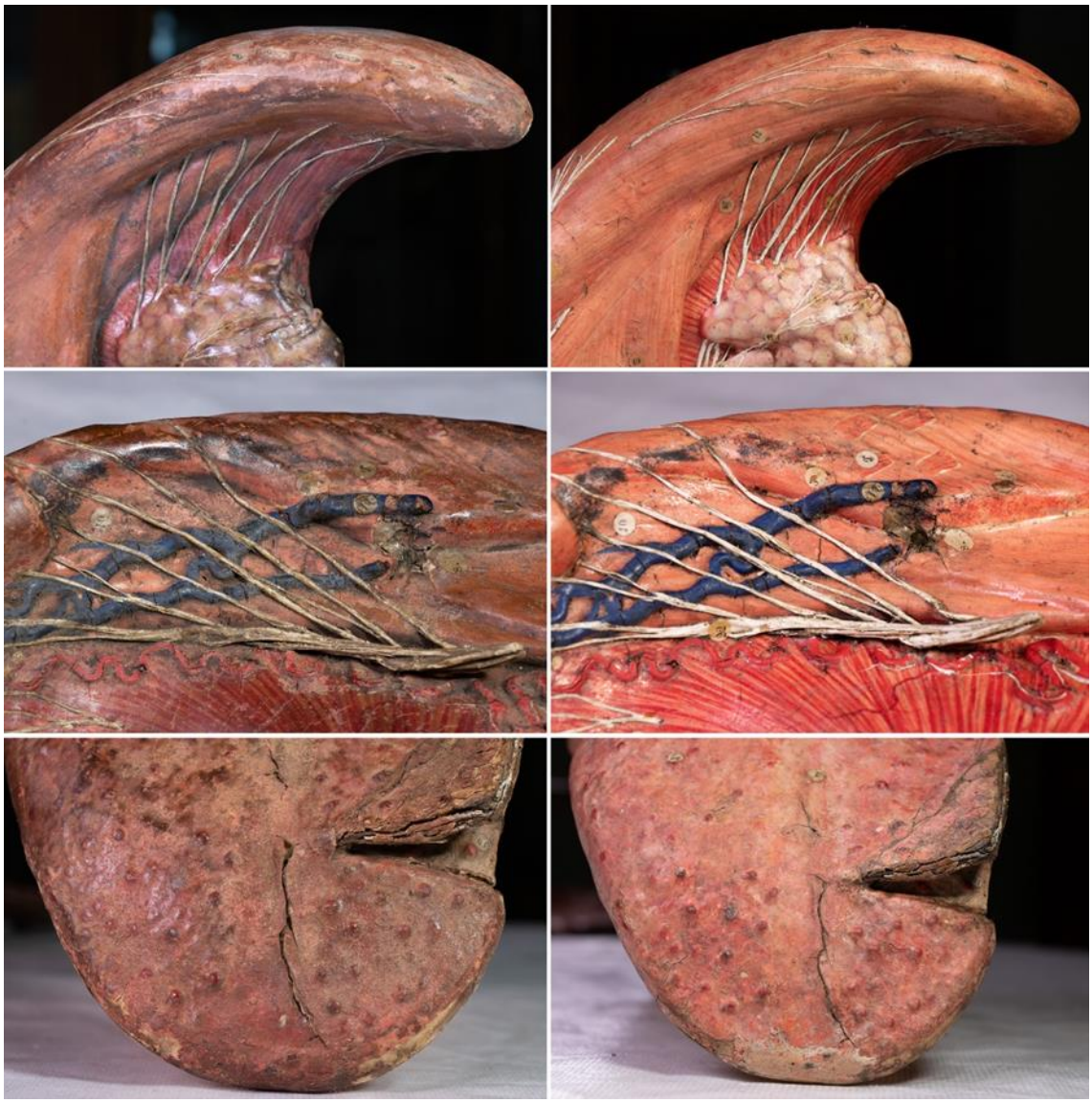


Figura 370. Detalles antes y después del proceso de remoción de la suciedad superficial adherida, las películas filmógenas oxidadas y repintes. © Emanuel Sterp Moga.

6.4.3.2.2. Reintegración cromática

Durante el proceso de limpieza, diversas manchas de color oscuro, que podrían estar relacionadas con una pátina biogénica, no se pudieron eliminar de ninguna manera, ya que estas habían penetrado en la película de gelatina y en los estratos pictóricos. Dada la dificultad hallada durante su retirada, se decidió finalmente reintegrar cromáticamente las manchas para no deteriorar la pieza durante su remoción, ya que, de otro modo, existía el riesgo de eliminar la capa de gelatina en dichas zonas, o alterar las capas pictóricas (figuras 371 y 372). La reintegración cromática de estas manchas y de las lagunas existentes se llevó a cabo mediante la técnica del puntillismo, empleando acuarelas QoR® Golden, diluidas en etanol para aportar la mínima humedad.



Figura 371. Proceso de reintegración cromática mediante la técnica del puntillismo. © Emanuel Sterp Moga.

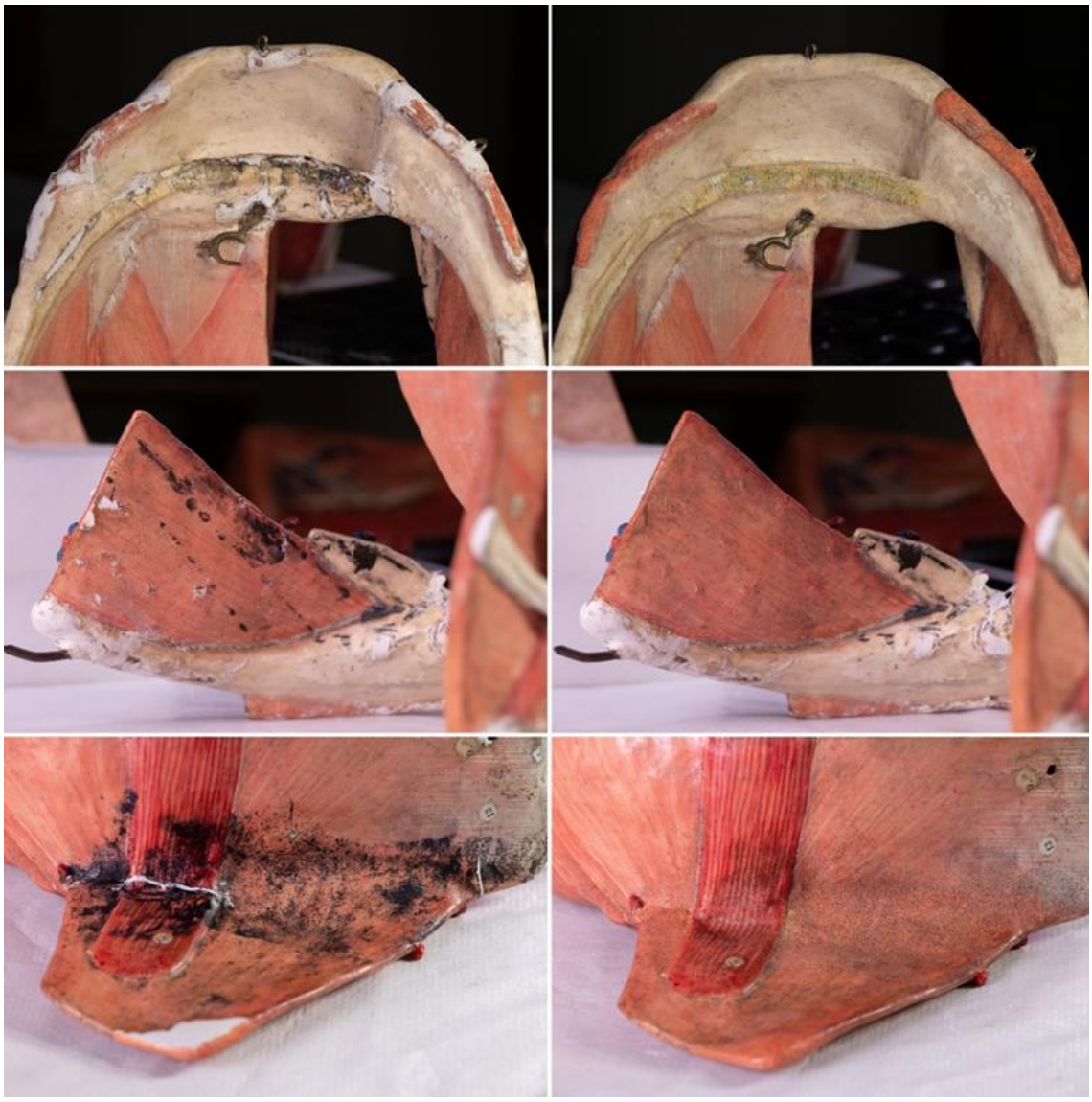


Figura 372. Antes y después de la reintegración cromática correspondientes a la superficie de diversas manchas negras. © Emanuel Sterp Moga.

A continuación se muestran los resultados obtenidos en las 5 piezas que conforman la lengua clástica tras haber finalizado todos los procesos de conservación y restauración (figuras 373, 374, 375, 376 y 377) (Ver modelo completo antes y después de la restauración 3D).



Figura 373. *Lengua clástica*, pieza 1 antes (Ver modelo 3D) y después de la restauración (Ver modelo 3D). © Emanuel Sterp Moga.



Figura 374. *Lengua clástica*, pieza 2 antes (Ver modelo 3D) y después de la restauración (Ver modelo 3D). © Emanuel Sterp Moga.



Figura 375. *Lengua clástica*, pieza 3 antes (Ver modelo 3D) y después de la restauración (Ver modelo 3D). © Emanuel Sterp Moga.



Figura 376. *Lengua clástica*, pieza 4 antes (Ver modelo 3D) y después de la restauración (Ver modelo 3D). © Emanuel Sterp Moga.

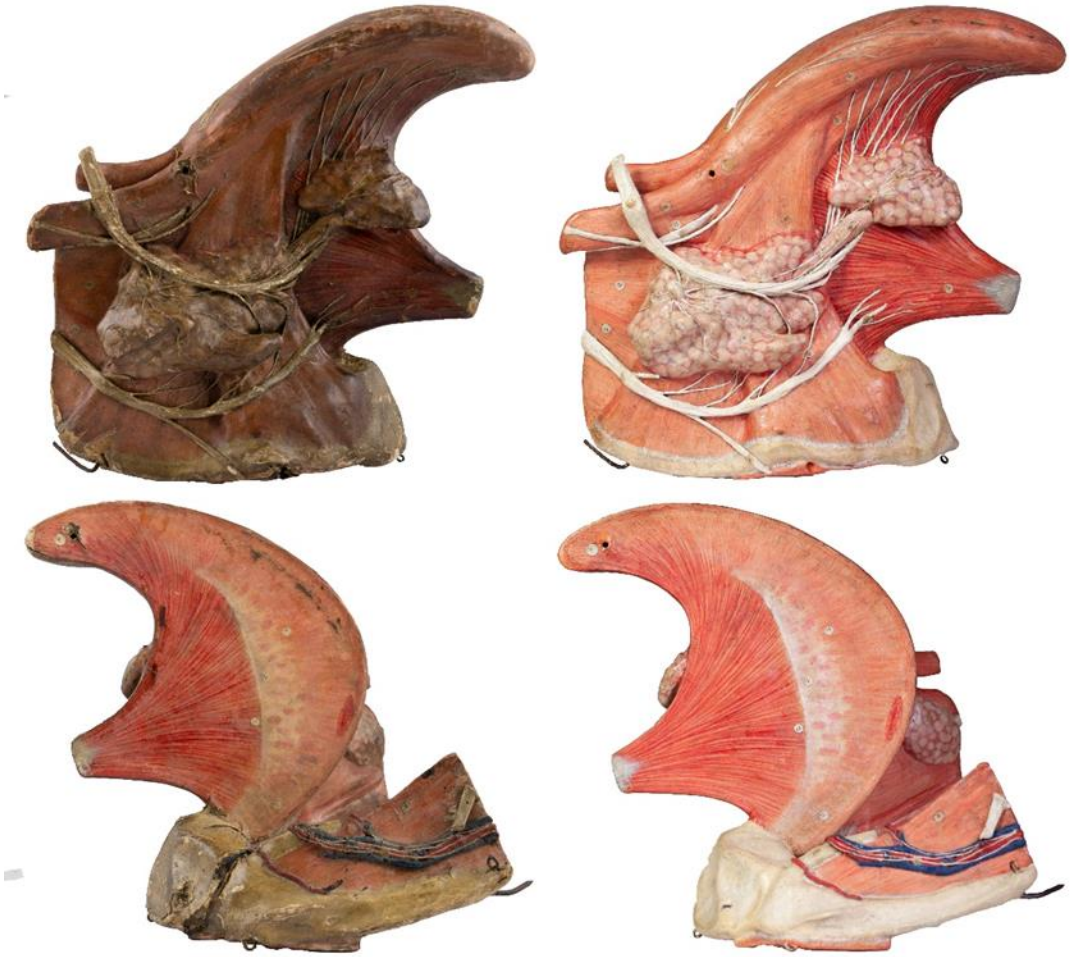


Figura 377. *Lengua clástica*, pieza 5 antes (Ver modelo 3D) y después de la restauración (Ver modelo 3D). © Emanuel Sterp Moga.

6.4.4. Resultados y discusión

Los estudios llevados a cabo mediante la restauración virtual acerca de la limpieza y la reintegración cromática han permitido analizar con detalle las posibles estrategias de intervención en relación con cada uno de los procesos de restauración.

La limpieza virtual ha hecho posible recuperar el aspecto inicial que tuvo el artefacto en su origen y valorar el grado de limpieza necesario durante la intervención en la obra real. Con esta metodología, se ha podido debatir y complementar la toma de decisiones para llevar a cabo los tratamientos, teniendo total seguridad y certeza de los resultados que se obtendrían. Esta herramienta ha resultado determinante cuando se trata de procesos irreversibles y tan controvertidos como es el de la limpieza.

Respecto a la reintegración cromática, también ha resultado muy útil el análisis de la técnica y procedimiento de aplicación más adecuado. Gracias a él, se ha podido establecer el orden de aplicación de los colores, la densidad de cada uno, así como el trazo más apropiado. Asimismo, se han evitado numerosas manipulaciones innecesarias durante las pruebas para hallar el método de reintegración más ajustado a cada escultura.

En cuanto a los tratamientos de limpieza en la obra real, los sistemas basados en disolventes orgánicos del protocolo de pruebas de Cremonesi fueron eficientes. La aplicación de la disolución sobre la superficie ha resultado ser mínima y dada la alta capacidad de evaporación de los disolventes, se ha considerado el método de limpieza más eficaz y respetuoso con el artefacto. Los disolventes orgánicos utilizados han permitido retirar la suciedad adherida y las películas filmógenas oxidadas de una sola aplicación con un tiempo aproximado de 10 segundos, sin alterar la capa de gelatina original.

Finalmente, la reintegración cromática ha resultado ser un proceso muy rápido, ya que los estudios virtuales permitieron analizar tanto la composición de los colores como la técnica de aplicación más adecuada. Con ello, se ha optimizado el tiempo de intervención, y se han reducido las manipulaciones.

CASO 5

DIVULGACIÓN DE LOS MODELOS ANATÓMICOS CIENTÍFICOS



Exposiciones virtuales y complementación de las colecciones universitarias

6.5. Caso 5: Divulgación de los modelos anatómicos científicos. Exposiciones virtuales y complementación de las colecciones universitarias

En la actualidad, las colecciones de modelos anatómicos tridimensionales para el estudio de la medicina, la veterinaria y la botánica se conservan en diversos museos vinculados a universidades e institutos de enseñanza superior de todo el mundo, debido a la función didáctica que desempeñaron hasta mediados del siglo XX aproximadamente. En el ámbito internacional, por citar algunas de las universidades pioneras en la gestión y conservación de este tipo de colecciones, destacan las de Oxford, Harvard y Bergen. Iniciativas para unir varias colecciones en un único espacio, emprendida por universidades como la de Utrecht, no solo demuestran un enriquecimiento del conocimiento, sino que mejoran las condiciones de conservación y facilitan un mayor acceso al público (Stanbury, 2000). Sin embargo, gran parte de las instituciones a las que pertenecen estas colecciones carecen de estos recursos y ayudas para emprender proyectos tan ambiciosos.

En España, varias universidades como las de Salamanca, Zaragoza, Granada, Murcia o Sevilla, por citar solo algunas, conservan entre sus colecciones este tipo de herramientas didácticas. Sin duda, entre ellas destaca el conjunto patrimonial de la Universidad Complutense de Madrid. A pesar de los continuos esfuerzos para garantizar la salvaguarda de estas colecciones, gran parte de ellas siguen inadecuadamente conservadas, escasamente difundidas e inaccesibles muchas veces para el público ajeno al entorno académico. Todas estas prácticas requieren de medios económicos, de personal especializado y de espacios apropiados, recursos de los que lamentablemente las universidades públicas carecen en la actualidad.

La escasa visibilidad de estos modelos didácticos se debe en gran medida al acopio de los departamentos como simples herramientas docentes. La falta de una labor centrada en la difusión y el acceso al público los han convertido en objetos inexistentes (González, 2003). En respuesta a las dificultades encontradas, las colecciones anatómicas han adoptado nuevas estrategias de preservación y difusión en la Era Digital, permitiendo el acceso directo a las colecciones a través de las páginas web. Con ello, cualquier persona independientemente de la ubicación geográfica puede acceder desde un dispositivo de pantalla. Estos medios centrados en la difusión y visualización de los museos y colecciones universitarias resultan ser aún limitados por la escasa información proporcionada (Alfageme González y Marín Torres, 2006). A pesar de la idoneidad de los medios web para la promoción de los museos, los esfuerzos constantes de mejorar y aumentar la información en dichas páginas no están dando la visibilidad esperada.

En este contexto, durante la última década las técnicas digitales 3D se han mostrado como herramientas con un enorme potencial para difundir el patrimonio científico de un modo más atractivo, accesible e inmediato en comparación con la tradicional documentación basada en imágenes, y así lo han puesto en práctica diversos colectivos (Lloyd, 2016; Ponchio et al. 2016; Felicísimo et al. 2018).

Ante las circunstancias descritas en el presente caso de estudio, se propone, por un lado, lograr la difusión de diferentes tipologías de artefactos anatómicos didácticos, así como de procesos de análisis e intervención en tratamientos de conservación-restauración a través de exposiciones virtuales en 3D y, por otro lado, complementar los artefactos dentro de los espacios museísticos mediante los modelos digitales 3D. Todo ello para poder permitir a los investigadores, estudiantes

y al público en general, acceder y explorar estas singulares colecciones desde cualquier dispositivo de pantalla.

Gran parte de los modelos tridimensionales científicos, especialmente los dedicados a la enseñanza de la botánica, requieren de una combinación de tácticas de registro para alcanzar la máxima precisión y calidad. Por esta razón, la metodología empleada ha consistido en digitalizar por medio de técnicas de registro como la fotogramétrica y el escaneado de luz estructurada. En el caso de la fotogrametría, se han desarrollado nuevas estrategias en el tratamiento de las imágenes, en concreto, en relación con el filtrado de las áreas desenfocadas o distorsionadas previamente a la fase de procesado. En lo referente al escaneado, se han diseñado e impreso en 3D diversos marcadores enfocados a registrar mejor el volumen durante la captura de datos. Estas metodologías específicas se han estudiado y aplicado en varias colecciones anatómicas científicas de la Universidad Complutense de Madrid y de la Universidad de Salamanca, en esta última con la ocasión de la estancia predoctoral.

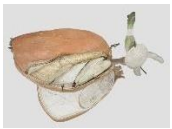
6.5.1. Estrategias específicas de digitalización 3D para la correcta representación de la malla y la textura de color

La digitalización de los artefactos anatómicos didácticos se ha llevado a cabo según las premisas establecidas en el apartado de materiales y métodos, para la fotogrametría (Véase el apartado 3.2. Digitalización 3D mediante fotogrametría) y para el escaneado (Véase el apartado 3.1. Digitalización 3D mediante escáneres de luz estructurada) (figura 378). En el caso de la fotogrametría, a diferencia de lo expuesto en el mencionado apartado, solamente se ha utilizado una fuente de iluminación distinta, en concreto, luces LED de tipo Nanlite FS-150. Esta fuente de luz presenta un CRI de 95 y una temperatura de color de 5600°K, entre otras características, lo que la convierte en una luz muy apropiada para la correcta iluminación de estos artefactos científicos. En las tablas 24 y 26 se recogen cada uno de los modelos y resultados alcanzados en la digitalización mediante la fotogrametría y en la tabla 25 por medio del escaneado.



Figura 378. Proceso de captura fotogramétrica. © Emanuel Sterp Moga.

	Modelo científico	Nº de piezas	Nº fotografías	Nube de puntos dispersa	Malla a través de mapas de profundidad (polígonos)	Textura
	*Inflorescencias en capítulo del Crisantemo*. Dr. Auzoux, 1919 (MB-USAL- 1)	4	252	104,849	5,464,832	8,192 x 8,192
			128	22,429	1,566,884	
			112	28,441	1,146,456	
			96	22,843	1,586,249	

	*Flor de la Fuchsia*. Dr. Auzoux, 1920 (MB-USAL-2)	4	265	146,280	4,230,237	8,192 x 8,192
			245	75,895	1,393,018	
			140	105,610	563,942	
			126	33,744	1,123,174	
	*Flor de Campánula*. Dr. Auzoux, 1919 (MB-USAL-8)	4	177	34,060	1,520,840	8,192 x 8,192
			95	36,204	1,016,132	
			128	44,656	1,909,366	
			112	34,648	1,578,677	
	*Espiguilla de Trigo*. Dr. Auzoux, 1920 (MB-USAL-9)	7	112	78,420	704,548	8,192 x 8,192
			96	21,301	159,496	
			96	22,606	362,288	
			80	20,824	136,364	
			80	22,559	180,590	
			80	18,587	192,934	
			80	19,122	154,220	
	*Flor de Azucena*. Dr. Auzoux, 1920 (MB-USAL-10)	4	180	82,049	4,367,904	8,192 x 8,192
			48	15,664	282,914	
			48	13,175	372,420	
			48	14,649	250,852	
	*Drupa de Cereza*. Dr. Auzoux, 1920 (MB-USAL-14)	5	144	45,228	2,522,219	8,192 x 8,192
			160	102,057	335,697	
			145	133,457	283,104	
			64	56,372	123,550	
			96	62,953	88,720	
	*Fruto de la Encina*. Dr. Auzoux, 1919 (MB-USAL-15)	6	129	56,416	1,073,118	8,192 x 8,192
			161	68,342	1,061,437	
			144	131,541	340,754	
			161	142,967	195,802	
			144	82,426	604,124	
			161	30,898	1,024,915	
	*Vaina de guisante*. Dr. Auzoux, 1919 (MB-USAL-16)	3	147	148,226	519,598	8,192 x 8,192
			128	113,821	127,590	
			127	66,986	180,000	
	*Grano de trigo*. Dr. Auzoux, 1920 (MB-USAL-18)	6	184	96,845	1,049,522	8,192 x 8,192
			128	52,389	930,264	
			112	51,692	33,952	
			128	67,813	164,830	
			111	26,291	370,474	
			142	76,656	994,419	
	*Diagrama de una flor regular ideal*. Les Fils d'Émile Deyrolle, 1910-1920 (MB- USAL-28)	1	128	47,303	3,749,406	8,192 x 8,192
	*Tallo leñoso de dicotiledónea*. Les Fils d'Émile Deyrolle, 1910-1920 (MB- USAL-32)	1	257	141,038	5,066,154	8,192 x 8,192

	*Flor del Manzano*. R. Brendel, 1875 - 1900 (MB- USAL-38)	2	268	50,954	2,909,331	8,192 x 8,192
			176	154,363	825,320	
	*Theobroma cacao* (MB- USAL- 71)	1	112	43,0385	705,586	8,192 x 8,192

Tabla 24. Digitalización mediante fotogrametría. Modelos botánicos del Departamento de Botánica y Fisiología Vegetal, Facultad de Farmacia, Universidad de Salamanca. © Emanuel Sterp Moga.

	Modelo científico	Escáner	Resolución	Polígonos
	*Inflorescencia en umbela compuesta*. Les Fils d'Émile Deyrolle, 1910-1920 (MB-USAL-33)	Artes Space Spider	0.1	10.140.190

Tabla 25. Digitalización mediante escáner. Modelos botánicos del Departamento de Botánica y Fisiología Vegetal, Facultad de Farmacia, Universidad de Salamanca. © Emanuel Sterp Moga.

	Modelo científico	Nº de piezas	Nº fotografías	Nube de puntos dispersa	Malla a través de mapas de profundidad (polígonos)	Textura
	*Anatomía del cuerpo humano* a escala 1:2. Dr. Auzoux, 1919	25	738	354,008	13,967,847	8,192 x 8,192
			305	123,930	871,396	
			208	107,916	302,850	
			208	122,059	791,938	
			192	142,315	249,239	
			120	58,156	238,568	
			160	114,613	141,284	
			224	118,958	395,858	
			224	97,874	497,872	
			290	108,154	371,794	
			224	127,009	1,673,447	
			344	192,293	1,877,393	
			453	280,856	5,954,528	
			308	198,197	3,287,712	
			335	16,121	451,730	
			244	96,942	162,621	
			439	167,276	1,167,798	
			208	84,880	468,198	
			289	132,190	350,586	
			337	170,341	462,070	
			320	107,308	265,002	
			235	110,476	1,614,205	
			272	186,042	2,505,796	
			160	49,572	369,687	
			120	62,148	255,129	

Tabla 26. Digitalización mediante fotogrametría. Modelo *Anatomía del cuerpo humano* del Departamento de Anatomía e Histología Humanas, Facultad de Medicina, Universidad de Salamanca. © Emanuel Sterp Moga.

Los acabados logrados en determinados modelos mediante los procedimientos fotogramétricos convencionales no alcanzaron la calidad suficiente para cumplir con el objetivo inicialmente

planteado. Esta insuficiencia se debe a la complejidad volumétrica que muchos modelos presentan, en particular los botánicos, por los espesores tan finos de los materiales y a los diferentes tamaños. En el contexto de la captura fotográfica, la PDC asume un papel fundamental cuando se trata de modelos a pequeña escala capturados con objetivos macro, concretamente para lograr una calidad superior en la textura de color. La importancia radica en el hecho de que las zonas desenfocadas suponen un reto para el programa a la hora de detectar los puntos equivalentes entre una fotografía y otra, por lo que da lugar a zonas borrosas con pocos detalles en la representación fiel de la textura de color (figura 379).

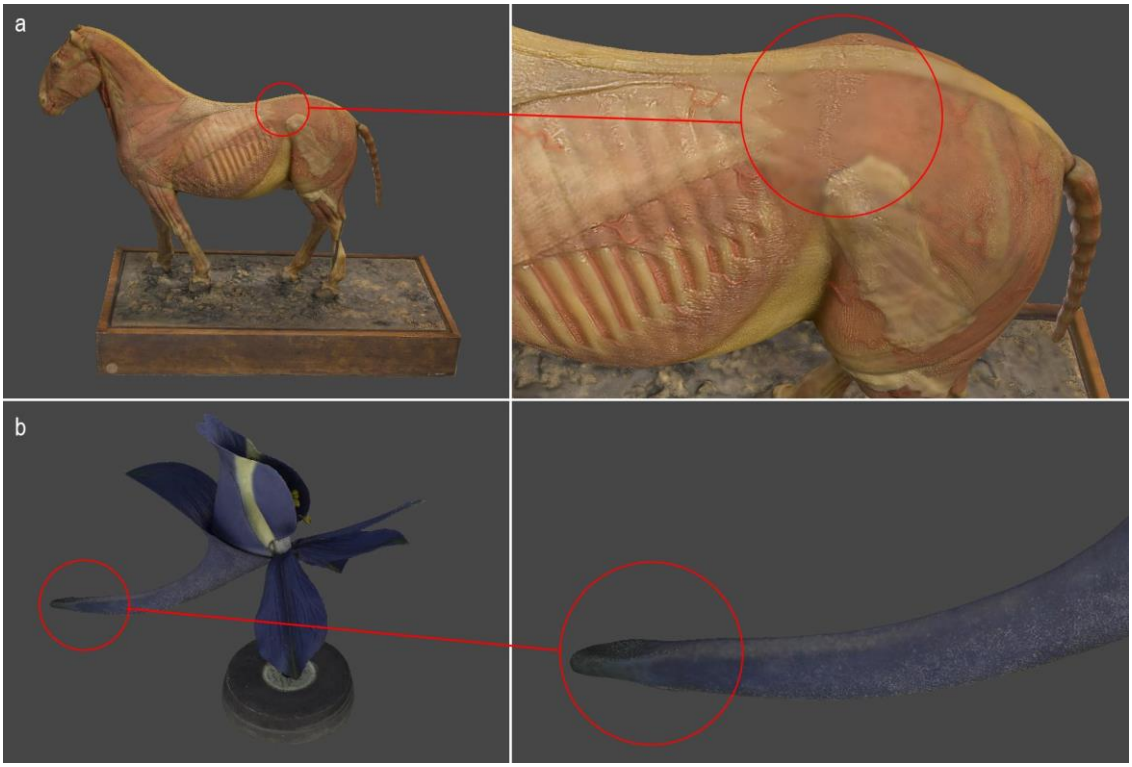


Figura 379. Zonas borrosas sobre la textura del modelo 3D a causa de la presencia de zonas desenfocadas en las imágenes de la fotogrametría. a) *Caballo pequeño*, realizado por Cristobal Garrigó, siglo XIX (MV-590). b) *Delphinium consolida*. © Emanuel Sterp Moga.

Para solventar estos problemas, se experimentaron diversas estrategias de procesamiento en cada una de las imágenes que contenía zonas desenfocadas. La primera consistió en suprimir las imágenes, aproximadamente a la mitad, una vez finalizada la malla mediante los mapas de profundidad, antes de la creación de la textura de color. Aunque este método demostró cierta mejora en el aumento de la nitidez en general en las regiones desenfocadas (figura 380), resultó ineficaz en otras áreas más comprometidas, lo que provocó la disminución de la calidad debido a la pérdida de información al reducir el número de imágenes (figura 381). Por tanto, debido a la aleatoriedad de la estrategia y teniendo en cuenta que en cada figura se obtendrían resultados diferentes, se descartó esta táctica para mejorar la calidad de la textura.

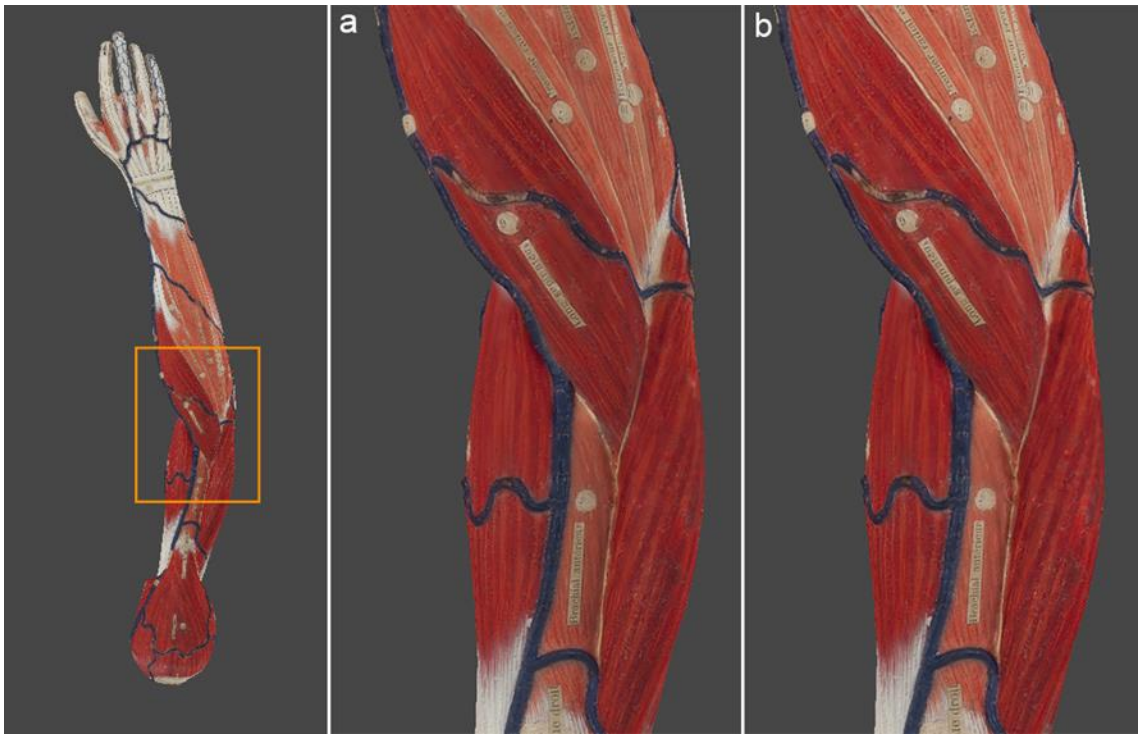


Figura 380. a) Textura procesada con todas las fotografías del modelo *Anatomía del cuerpo humano* capturado. b) Textura procesada con la mitad de las fotografías del modelo capturado. En esta zona los resultados mejoraron ligeramente al disminuir el número de imágenes. © Emanuel Sterp Moga.

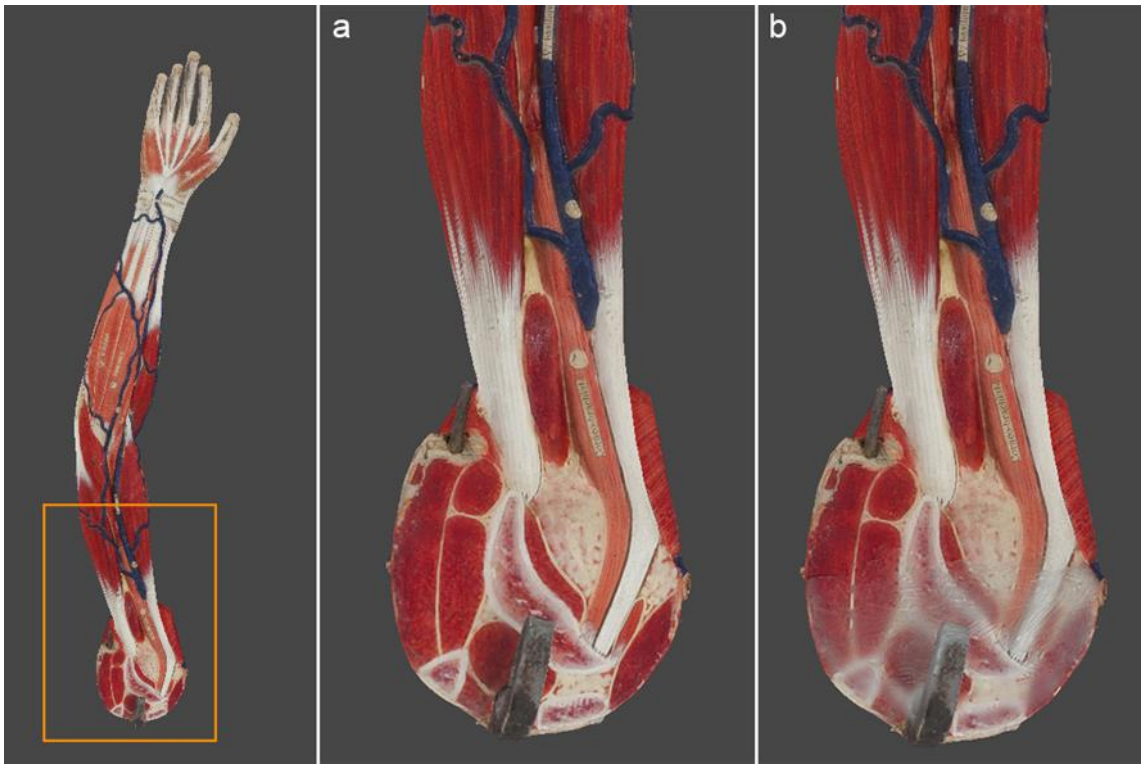


Figura 381. a) Textura procesada con todas las fotografías del modelo *Anatomía del cuerpo humano* capturado. b) Textura procesada con la mitad de las fotografías del modelo capturado. Los resultados en esta zona empeoraron considerablemente al disminuir el número de imágenes. © Emanuel Sterp Moga.

La segunda estrategia consistió en crear máscaras para eliminar selectivamente las regiones desenfocadas de cada imagen (figura 382). Esta práctica también se aplicó en la fase previa a la elaboración de la textura de color, concretamente después de obtener la malla. De igual modo,

para digitalizar los modelos que presentaban distorsiones causadas por una refracción excesiva, se efectuó la misma operación, pero en las áreas distorsionadas (figura 383).

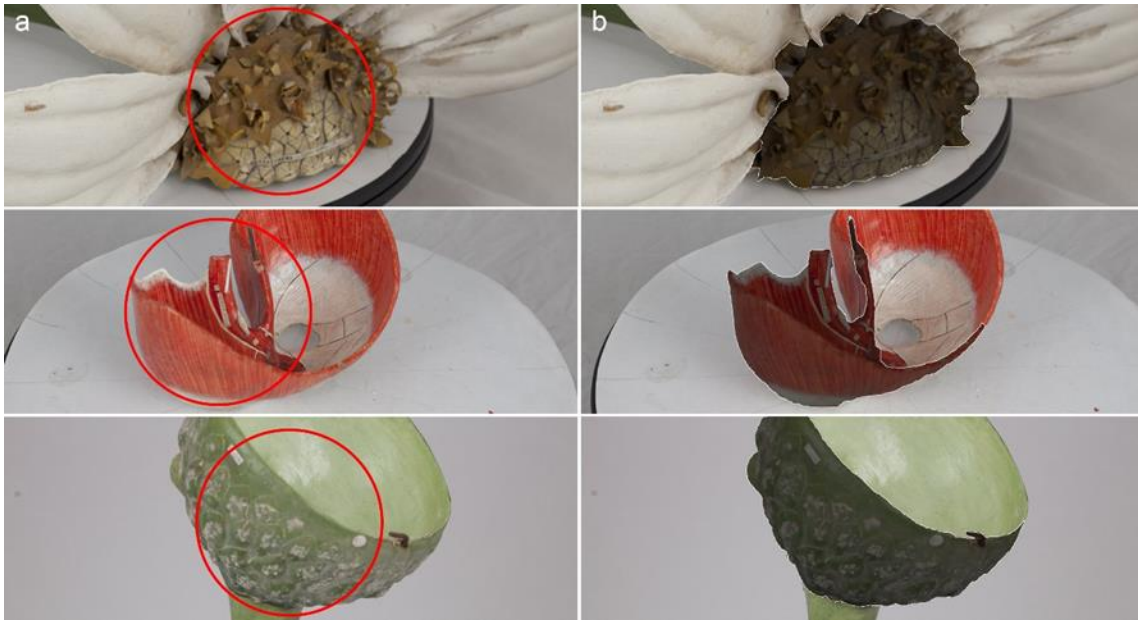


Figura 382. a) Áreas desenfocadas. b) Generación de máscaras para anular las zonas desenfocadas durante la generación de la textura. Modelos: *Inflorescencias en capítulo del Crisantemo*, *Anatomía del cuerpo humano* y *Fruto de la Encina*. © Emanuel Sterp Moga.

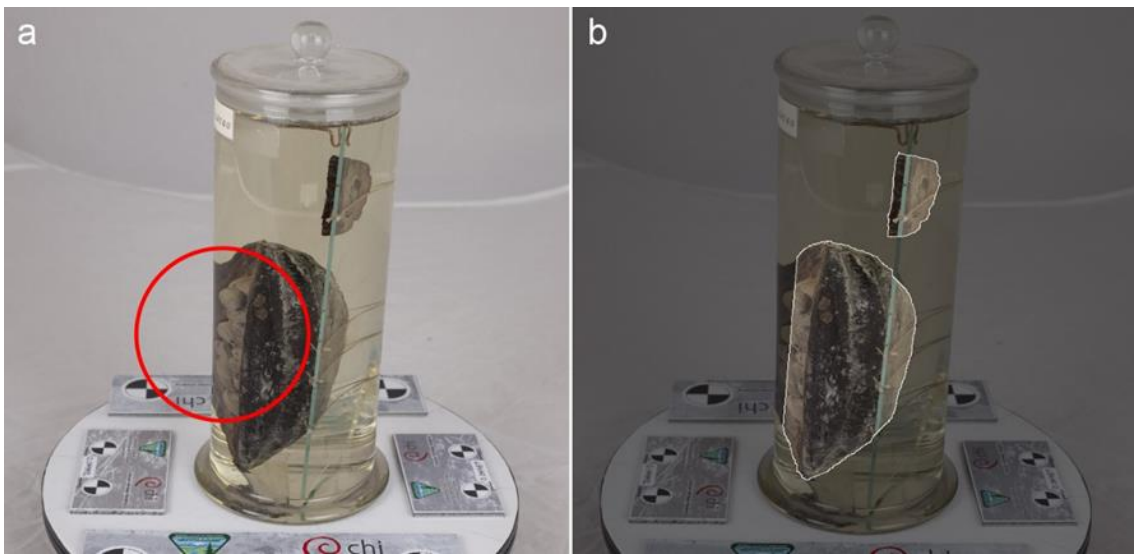


Figura 383. Modelo *Theobroma cacao*. a) Áreas desenfocadas. b) Generación de máscaras para anular las zonas distorsionadas durante la generación de la textura. © Emanuel Sterp Moga.

Los resultados obtenidos fueron sorprendentes, ya que se logró plasmar el más mínimo detalle en elementos tan importantes como las etiquetas y números de cada uno de los modelos anatómicos (figura 384). Todas las zonas desenfocadas que antes se generaban sobre el artefacto, se erradicaron eficazmente, reproduciendo de esta manera el modelo científico con la máxima calidad y fidelidad.

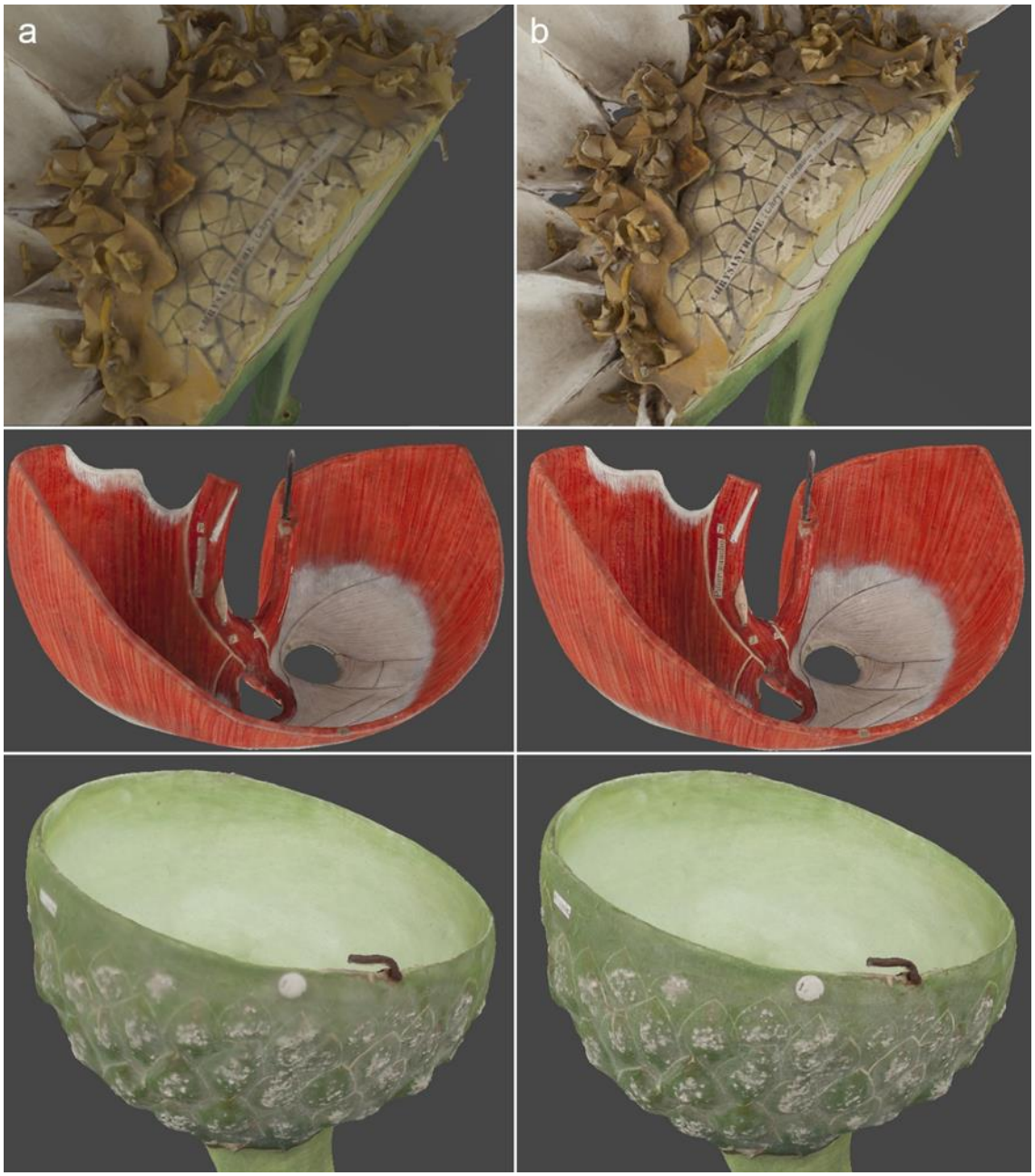


Figura 384. a) Generación de la textura de color con todas las imágenes sin máscaras. b) Generación de la textura de color con máscaras para anular las zonas desenfocadas. Modelos: *Inflorescencias en capítulo del Crisantemo, Anatomía del cuerpo humano* y *Fruto de la Encina*. © Emanuel Sterp Moga.

Dada la eficacia observada de este método en la obtención de la textura de color, se evaluó una tercera estrategia, consistente en procesar el modelo con las máscaras desde el inicio, es decir, con la orientación de las fotos y creación de la malla mediante los mapas de profundidad. Sin embargo, algunos modelos experimentaron una considerable disminución de la calidad de la malla debido a la reducción de la información en las imágenes de las áreas desenfocadas (figura 385).

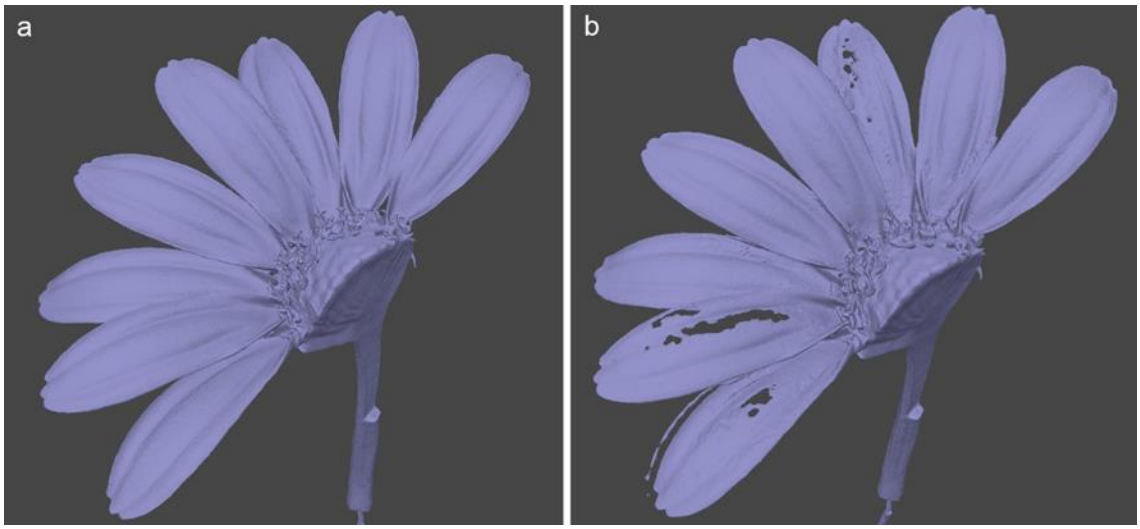


Figura 385. a) Modelo *Inflorescencias en capítulo del Crisantemo* procesado con todas las imágenes capturadas. b) Modelo procesado con las máscaras eliminando las áreas desenfocadas. © Emanuel Sterp Moga.

En consecuencia, los modelos fotogramétricos se procesaron con todas las imágenes durante las fases iniciales, que consistieron en orientar las fotos y generar la malla mediante mapas de profundidad. En la última fase, que abarca la creación de la textura de color, se elaboraron las máscaras para eliminar las zonas desenfocadas.

Las estrategias de captura y procesamiento fotogramétrico aplicadas presentaron una tasa de éxito en el 98% de los modelos didácticos digitalizados. A pesar de ello, en algunos artefactos extremadamente complejos, debido a sus características volumétricas (ramificaciones: raquis, pedúnculos, pedicelos y flores), resultó imposible lograr un resultado satisfactorio con esta técnica (figura 386).

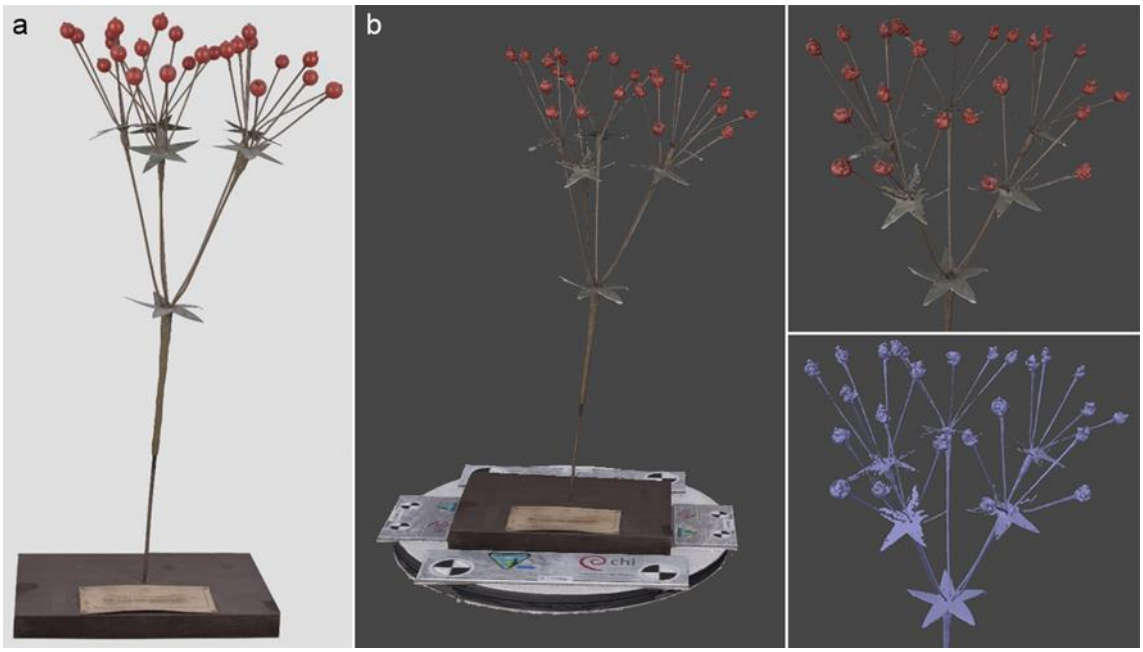


Figura 386. a) Modelo botánico *Inflorescencia en umbela compuesta*. b) Digitalización mediante fotogrametría. © Emanuel Sterp Moga.

En base a los resultados obtenidos, el escaneado surgió como la única solución restante para digitalizar el artefacto. Sin embargo, debido a las características morfológicas de esta obra, el

proceso de registro resultó ser un reto incluso para el escáner Artec Space Spider. Durante el barrido, el aparato se perdía con frecuencia debido al considerable espacio que había entre los diferentes conjuntos de ramificaciones. Además, las flores rojas en este caso son muy homogéneas y con poca textura, dando como resultado una información limitada para registrarlas. A consecuencia de ello, se observaron errores y desplazamientos de los fotogramas capturados.

Con el fin de evitar que el escáner se perdiera durante el barrido, se diseñaron una serie de marcadores para poder imprimirlos en 3D mediante la doble extrusión (figura 387). El diseño consistió en modelar un cubo dividiéndolo en dos mitades. Cada una de ellas se imprimió en un color, en este caso gris y rojo. Dentro de estos compartimentos se alojaron diferentes formas geométricas, cada una de ellas con una ubicación, rotación y escala distinta, de tal modo, que no hubiera dos marcadores iguales. La impresión de estos elementos geométricos se realizó en un color diferente al del cubo para aumentar su visibilidad y facilitar el reconocimiento por el escáner. Finalmente, cada uno de ellos se colocó sobre diversas columnas, también impresas en 3D a distintas alturas, las cuales se calcularon específicamente según las necesidades de la obra.

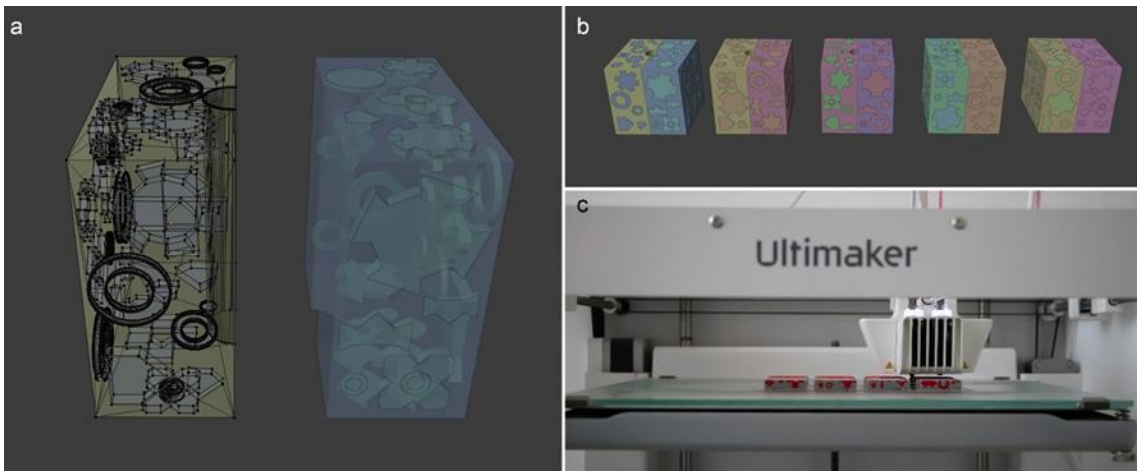


Figura 387. a) Proceso de modelado de los marcadores 3D. b) Diferentes tipos de marcadores 3D. c) Proceso de impresión 3D con doble extrusor. © Emanuel Sterp Moga.

Mediante la colocación estratégica de estos elementos durante el barrido, una parte de los marcadores se mantuvo en la ventana de registro, y la otra parte en la obra (figura 388). De este modo, se lograron registrar todos los elementos, independientemente de su homogeneidad. El diseño y la ubicación de los marcadores permitieron digitalizar el modelo botánico con una gran calidad y precisión (figura 389).

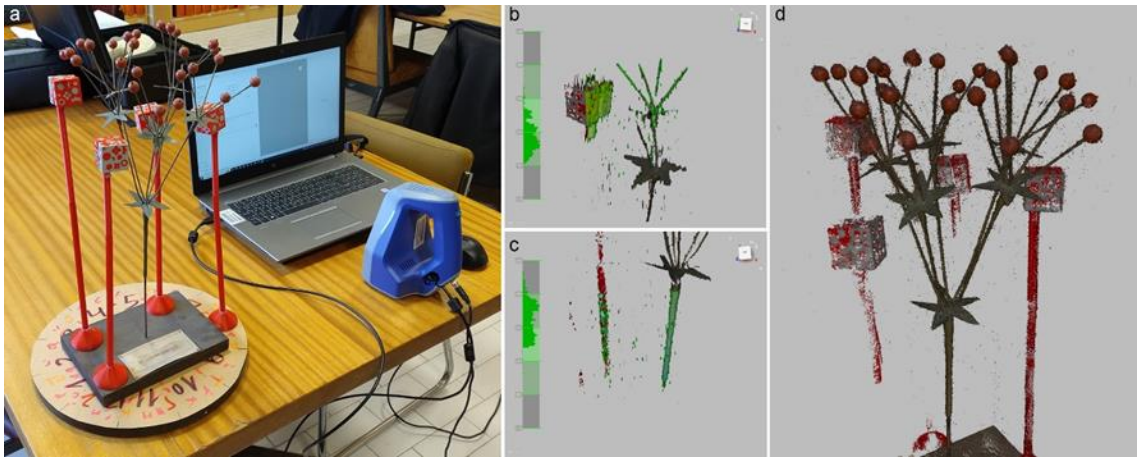


Figura 388. Proceso de escaneado con marcadores 3D. a) Modelo botánico *Inflorescencia en umbela compuesta*. b y c) Escaneado del modelo manteniendo una parte de la ventana de registro en el marcador y la otra parte en la obra. d) Alineación de los diferentes fragmentos escaneados. © Emanuel Sterp Moga.

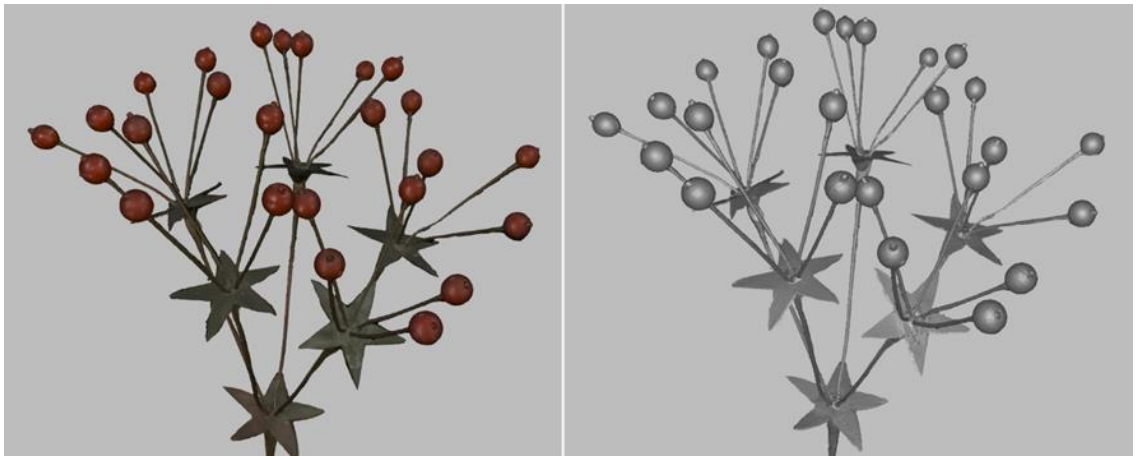


Figura 389. Modelo botánico *Inflorescencia en umbela compuesta escaneada* escaneado. © Emanuel Sterp Moga.

Concluidos los modelos didácticos con la máxima calidad en la malla y textura de color, se realizó en cada uno de ellos los procesos de retopología de la malla y la generación de mapas de textura de color (Véanse los apartados 3.7.2. y 4.8.2. Retopología y generación de mapas de textura para la difusión de los modelos 3D) con el fin de lograr unos modelos optimizados para su publicación en la plataforma web Sketchfab.

Con la alta calidad y fidelidad alcanzada en los instrumentos científicos, se quiso mostrar el potencial de estas herramientas de difusión mediante tres aplicaciones.

6.5.2. Exposiciones virtuales

6.5.2.1. Propuesta 1. “La didáctica botánica en los modelos de Dr. Auzoux, É. Deyrolle y R. Brendel”

En la primera de ellas, se puso especial hincapié en rescatar del olvido y abandono las colecciones científicas conservadas en los entornos universitarios mediante medios digitales 3D. Con la exposición virtual “La didáctica botánica en los modelos de Dr. Auzoux, É. Deyrolle y R. Brendel” se pretende mostrar los artefactos científicos con minucioso detalle, permitiendo examinarlos desde cualquier punto de vista, así como conocer la técnica de manufactura particular

de cada uno de ellos. La intención de esta exposición era abrir nuevas puertas a un público más amplio que el de la comunidad universitaria, enriqueciendo de este modo la adquisición de conocimientos a través de la exploración de este singular patrimonio.

La exposición virtual se centra en la presentación de la colección de modelos botánicos conservados en la Universidad de Salamanca, ubicada actualmente en el Departamento de Botánica y Fisiología Vegetal de la Facultad de Farmacia. Allí se conservan más de 80 modelos adquiridos a diferentes casas comerciales como la del Dr. Auzoux (1797-1880), Émile Deyrolle (1838-1917) y Robert Brendel (1821–1898). El desarrollo de esta aplicación perseguía un doble propósito: contribuir a su preservación y facilitar su difusión, procurando mostrar todo el potencial por medios virtuales. La exposición contiene 14 modelos botánicos y todos ellos se han distribuido dentro de un escenario modelado en 3D (figura 390). Algunos de estos artefactos están animados, de tal manera, que cada una de las piezas que los conforman se van separando progresivamente para visualizar su interior, y poder, con ello, conocer las estructuras internas, así como comprender la técnica de construcción utilizada. Además, cada uno de ellos se pueden analizar individualmente, lo que permite apreciar todos los detalles morfológicos. Esta operación se lleva a cabo mediante diversas anotaciones numéricas colocadas en cada uno de los modelos botánicos.

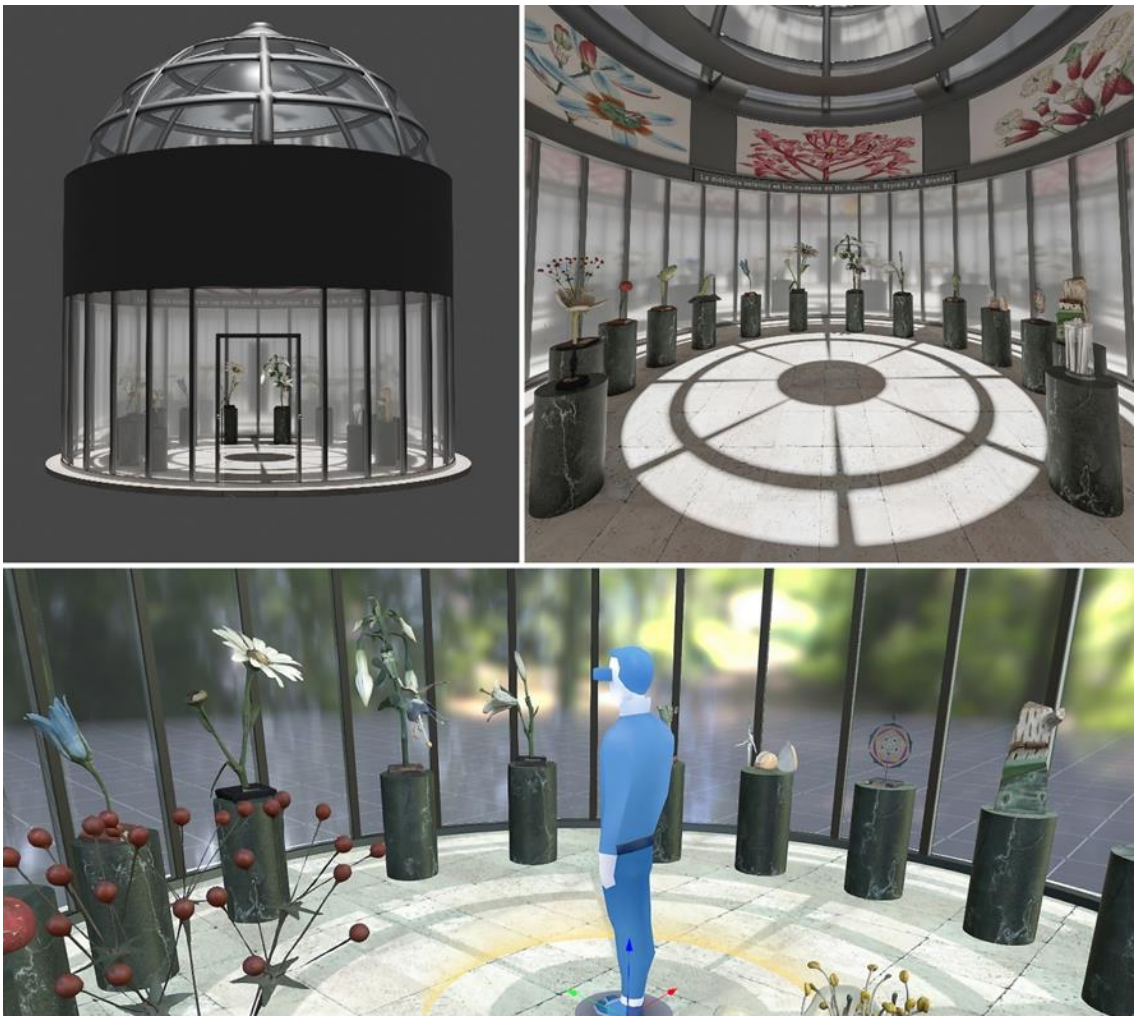


Figura 390. Exposición virtual “La didáctica botánica en los modelos de Dr. Auzoux, É. Deyrolle y R. Brendel” (Ver modelo 3D). © Emanuel Sterp Moga.

6.5.2.2. Propuesta 2. Complementación de los artefactos expositivos por medio de modelos digitales 3D. La extraordinaria anatomía de Dr. Auzoux

La segunda aplicación consistió en enriquecer la exposición permanente "Modelos anatómicos en cera" de la Facultad de Medicina en la Universidad de Salamanca. En ella se muestran modelos anatómicos de cera, papel maché y escayola adquiridos a los fabricantes de las casas Auzoux, Deyrolle y Maison Tramond (creada a mediados del siglo XIX) en diferentes épocas. De todos ellos, se eligió un modelo clástico elaborado en papel maché y policromado por la casa comercial del Dr. Auzoux, en 1919. Representa la anatomía del cuerpo humano a una escala 1:2, compuesto por 25 piezas desmontables.

Actualmente, la escultura se encuentra expuesta dentro de una vitrina en la sala mencionada anteriormente. Los visitantes solo la pueden contemplar en su estado totalmente montada, sin tener acceso al interior de la misma. Para ofrecer la posibilidad de comprender los aspectos funcionales que en el pasado tuvo este modelo anatómico, se ha colocado un código QR en la cartela adyacente, que permite a los espectadores acceder a la información mediante cualquier dispositivo de pantalla (figura 391).

A través de este sistema, se puede explorar el conjunto de la escultura mediante una animación que posibilita gradualmente ir desmontando cada una de las partes anatómicas para acceder al interior y visualizar el mecanismo del cuerpo humano. Además, a cada órgano se le ha asignado un número, lo que permite ver cada uno de ellos de manera individual con mayor detalle.

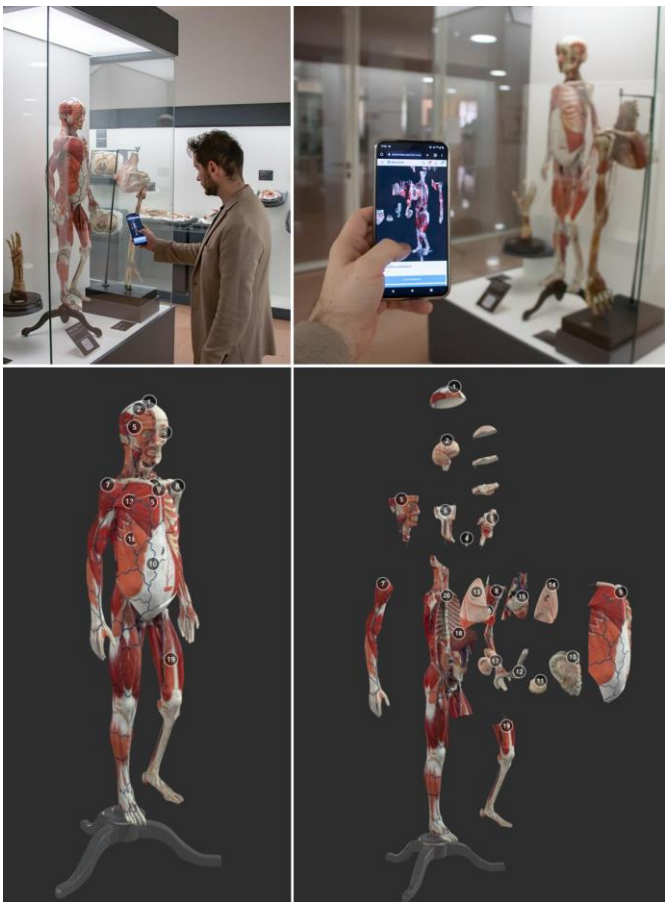


Figura 391. Complementación del modelo *Anatomía del cuerpo humano* del Dr. Auzoux en la sala expositiva mediante sistemas digitales 3D (Ver modelo 3D). © Emanuel Sterp Moga.

6.5.2.3. Propuesta 3. "Tecnologías 3D aplicadas al estudio y análisis de intervenciones sobre el patrimonio científico"

Por último, en un tercer ejemplo se muestran un conjunto de seis aplicaciones, basadas en el análisis y los estudios obtenidos durante estos años de formación predoctoral a través de la propuesta de una exposición virtual. En ella, se recogen determinados artefactos científicos pertenecientes a la Universidad Complutense de Madrid con un contexto museográfico recreado por medio de entornos virtuales. La exposición "Tecnologías 3D aplicadas al estudio y análisis de intervenciones sobre el patrimonio científico" dialoga con el espectador, haciéndole comprender mejor cada uno de los objetos expuestos tanto en lo referente a los procesos de documentación, embalaje, protocolos de manipulación para el desmontaje y montaje, así como el análisis de las técnicas constructivas de cada fabricante y de los tratamientos de conservación-restauración aplicados para frenar el deterioro (figura 392). Además, el contenido mostrado se enfocó desde un punto de vista formativo, ya que cada modelo está dotado de información técnica y publicaciones científicas sobre los procesos y tratamientos necesarios en cada caso expuesto. Esta información se incorporó a través de diferentes anotaciones dentro de cada modelo virtual, lo que permitió la contemplación individual y el análisis del contenido asociado a las mismas.

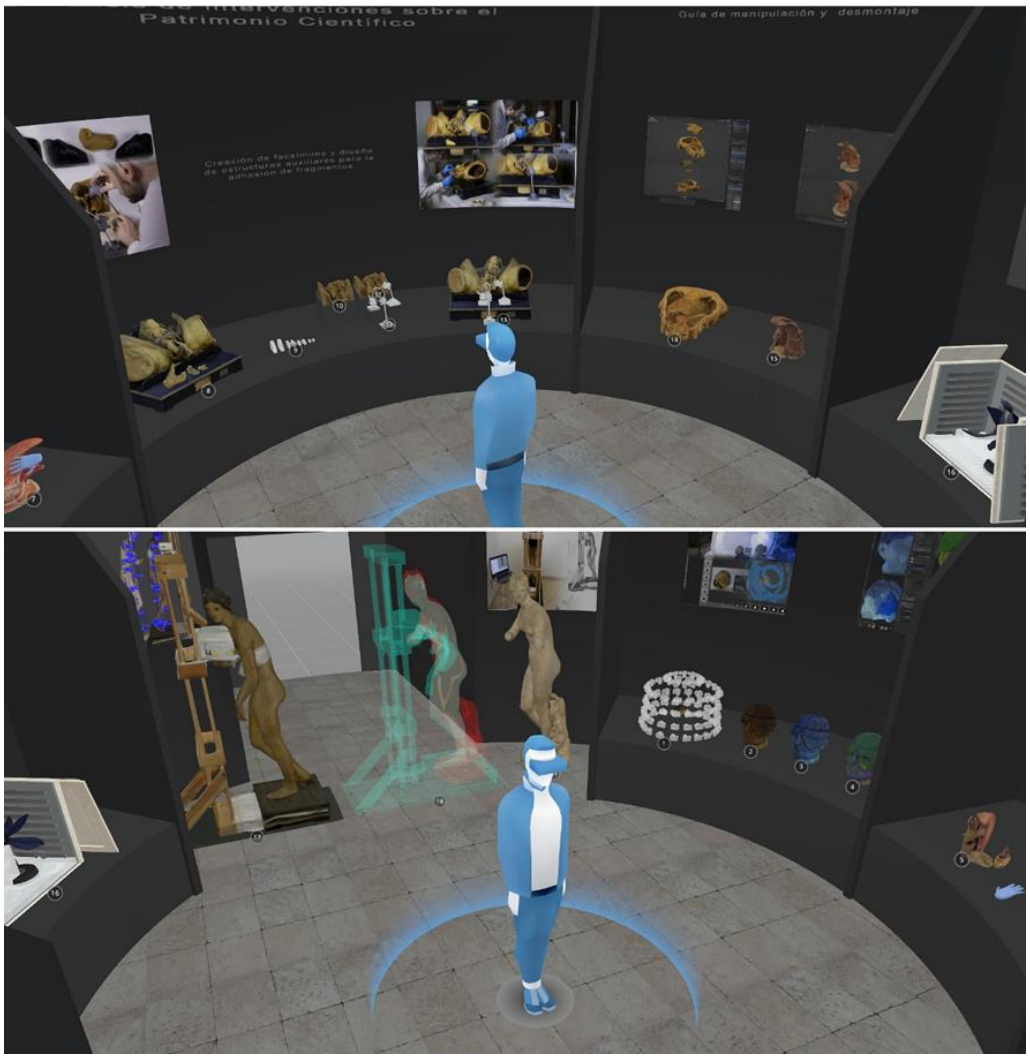


Figura 392. Exposición virtual "Tecnologías 3D aplicadas al estudio y análisis de intervenciones sobre el patrimonio científico" (Ver modelo 3D). © Emanuel Sterp Moga.

6.5.3. Resultados y discusión

A lo largo de este trabajo ha quedado demostrado que el diseño de exposiciones virtuales es un interesante recurso para llevar a cabo programas de difusión de colecciones científicas pertenecientes a museos universitarios. Este enfoque permite hacer accesible al público en general unos objetos que de otro modo no se conocerían por estar ubicados en espacios departamentales, almacenes o salas que no disponen de personal encargado para programar las visitas.

En este contexto, el proceso de digitalización se enfocó en lograr una representación cualitativa de los modelos científicos. La fotogrametría se ha revelado como un método especifico de enorme potencial para documentar con alta calidad estos artefactos, sobre todo en la textura de color, mientras que el escaneado también ha mostrado su utilidad, aunque en situaciones más concretas. Las estrategias de registro y el procesado han dejado patente su capacidad para solucionar diversas necesidades según cada caso. Todos estos datos combinados con la infografía 3D han permitido crear entornos expositivos, los cuales han permitido mostrar una amplia gama de artefactos didácticos que en el pasado fueron utilizados para la enseñanza de la anatomía humana, animal y botánica en las principales universidades e institutos de enseñanza superior. Aparte de estas prácticas, los entornos virtuales también han demostrado su eficacia para representar un espectro de estudios, análisis y procedimientos de conservación-restauración, mejorando y facilitando su divulgación científica. Con todo ello, esta utilización ha puesto de relieve el aumento de la difusión de información, la adquisición de conocimientos, así como un acceso más fácil a un público más amplio.

Por último, la integración de contenidos digitales 3D en los espacios expositivos ha permitido generar una nueva comunicación, aumentado significativamente tanto la observación como la calidad del aprendizaje sobre esta tipología de artefactos. Esta mejora se atribuye al enriquecimiento del contenido informativo de cada una de las piezas que conforman los modelos tridimensionales didácticos. En consecuencia, todos estos medios han resultado ser más interactivos, mejorando la experiencia general del público visitante.

7. CONCLUSIONES



7. CONCLUSIONES

El objetivo principal de la investigación ha consistido en analizar las diferentes aplicaciones y ventajas que ofrecen las tecnologías 3D basadas en la digitalización mediante el escaneado y la fotogrametría, la restauración virtual, el modelado virtual, así como la impresión 3D a través de técnicas FDM, LFS y CNC. Dichas herramientas se han empleado para comprobar su validez en los procesos de conservación-restauración, proponiendo metodologías específicas con el fin de encontrar soluciones a problemáticas concretas y, con ello, mejorar la toma de decisiones. Para cumplir este objetivo, se han establecido una serie de objetivos específicos que se han desarrollado en el apartado de materiales y métodos, así como en los diversos casos de estudio. Las conclusiones derivadas de este trabajo se recogen en los puntos siguientes:

1. Esta investigación ha posibilitado realizar una revisión exhaustiva del estado actual de la cuestión en lo que respecta a la utilización de metodologías digitales 3D aplicadas al patrimonio cultural. Además, se han logrado con éxito los objetivos inicialmente planteados referidos a la documentación, la diagnosis y la toma de decisiones en posibles intervenciones de conservación-restauración.
2. Los escáneres de luz estructurada Artec Space Spider y Artec Eva han demostrado que son unas herramientas determinantes cuando se requiere de modelos digitales de alta precisión volumétrica y calidad en los detalles. Las estrategias de digitalización llevadas a cabo, así como los parámetros establecidos y las diversas fases de procesado de los datos, han facilitado de manera considerable el registro volumétrico. Se han logrado solventar los problemas detectados en el registro de piezas complejas, en las cuales se ha requerido de marcadores específicos elaborados tanto en materiales de tipo *foam* como en filamentos termoplásticos de impresión 3D. El programa Artec Studio Profesional 15, gracias a las diversas herramientas disponibles, ha proporcionado un flujo de trabajo sencillo en cada una de las fases necesarias, alcanzando unos resultados de gran precisión, resolución y calidad en la malla, aunque con una calidad inferior en la textura de color.
   Se ha observado que conseguir un modelo con un elevado número de polígonos, logrado mediante la superposición de varios fotogramas escaneados dentro de una misma zona, no supone que el modelo tenga mayor calidad. De hecho, en determinadas regiones, se ha comprobado que el ruido excesivo derivado de este proceso repercute negativamente en la reproducción fiel de los detalles. En consecuencia, se ha elaborado un modelo final con una cantidad inferior de polígonos, lo que ha garantizado una mayor calidad y rigor en los detalles superficiales en comparación con el modelo real.
3. El proceso de digitalización basado en la fotogrametría ha facilitado la adquisición de diversos modelos virtuales dotados de una textura de alta calidad, aunque con menor resolución y precisión en la malla. Las estrategias de iluminación específicas, tanto con luz visible (3200 luxes) como con fluorescencia visible inducida por radiación UV (160 luxes), así como la utilización de una caja de luz, han sido claves en la generación de condiciones de iluminación difusa y uniforme, mitigando de este modo los problemas derivados de los brillos. En consecuencia, se ha logrado un registro fiel de la superficie del modelo, lo que ha permitido capturar con exactitud cada detalle, incluso en zonas de difícil acceso. Además, se han resuelto eficazmente los errores habituales que se producían en los modelos 3D mediante diversas estrategias de tratamiento en las áreas

desenfocadas o distorsionadas de cada una de las imágenes previo al procesado de la fase de texturizado. De esta forma, se ha logrado obtener el máximo detalle y fidelidad en la textura de color sin generar errores o invenciones por parte del programa. Además, se ha implementado una meticulosa gestión del color para cada imagen, lo que ha garantizado aún más el control en la calidad de los modelos anatómicos científicos.

Respecto al programa informático Agisoft Metashape® Professional, hay que destacar su sencillo flujo de trabajo y la posibilidad que ofrece para elaborar máscaras, especialmente cuando el modelo presenta una geometría compleja y requiere de la captura fotográfica en diferentes posiciones. Estas herramientas han garantizado en todo momento lograr resultados de precisión. A su vez, las opciones disponibles para reconocer escalas y dotar al modelo de las dimensiones reales también ha resultado ser un proceso sencillo.

4. Durante la comparación entre ambas herramientas de digitalización, se ha comprobado de manera empírica el potencial que ofrecen en diversos estudios y aplicaciones. Los escáneres han demostrado una capacidad superior en el registro de las mallas en comparación con la fotogrametría. Estas características han sido de gran interés y utilidad en aplicaciones como el seguimiento del estado de conservación, la anastilosis virtual, las reintegraciones volumétricas, los diseños de moldes y las estructuras auxiliares, entre otras aplicaciones. Por el contrario, la fotogrametría ha logrado mejores acabados en cuanto a la textura de color en comparación con los escáneres. Este aspecto ha resultado especialmente ventajoso para aplicaciones como las cartografías de patologías en 3D, los tratamientos de limpieza virtual, la reintegración cromática o la difusión a través de renders y de modelos optimizados en plataformas web.
5. La utilización del programa informático Adobe Substance 3D Painter en la elaboración de las cartografías de patologías, así como de los tratamientos de conservación-restauración, han mejorado considerablemente con los modelos 3D, al permitir trabajar mediante diferentes grupos y capas individuales cada uno de los elementos a marcar. En esta aplicación, en concreto, los modelos 3D han demostrado ser algo más que un solo modelo, ya que han proporcionado un diagnóstico detallado del estado de conservación, debido a su precisión, calidad y rigurosidad. Estas notables características se han conseguido gracias a la observación constante del modelo con la fluorescencia visible inducida por radiación UV, así como a la comparación continua del modelo obtenido mediante la luz visible. Este enfoque ha permitido discernir y clasificar diferentes materiales y patologías gracias al detalle conseguido en la fotogrametría y a la intensidad de la fluorescencia variable correspondiente al nivel de envejecimiento de las sustancias empleadas en la fabricación del artefacto. En consecuencia, se ha logrado una información muy valiosa sobre la creación del objeto, su historia y evolución material, así como el grado de deterioro y las intervenciones que han tenido a lo largo del tiempo. Del diagnóstico exhaustivo realizado se ha podido crear otro tipo de cartografías enfocadas a los procesos de invención en conservación-restauración. Con ello, se ha conseguido una visión más amplia y clara de los tratamientos necesarios.
6. El análisis comparativo entre modelos, las funcionalidades proporcionadas por el programa informático Artec Studio Profesional 15 han demostrado ser muy eficaces para tal fin. Las diferentes herramientas de medición lineales y *mapas de distancias* han reflejado ser muy ventajosas a la hora de realizar cualquier análisis comparativo entre

diversas técnicas de registro 3D. La elevada precisión ha permitido identificar y localizar hasta las imperfecciones más pequeñas, facilitando así una compresión del proceso de elaboración de la escultura.

Previo al seguimiento del estado de conservación, se ha analizado el impacto de la reducción de la malla en la pérdida de calidad mediante los *mapas de distancias* disponibles en el mismo programa mencionado anteriormente. El estudio ha revelado que el número de polígonos de la malla se puede disminuir sin perder apenas calidad. Al reducir la malla original aproximadamente entre los 7 y 5 millones de polígonos, ha permitido calcular por medio de mediciones geodésicas las dimensiones de cada una de las grietas, fracturas y fisuras existentes en el modelo original sin perder calidad en el conjunto del volumen y detalles. Este sistema de medición periódica ha logrado detectar cambios en las alteraciones y, con ello, llevar a cabo un seguimiento preventivo. Cabe recalcar que la calidad al reducir la malla dependerá, en gran parte, de las dimensiones y complejidades volumétricas de cada obra. Por ello, se precisa un estudio individual ajustado a cada modelo para analizar dicha pérdida de calidad al reducir los polígonos de la malla.

7. La utilización de técnicas de restauración virtual, basada en procesos como la anastilosis, la limpieza, la reintegración volumétrica y la reintegración cromática, ha facilitado la visualización de posibles procedimientos y los resultados que se obtendrían en una intervención de restauración real.

   La anastilosis virtual, realizada en el programa informático Blender, ha ayudado a determinar la ubicación exacta de cada uno de los fragmentos que conforman la obra. Por otro lado, también ha permitido explorar los posibles movimientos y manipulaciones que serían necesarias durante la intervención directa sobre la escultura. Este enfoque sirve para mitigar el riesgo de posibles deterioros por una mala praxis. Finalmente, se han identificado las partes faltantes de la materia original, con el fin de determinar su ubicación y extensión para los posteriores tratamientos de reintegración volumétrica.

   En relación con la limpieza virtual, el programa Adobe Substance 3D Painter ha demostrado su alto rendimiento, y se ha evaluado empíricamente sus beneficios para los restauradores. Las mediciones de los valores RGB y HSV, en determinadas zonas, han servido para estimar el grado de limpieza a alcanzar. Con ello, se ha contribuido a la toma de decisiones.

   Respecto a la reintegración volumétrica virtual, los experimentos realizados con el programa informático Blender han servido para demostrar también su potencial en este tipo de tareas. Por medio del modelado digital ha sido posible, por un lado, complementar el criterio de actuación y, por otro, visualizar su estado inicial sin interferir en ningún momento con el modelo real. Asimismo, el cálculo volumétrico de las reintegraciones volumétricas ha permitido estimar la cantidad de material necesario para la intervención en la obra real.

   La reintegración cromática virtual, llevada a cabo a través del programa Adobe Substance 3D Painter, ha desempeñado un papel crucial, ya que ha permitido seleccionar la técnica más adecuada en cada caso, la paleta de colores más idónea y el método de aplicación. Las pruebas virtuales elaboradas en este tipo de tratamientos han proporcionado un acercamiento y un proceso formativo de su ejecución antes de emprender la intervención

en la obra real. Con todo ello, el criterio y la toma de decisiones se han visto enriquecidas de modo considerable.

8. Se ha demostrado por medio de diversas pruebas el potencial de las herramientas de modelado digital del programa informático Blender para la creación de moldes. La posibilidad de analizar virtualmente detalles de los modelos anatómicos con precisión ha sido de gran ayuda a la hora de estudiar los encajes y las formas de las piezas. Estos han contribuido innegablemente a lograr unos óptimos resultados en los moldes. Cada una de las llaves ubicadas estratégicamente, han sido de gran ayuda para poder encajar las piezas de los moldes sin generar ninguna desviación en la pieza a reproducir.

   Respecto a las estructuras auxiliares, también ha quedado patente que el modelado digital es una herramienta que ofrece múltiples opciones para alcanzar diferentes soluciones. La posibilidad de analizar meticulosamente cada detalle del modelo ha permitido detectar ciertas carencias sobre la funcionalidad y eficacia del diseño, solucionando diversos imprevistos previamente a su impresión. Por otro lado, simular los diversos abordajes que se van a llevar a cabo en la obra ha permitido efectuar un análisis minucioso de las piezas. Ello ha facilitado una mejor comprensión de la magnitud de las intervenciones y, a su vez, ha facilitado crear piezas que se ajusten milimétricamente a las superficies de contacto y volúmenes de las obras con gran exactitud. Con todo ello, se ha logrado inmovilizar y estabilizar cualquier fragmento durante la adhesión, proporcionando mayor seguridad y precisión en las operaciones.

9. En cuanto a la difusión, el aspecto más realista de los modelos digitalizados ha mejorado notablemente mediante el empleo de diversos materiales, incluidas técnicas de texturizado basados en PBR, obtenidas por medio del programa Adobe Substance 3D Sampler. Por otro lado, la configuración de la iluminación, al igual que el plató y cámara virtual, han demostrado su capacidad para acercarse al aspecto físico de los materiales constituyentes de la obra con unos resultados fotorrealistas en los renderizados 2D llevados a cabo en el programa informático Blender. La iluminación ha desempeñado un papel fundamental a la hora de representar eficazmente sus volúmenes y reproducir todos los detalles con el más alto nivel de realismo.

   Los resultados obtenidos con la retopología de la malla mediante la herramienta *Zremesher* del programa informático ZBrush y la *generación de mapas de textura* a través del programa Blender, han puesto en relieve el gran potencial, importancia y necesidad para enriquecer la documentación 3D. Gracias a estos avances, se ha alcanzado el fotorrealismo en este tipo de artefactos científicos, garantizando su alto rigor en difusiones por medio de entornos museísticos o de plataformas web.

10. Los materiales seleccionados para la fabricación de moldes, enfocados específicamente en las reintegraciones volumétricas o creación de facsímiles, tanto en FDM con la máquina Ultimaker S5 como en LFS mediante el modelo Form 2, han registrado con éxito los volúmenes generales. Sin embargo, se han observado variaciones en los detalles de la superficie en función de cada material. El análisis de las diferentes posiciones y ángulos analizados mediante ambas técnicas ha permitido determinar el grado del patrón lineal generado en las superficies tanto del molde como del positivo en cera. En particular, el ángulo a 45º en la posición horizontal es el que ha proporcionado la mayor definición y

calidad en la reproducción de los detalles del modelo anatómico en cera seleccionado, tanto en FDM como LFS.

Respecto a las pruebas efectuadas para hallar la mejor técnica de aplicación y extracción del positivo en cera, mediante el pincelado y el vertido, con y sin vaselina, los resultados han revelado la necesidad de emplear la vaselina, así como colar la cera para obtener una calidad superior. Asimismo, se ha comprobado que los moldes fabricados con los materiales ensayados en FDM presentan un mejor rendimiento en términos de extracción de los positivos en comparación con la técnica de impresión LFS.

Por otro lado, la utilización de soportes en la impresión FDM con un material totalmente reversible como el PVA, ha reducido eficazmente la deformación de la superficie causada por el contacto en zonas puntuales, a diferencia de los resultados obtenidos en la impresión LFS. La evaluación a través del microscopio digital Dino-Lite ha facilitado determinar con precisión la unión de las capas en cada molde.

Ambas técnicas de fabricación han mostrado un resultado sorprendente. De entre todos los materiales analizados en FDM, el PLA Thought, ha prestado los mejores resultados en cuanto a la calidad de los detalles del molde y facilidad de extracción del positivo. Por su parte, la resina V4 utilizada en la impresora LFS también ha logrado reproducir con calidad los detalles. No obstante, los inconvenientes mencionados anteriormente, como la dificultad de extraer los positivos o las marcas de los soportes sobre la superficie a reproducir en cera, han generado serias dudas de su utilización. Por otro lado, también hay que tener en cuenta el coste económico y dada la similitud de los acabados, la impresión FDM con la composición PLA Thought a una resolución en la impresión por capa de 0.06 se ha considerado más apropiada para estos fines.

11. Respecto al mecanizado CNC por medio de la máquina MonoFab SRM-20, aunque es una alternativa viable, su idoneidad puede ser limitada para trabajos que requieran de volúmenes complejos. Además, es importante recalcar que los tiempos de configuración, preparación y trabajo, podrían ser considerablemente más largos dependiendo de las características de cada pieza.
12. La investigación de las propiedades mecánicas de tracción con la máquina modelo Microtest SCM 3000 95 y de flexión con la máquina de tracción/compresión Adamel Lhomargy DY30, ha revelado una notable correlación entre los materiales termoplásticos de impresión FDM y el proceso de orientación del filamento en la construcción de las probetas. Con ello, se ha podido analizar el comportamiento anisotrópico mostrado por los materiales analizados. En particular, las probetas fabricadas con la deposición del filamento en paralelo a la tensión aplicada han demostrado un rendimiento superior.

    De entre todos los materiales ensayados, el PLA con una resolución en la impresión por capa de 0.1 ha mostrado las características más adecuadas para la impresión de estructuras auxiliares. Las mejores propiedades mecánicas en cada pieza se han logrado con una posición de 90º y una densidad de relleno del 100%. Con estas condiciones se ha asegurado una gran seguridad y estabilidad durante las adhesiones necesarias. Sin embargo, se tiene que tener en cuenta que el diseño desarrollado para las estructuras ha ofrecido unos óptimos resultados en base a las características materiales y peso de los ensayos realizados. Para otro tipo de adhesión, estos sistemas han de ser valorados por los profesionales del sector, ajustando las características propias a cada obra en concreto.

Se han de tener en especial consideración factores como el peso de la obra y el número de los fragmentos, los ángulos de unión, la complejidad volumétrica, el material constituyente, el diseño de las estructuras, el material de impresión 3D, así como la orientación de la impresión de cada una de las piezas que conforman las estructuras.

13. La responsabilidad de establecer criterios de actuación en al ámbito de los contenidos virtuales, una vez sometidos los artefactos a procesos de digitalización con diversos fines, recaen sobre diferentes profesionales interdisciplinares. El análisis de intervenciones en el patrimonio cultural mediante las técnicas digitales 3D requieren de supervisiones por parte de conservadores-restauradores. Esto se debe a la estricta y amplia formación que poseen en relación con los tratamientos sobre la obra real, ya que, durante los análisis virtuales, con mucha facilidad se pueden crear y caer en resultados arbitrarios. Por lo tanto, es indispensable mantener un control y una supervisión constante para lograr un equilibrio entre las legislaciones, normativa y recomendaciones generales que rigen las intervenciones en la conservación y restauración, en este caso, en el ámbito escultórico. Pero, además, debe tenerse en cuenta los criterios específicos de intervención, en este caso, de los artefactos didácticos, así como las consideraciones y limitaciones de las aplicaciones tecnológicas en el patrimonio cultural. En última instancia, la revisión exhaustiva de un conjunto de criterios ha facilitado la elaboración de diversas recomendaciones para gestionar estas herramientas digitales 3D a lo largo de las fases de documentación, virtualización, impresión 3D e intervención sobre las colecciones anatómicas científicas.
14. El análisis de cada una de las tecnologías descritas en la sección de materiales y métodos, han permitido la formulación de protocolos y recomendaciones específicas de diferentes tratamientos con el máximo respeto hacia el original. La eficacia de estos protocolos ha quedado demostrada en los casos de estudio abordados, ya que han proporcionado una gran ayuda para los profesionales del sector de la conservación y restauración del patrimonio cultural. Estas herramientas han reducido la necesidad de manipular físicamente los artefactos durante los numerosos estudios, mejorando de este modo la precisión del diagnóstico y el análisis de los datos sobre las obras. Además, han ayudado a planificar estrategias de conservación y a establecer los protocolos a seguir durante los tratamientos de intervención necesarios. Gracias al uso de las tecnologías 3D, se ha logrado trabajar bajo el criterio de la “mínima intervención”, garantizando el máximo respeto y calidad en los tratamientos realizados.

    Pese a todos los trabajos, esfuerzos y avances en la investigación para asegurar la salvaguarda de los modelos anatómicos artificiales, así como las estrategias desarrolladas para mejorar los tratamientos de conservación-restauración, siguen encontrándose en entornos poco controlados y adecuados. Por ello, resulta esencial que las entidades competentes tomen medidas urgentes para dotarlos al menos de vitrinas adecuadas y solucionar los problemas derivados de las fluctuaciones de temperatura y humedad en los espacios expositivos o de almacenaje.

Futuras líneas de investigación en estudios postdoctorales

A lo largo de la presente tesis doctoral son varias las líneas de investigación que se ampliarán en futuros trabajos postdoctorales tras el potencial analizado:

1. Profundizar en el análisis de moldes mediante técnicas de impresión FDM y LFS con el objetivo de obtener positivos en otro tipo de materiales como la pasta de papel maché o la escayola. Con ello, se pretende ampliar la reintegración volumétrica en artefactos que presentan este tipo de materiales, así como crear posibles facsímiles con diferentes fines.
2. Ahondar en la obtención de positivos directamente mediante la máquina CNC en otro tipo de materiales como la pasta de papel maché o la escayola, para la obtención directa de volúmenes a reintegrar o facsímiles.
3. Ampliar el estudio de los moldes mediante la técnica de fabricación LFS ensayando un abanico más extendido de resinas.
4. Caracterizar diversas resinas LFS por medio de ensayos de tracción y flexión con el fin de compararlas con los resultados hallados en FDM de cara a la impresión de estructuras auxiliares.
5. Profundizar en el diseño y comportamiento de diversas estructuras auxiliares enfocados a solventar casuísticas de mayor envergadura mediante simulaciones con elementos finitos.

Referencias bibliográficas

3DHOP - Gallery. (n.d.). Recuperado el 29 de mayo de 2023, de https://3dhop.net/demo.php

Adami, A., Balletti, C., Fassi, F., Fregonese, L., Guerra, F., Taffurelli, L., & Vernier, P. (2015). The bust of Francesco II Gonzaga: from digital documentation to 3D printing. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, *II-5-W3*(5W3), 9–15. https://doi.org/10.5194/ISPRSANNALS-II-5-W3-9-2015

Adamopoulos, E., Bovero, A., & Rinaudo, F. (2020). Image-based metric heritage modeling in the near-infrared spectrum. *Heritage Science*, *8*(1), 1–12. https://heritagesciencejournal.springeropen.com/articles/10.1186/s40494-020-00397-w

Adamopoulos, E., Rinaudo, F., & Ardissono, L. (2020). A Critical Comparison of 3D Digitization Techniques for Heritage Objects. *ISPRS International Journal of Geo-Information* , *10*(1), 10. https://doi.org/10.3390/IJGI10010010

Adamopoulos, E., Rinaudo, F., & Bovero, A. (2019). First assessments on heritage science oriented image-based modeling using low-cost modified and mobile cameras. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, *XLII-2-W17*(2/W17), 23–30. https://doi.org/10.5194/ISPRS-ARCHIVES-XLII-2-W17-23-2019

Adamopoulos, E., Tsilimantou, E., Keramidas, V., Apostolopoulou, M., Karoglou, M., Tapinaki, S., Ioannidis, C., Georgopoulos, A., & Moropoulou, A. (2017). Multi-sensor documentation of metric and qualitative information of historic stone structures. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, *IV-2-W2*(2W2), 1–8. https://doi.org/10.5194/ISPRS-ANNALS-IV-2-W2-1-2017

Adams, J. W., Olah, A., McCurry, M. R., Potze, S., & Wilson, B. A. (2015). Surface Model and Tomographic Archive of Fossil Primate and Other Mammal Holotype and Paratype Specimens of the Ditsong National Museum of Natural History, Pretoria, South Africa. *PLOS ONE*, *10*(10), e0139800. https://doi.org/10.1371/JOURNAL.PONE.0139800

Afra, S., Speranza, L., & Tattini, F. (2013). Il Grande Scheletro di Clemente Susini datato 1805. Restauro e montaggio di una scultura monumentale in cera del Museo della Specola di Firenze. *OPD Restauro*, *25*, 297–303. https://www.jstor.org/stable/24398143

Akca, D. (2012). 3d Modeling of cultural heritage objects with a structured light system. *Mediterranean Archaeology and Archaeometry*, *12*, 139–152.

Akca, D., & Gruen, A. (2009). Comparative geometric and radiometric evaluation of mobile phone and still video cameras. *The Photogrammetric Record*, *24*(127), 217–245. https://doi.org/10.1111/J.1477-9730.2009.00541.X

Alderighi, T., Malomo, L., Giorgi, D., Pietroni, N., Bickel, B., & Cignoni, P. (2018). Metamolds: computational design of silicone molds. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, *37*(4), 1–13. https://doi.org/10.1145/3197517.3201381

Alexander, P., Allen, S., & Dutta, D. (1998). Part orientation and build cost determination in layered manufacturing. *Computer-Aided Design*, *30*(5), 343–356. https://doi.org/10.1016/S0010-4485(97)00083-3

Alfageme González, B. Marín Torres, T. (2006). Uso formativo de los Museos Universitarios en España. *Revista de Teoría y Didáctica de las Ciencias Sociales*, *11*, 263-286.

Andó, M., Birosz, M., & Jeganmohan, S. (2021). Surface bonding of additive manufactured parts from multi-colored PLA materials. *Measurement*, *169*, 108583. https://doi.org/10.1016/J.MEASUREMENT.2020.108583

Andujar, C., Chica, A., & Brunet, P. (2012). User-interface design for the Ripoll Monastery exhibition at the National Art Museum of Catalonia. *Computers & Graphics*, *36*(1), 28–37. https://doi.org/10.1016/J.CAG.2011.10.005

Angelini, E., & Gori, A. (2019). Old anatomical models as makeshifts of measurements in medicine. En IMEKO TC-4 International Conference on Metrology for Archaeology and Cultural Heritage (Ed.), Florence, Italy. 469-473 https://www.imeko.org/publications/tc4-Archaeo-2019/IMEKO-TC4-METROARCHAEO-2019-92.pdf

Angheluta, L. (2019). *Practical guide and applications of photogrammetry in cultural heritage 3D digitization*. Editura MEGA.

Apollonio, F. I., Ballabeni, M., & Gaiani, M. (2014). Color enhanced pipelines for reality-based 3D modeling of on site medium sized archeological artifacts. *Virtual Archaeology Review*, *5*(10), 59–76. https://doi.org/10.4995/VAR.2014.4218

Apollonio, F. I., Basilissi, V., Callieri, M., Dellepiane, M., Gaiani, M., Ponchio, F., Rizzo, F., Rubino, A. R., Scopigno, R., & Sobra, G. (2018). A 3D-centered information system for the documentation of a complex restoration intervention. *Journal of Cultural Heritage*, *29*, 89–99. https://doi.org/10.1016/J.CULHER.2017.07.010

Apollonio, F. I., Fantini, F., Garagnani, S., & Gaiani, M. (2021). A Photogrammetry-Based Workflow for the Accurate 3D Construction and Visualization of Museums Assets. *Remote Sensing*, *13*(3), 486. https://doi.org/10.3390/RS13030486

Apollonio, F. I., Gaiani, M., Basilissi, W., & Rivaroli, L. (2017). Photogrammetry driven tools to support the restoration of open-air bronze surfaces of sculptures: an integrated solution starting from the experience of the neptune fountain in bologna. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, *XLII-2-W3*(2W3), 47–54. https://doi.org/10.5194/ISPRS-ARCHIVES-XLII-2-W3-47-2017

Appelbaum, B. (1987). Criteria for treatment: reversibility. *Journal of the American Institute for Conservation*, *26*(2), 65–73.

Aragon, S., Péquignot, A., Morille, C.-H., Dequaire, A., & Hortault, G. (2007). Las colecciones científicas universitarias, un patrimonio en proceso de recuperación. *Revista de Museología*, *38*, 72–80.

Arbace, L., Sonnino, E., Callieri, M., Dellepiane, M., Fabbri, M., Iaccarino Idelson, A., & Scopigno, R. (2013). Innovative uses of 3D digital technologies to assist the restoration of a fragmented terracotta statue. *Journal of Cultural Heritage*, *14*(4), 332–345. https://doi.org/10.1016/J.CULHER.2012.06.008

Artec Studio 15. (2020). http://docs.artec-group.com/as/15/en/

Baldassarri, M., & Lemmi, F. (2015). Documentare in 3D in Archeologia: una proposta di valorizzazione per l'area del cantiere medievale del *Castrum Brinae* (SP). En P. Arthur & M. L. Imperiale (Eds.), *VII Congresso nazionale di archeologia medievale. Pré-tirages (Lecce, 9-12 ... - Google Libros* (pp. 13–17). All'Insegna del Giglio.

Baldini, E. (2009). I modelli pomologici. En M. Raffaelli (Ed.), Il Museo di Storia Naturale dell'Università di Firenze – Le collezioni botaniche Vol. II (pp. 229-235). Firenze University Press. 10.36253/978-88-8453-956-4

Balletti, C., & Ballarin, M. (2019). An Application of Integrated 3D Technologies for Replicas in Cultural Heritage. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, *8*(6), 285. https://doi.org/10.3390/IJGI8060285

Balletti, C., Ballarin, M., & Guerra, F. (2017). 3D printing: State of the art and future perspectives. *Journal of Cultural Heritage*, *26*, 172–182. https://doi.org/10.1016/J.CULHER.2017.02.010

Banfi, F. (2017). Bim orientation: grades of generation and information for different type of analysis and management process. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, *XLII-2-W5*(2W5), 57–64. https://doi.org/10.5194/ISPRS-ARCHIVES-XLII-2-W5-57-2017

Banfi, F., Pontisso, M., Paolillo, F. R., Roascio, S., Spallino, C., & Stanga, C. (2023). Interactive and Immersive Digital Representation for Virtual Museum: VR and AR for Semantic Enrichment of Museo Nazionale Romano, Antiquarium di Lucrezia Romana and Antiquarium di Villa Dei Quintili. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, *12*(2), 28. https://doi.org/10.3390/IJGI12020028

Barbieri, L., Fuoco, F., Bruno, F., & Muzzupappa, M. (2022). Exhibit supports for sandstone artifacts designed through topology optimization and additive manufacturing techniques. *Journal of Cultural Heritage*, *55*, 329–338. https://doi.org/10.1016/J.CULHER.2022.04.008

Barone, S., Paoli, A., & Razionale, A. V. (2012). 3D Reconstruction and Restoration Monitoring of Sculptural Artworks by a Multi-Sensor Framework. *Sensors*, *12*(12), 16785–16801. https://doi.org/10.3390/S121216785

Baumer, U., Dietemann, P., Geiges, M. L., Hack, U., Hentschel, B., Herdin, M., Herm, C., Hoblyn, S., Kober, L., Lang, J., Mühlenberend, S., Roeßiger, S., Schnalke, T., Schwadorf, K., Seemann, P., Weyer, A., & Widulin, N. (2010). *Recommendations for the preservation of wax moulages at universities and hospitals and in museums and other collections*. Deutsches Hygiene Museum Dresden.

Bea, M., & Angás, J. (2017). Geometric documentation and virtual restoration of the rock art removed in Aragón (Spain). *Journal of Archaeological Science: Reports*, *11*, 159–168. https://doi.org/10.1016/J.JASREP.2016.11.025

Becattini, M. (1991). *Il mondo antico: nei calchi della Gipsoteca*. Firenze: S.P.E.S.

Bekele, M. K., & Champion, E. (2019). A Comparison of Immersive Realities and Interaction Methods: Cultural Learning in Virtual Heritage. *Frontiers in Robotics and AI*, *6*, 91. https://doi.org/10.3389/FROBT.2019.00091

Bekele, M. K., Sylaiou, S., Pavlidis, G., & Fidas, C. (2021). Clouds-Based Collaborative and Multi-Modal Mixed Reality for Virtual Heritage. *Heritage*, *4*(3), 1447–1459. https://doi.org/10.3390/HERITAGE4030080

Belter, J. T., & Dollar, A. M. (2015). Strengthening of 3D Printed Fused Deposition Manufactured Parts Using the Fill Compositing Technique. *PLOS ONE*, *10*(4), e0122915. https://doi.org/10.1371/JOURNAL.PONE.0122915

Benedetti, L., Corsini, M., Cignoni, P., Callieri, M., & Scopigno, R. (2012). Color to gray conversions in the context of stereo matching algorithms: An analysis and comparison of current methods and an ad-hoc theoretically-motivated technique for image matching. *Machine Vision and Applications*, *23*(2), 327–348. https://doi.org/10.1007/S00138-010-0304-X

Bennardi, D., & Furferi, R. (2007). *Il restauro virtuale : tra ideologia e metodologia*. Edifir.

Berns, R. S., & Smith, S. (2012). Analysis of Color Management Default Camera Profiles for Museum Imaging Applications. *Archiving Conference*, *9*, 111–115.

Biagi Maino, D., & Maino, G. (2017). *Principi e applicazioni del restauro virtuale*. Edifir.

Bianconi, F., Catalucci, S., Filippucci, M., Marsili, R., Moretti, M., Rossi, G., & Speranzini, E. (2017). Comparison between two non-contact techniques for art digitalization. *Journal of Physics: Conference Series*, *882*(1). https://doi.org/10.1088/1742-6596/882/1/012005

Birn, J. (2014). Digital Lighting & rendering. New Riders.

Blanco-Pons, S., Carrión-Ruiz, B., Luis Lerma, J., & Villaverde, V. (2019). Design and implementation of an augmented reality application for rock art visualization in Cova dels Cavalls (Spain). *Journal of Cultural Heritage*, *39*, 177–185. https://doi.org/10.1016/J.CULHER.2019.03.014

Bonells, J., & Lacaba, I. (1800). *Curso Completo de Anatomía del Cuerpo Humano: Vol. V*. En Madrid en la imprenta de Sancha. http://hdl.handle.net/2027/ucm.5310800172

Boutsi, A. M., Verykokou, S., Soile, S., & Ioannidis, C. (2021). A pattern-based augmented reality application for the dissemination of cultural heritage. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, *VIII-M-1–2021*(M-1–2021), 57–63. https://doi.org/10.5194/ISPRS-ANNALS-VIII-M-1-2021-57-2021

Brandi, C. (1963). *Teoria del restauro*. Edizioni di storia e Letteratura, Einaudi.

Brunet, P., De Luca, L., Hyvönen, E., Joffres, A., Plassmeyer, P., Pronk, M., Scopigno, R., & Sonkoly, G. (2022). *Report on a European Collaborative Cloud for Cultural Heritage*. European Commission. https://doi.org/10.2777/64014

Brunetaud, X., Stefani, C., Badosa, S. J., Beck, K., & Al-Mukhtar, M. (2012). Comparison between photomodelling and laser scanning to create a 3D model for a digital health record. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, *16*(SUPPL. 1), 48–63. https://doi.org/10.1080/19648189.2012.681957

Callieri, M., Cignoni, P., Ganovelli, F., Impoco, G., Montani, C., Pingi, P., Ponchio, F., & Scopigno, R. (2004). Visualization and 3D data processing in the David restoration. *IEEE Computer Graphics and Applications*, *24*(2), 16–21. https://doi.org/10.1109/MCG.2004.1274056

Cárdenas Valenzuela, J. L. (2015). The Anatomical Statue of Dr. Auzoux: First Anatomical Model of Teaching Purposes in Chile. *International Journal of Morphology*, *33*(1), 393–399. https://doi.org/10.4067/S0717-95022015000100062

Cardoso, J. (2013). *Crafting 3D photorealism : lighting workflows in 3ds Max, mental ray and V-ray*. 3DTotal Pub.

Carta (1987). *Carta de 1987 de la Conservación y Restauración*. http://www.planmaestro.ohc.cu/recursos/papel/cartas/1987-restauracion.pdf

Carta de Atenas. (1931). *Carta para la restauración de monumentos históricos*. http://www.planmaestro.ohc.cu/recursos/papel/cartas/1931-atenas.pdf

Carta de Cracovia. (2000). *Principios para la conservación y restauración del patrimonio construido*. http://www.planmaestro.ohc.cu/recursos/papel/cartas/2000-cracovia.pdf

Carta de Londres (2006). *La carta de Londres para el uso de la visualización tridimensional en la investigación y divulgación del Patrimonio Cultural*. https://londoncharter.org/fileadmin/templates/main/docs/london_charter_1_1_es.pdf

Carta de Londres (2009). *La carta de Londres para el uso de la visualización tridimensional en la investigación y divulgación del Patrimonio Cultural. Preámbulo.* https://londoncharter.org/fileadmin/templates/main/docs/london_charter_2_1_en.pdf

Carta del Restauro. (1932). https://www.portaenrere.cat/wp-content/uploads/2017/08/1932_Carta_Restauro_Roma.pdf

Carta del Restauro. (1972). https://ge-iic.com/files/Cartasydocumentos/Carta_del_restauro.pdf

Carta de Venecia. (1964). https://irpmzcc2.org/upload/secciones_archivos/02-carta-de-venecia-1964_201901041854.pdf

Casanova, C., & Romeiras, M. M. (2020). Legacy of the scientific collections of the Instituto de Investigação Científica Tropical, University of Lisbon: a critical review and outlook. *Conservar Património*, *33*(33), 32–43. https://doi.org/10.14568/cp2018040

Ch'ng, E., Cai, S., Zhang, T. E., & Leow, F. T. (2019). Crowdsourcing 3D cultural heritage: best practice for mass photogrammetry. *Journal of Cultural Heritage Management and Sustainable Development*, *9*(1), 24–42. https://doi.org/10.1108/JCHMSD-03-2018-0018

Coba Peña, A. C., Calero Castillo, A. I., Collado Montero, F. J., Hernández Pablos, A., & Medina Flórez, V. (2017). Reconstrucción virtual de color sobre la policromía del alfarje y yeserías del patio de las Doncellas. *Revista PH*, *7*, 1–24.

Cocks, M. M. (2014). Dr Louis Auzoux and his collection of papier-mâché flowers, fruits and seeds. *Journal of the History of Collections*, *26*(2), 229–248. https://doi.org/10.1093/JHC/FHT036

Collins, T., Woolley, S. I., Gehlken, E., & Ch'ng, E. (2019). Automated Low-Cost Photogrammetric Acquisition of 3D Models from Small Form-Factor Artefacts. *Electronics*, *8*(12), 1441. https://doi.org/10.3390/ELECTRONICS8121441

Colombero, C., Dabove, P., Grasso, N., Khosro Anjom, F., Pace, F., & Aicardi, S. (2022). Microgeophysics and geomatics data integration reveals the internal fracturing conditions of the statue of Ramses II (Museo Egizio, Torino, Italy). *Scientific Reports*, *12*(1), 1–12. https://doi.org/10.1038/s41598-022-14300-z

Colombo, A., & Perzolla, V. (2016). *Le tecnologie digitali al servizio della conservazione. Dall'integrazione scultorea al restauro virtuale.* Il Prato.

Cosentino, A. (2015). Practical notes on ultraviolet technical photography for art examination. *Conservar Património*, *21*, 53–62. https://doi.org/10.14568/CP2015006

Cultural Heritage Imaging. (2015). *Guidelines for Calibrated Scale Bar Placement and Processing*. https://www.agisoft.com/pdf/tips_and_tricks/CHI_Calibrated_Scale_Bar_Placement_and_Processing.pdf

Dall'Asta, E., Bruno, N., Bigliardi, G., Zerbi, A., & Roncella, R. (2016). Photogrammetric techniques for promotion of archaeological heritage: the archaeological museum of parma (Italy). *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, *XLI-B5*, 243–250. https://doi.org/10.5194/ISPRS-ARCHIVES-XLI-B5-243-2016

de Lázaro, G. R., Martínez-Fernández, A., Rangel-Rivero, A., & Benito-Calvo, A. (2021). Shedding light on pre-Columbian crania collections through state-of-the-art 3D scanning techniques. *Virtual Archaeology Review*, *12*(24), 1–10. https://doi.org/10.4995/VAR.2021.13742

De Luca, D., Del Giudice, M., Grasso, N., Matrone, F., Osello, A., & Piras, M. (2019). Handheld volumetric scanner for 3D printed integrations of historical elements: comparison and results. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, *XLII-2-W15*(2/W15), 381–388. https://doi.org/10.5194/ISPRS-ARCHIVES-XLII-2-W15-381-2019

De Stefano, A., Tausch, R., Santos, P., Kuijper, A., Di Gironimo, G., Fellner, D. W., & Siciliano, B. (2016). Modeling a virtual robotic system for automated 3D digitization of cultural heritage artifacts. *Journal of Cultural Heritage*, *19*, 531–537. https://doi.org/10.1016/J.CULHER.2015.11.008

Dellepiane, M., Callieri, M., Fondersmith, M., Cignoni, P., & Scopigno, R. (2007). Using 3D scanning to analyze a proposal for the attribution of a bronze horse to Leonardo da Vinci. D. Arnold, F. Niccolucci, & A. Chalmers (Eds.), *The 8th International Symposium on Virtual Reality, Archaeology and Cultural Heritage VAST*. http://dx.doi.org/10.2312/VAST/VAST07/117-124

Dellepiane, M., Callieri, M., Ponchio, F., & Scopigno, R. (2008). Mapping Highly Detailed Colour Information on Extremely Dense 3D Models: The Case of David's Restoration. *Computer Graphics Forum*, *27*(8), 2178–2187. https://doi.org/10.1111/J.1467-8659.2008.01194.X

Demetrescu, E. (2015). Archaeological stratigraphy as a formal language for virtual reconstruction. Theory and practice. *Journal of Archaeological Science*, *57*, 42–55. https://doi.org/10.1016/J.JAS.2015.02.004

Demetrescu, E., Fanini, B., & Cocca, E. (2023). An Online Dissemination Workflow for the Scientific Process in CH through Semantic 3D: EMtools and EMviq Open Source Tools. *Heritage*, *6*(2), 1264–1276. https://doi.org/10.3390/HERITAGE6020069

Demetrescu, E., Ferdani, D., Dell'Unto, N., Touati, A.-M. L., & Lindgren, S. (2016). Reconstructing the original splendour of the House of Caecilius Iucundus. A complete methodology for virtual archaeology aimed at digital exhibition. *SCIRES-IT - SCIentific RESearch and Information Technology*, *6*(1), 51–66. https://doi.org/10.2423/I22394303V6N1P51

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*, 109–115. https://doi.org/10.1016/J.CULHER.2018.03.026

Di Paola, F., & Inzerillo, L. (2018). 3D reconstruction-reverse engineering – digital fabrication of the egyptian palermo stone using by smartphone and light structured scanner. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, *XLII–2*(2), 311–318. https://doi.org/10.5194/ISPRS-ARCHIVES-XLII-2-311-2018

Di Paola, F., Milazzo, G., & Spatafora, F. (2017). Computer aided restoration tools to assist the conservation of an ancient sculpture. The colossal statue of zeus enthroned. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, *XLII-2-W5*(2W5), 177–184. https://doi.org/10.5194/ISPRS-ARCHIVES-XLII-2-W5-177-2017

Di Pietra, V., Donadio, E., Picchi, D., Sambuelli, L., & Spanò, A. (2017). Multi-source 3d models supporting ultrasonic test to investigate an egyptian sculpture of the archaeological museum in bologna. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, *XLII-2-W3*(2W3), 259–266. https://doi.org/10.5194/ISPRS-ARCHIVES-XLII-2-W3-259-2017

Díaz Marín, M. del C. (2017). *Desarrollo metodológico para la aplicación de técnicas de adquisición e impresión 3D en conservación y restauración de vidrio arqueológico, y caracterización de materiales relacionados con la fase de reconstrucción* [Tesis de doctorado, Universidad Politécnica de Valencia]. Repositorio Institucional – Universidad Politécnica de Valencia https://doi.org/10.4995/THESIS/10251/90472

Díaz-Barrancas, F., Pardo, P. J., Suero, M. I., & Pérez, Á. L. (11 – 12 de Septiembre de 2018). *Is it possible to apply colour management technics in Virtual Reality devices? XIV CONFERENZA DEL COLORE, Area di RIcerca di Firenze del Consiglio Nazionale delle Ricerche, Florencia, Italia.* https://www.researchgate.net/publication/331865730_Is_it_possible_to_apply_colour_management_technics_in_Virtual_Reality_devices

Díaz-Marín, C., & Aura-Castro, E. (2017). Making 3D implants for conservation and restoration of archaeological glass. *Virtual Archaeology Review*, *8*(16), 103–109. https://doi.org/10.4995/VAR.2017.5946

Donadio, E., Sambuelli, L., Spanò, A., & Picchi, D. (2018). Three-Dimensional (3D) Modelling and Optimization for Multipurpose Analysis and Representation of Ancient Statues. En F.

Remondino, A. Georgopoulos, D. González-Aguilera, & P. Agrafiotis (Eds.), *Latest Developments in Reality-Based 3D Surveying and Modelling* (pp. 95–118). MDPI AG. https://doi.org/10.3390/BOOKS978-3-03842-685-1-5

Dostal, C., & Yamafune, K. (2018). Photogrammetric texture mapping: A method for increasing the Fidelity of 3D models of cultural heritage materials. *Journal of Archaeological Science: Reports*, *18*, 430–436. https://doi.org/10.1016/J.JASREP.2018.01.024

Doungkom, P., & Jiamjiroch, K. (2019). Analysis of Printing Pattern and Infiltration Percent over the Tensile Properties of PLA Printed Parts by a Fuse Deposition Modelling Printer. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, *501*(1), 012028. https://doi.org/10.1088/1757-899X/501/1/012028

Drossis, G., Birliraki, C., & Stephanidis, C. (2018). Interaction with immersive cultural heritage environments using virtual reality technologies. En C. Stephanidis (Ed.), *HCI International 2018 – Posters' Extended Abstracts* (Vol. 852, pp. 177–183). Springer Verlag. https://doi.org/10.1007/978-3-319-92285-0_25

Duguleană, M., Carrozzino, M., Gams, M., & Tanea, I. (Eds.). (2019). *VR Technologies in Cultural Heritage*. Springer Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-05819-7

Duguleană, M., & Voinea, G. D. (2018). Enhancing the experience of visiting outdoor heritage sites using handheld AR. En C. Stephanidis (Ed.), *HCI International 2018 – Posters' Extended Abstracts* (Vol. 852, pp. 184–191). Springer Verlag. https://doi.org/10.1007/978-3-319-92285-0_26

Dumont, B., Dupont, A.-L., Papillon, M.-C., & Jeannel, G.-F. (2011). Technical Study and Conservation-Treatment of a Horse Model by Dr Auzoux Technical Study and Conservation Treatment of a Horse Model by Dr Auzoux. *Studies in Conservation*, *56*, 58–74.

Đurić, I., Vasiljević, I., Obradović, M., Stojaković, V., Kićanović, J., & Obradović, R. (2014). Comparative Analysis of Open-Source and Commercial Photogrammetry Software for Cultural Heritage. *Journal of Heritage in the Digital Era*, *2*, 243–252. https://doi.org/10.52842/CONF.ECAADE.2021.2.243

Esclapés Jover, J., Molina Vidal, J., Muñoz Ojeda, F. J., Fabregat Bolufer, L., & Tejerina Antón, D. (2017). La restauración virtual: Aplicaciones a la conservación del patrimonio arqueológico. En Secretaría General Técnica Subdirección General de Documentación y Publicaciones (Ed.), *La Ciencia y el Arte VI. Ciencias experimentales y conservación del patrimonio* (pp. 152–165). Ministerio de Cultura. https://www.libreria.culturaydeporte.gob.es/libro/la-ciencia-y-el-arte-vi-ciencias-experimentales-y-conservacion-del-patrimonio_1495/

Estevan, F. E., Madrid García, J. A., De Contacto, A., & García, J. A. M. (2010). El mundo virtual en la restauración. Aplicaciones virtuales para la conservación y restauración del patrimonio. *Arché*, *4–5*, 11–20. https://riunet.upv.es/handle/10251/30147

Fanini, B., Pagano, A., Pietroni, E., Ferdani, D., Demetrescu, E., & Palombini, A. (2023). Augmented Reality for Cultural Heritage. *Springer Handbooks*, 391–411. https://doi.org/10.1007/978-3-030-67822-7_16

Farella, E. M., Morelli, L., Grilli, E., Rigon, S., & Remondino, F. (2022). Handling critical aspects in massive photogrammetric digitazion of museum assets. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, *XLVI-2/W1-2022*(2/W1-2022), 215–222. https://doi.org/10.5194/ISPRS-ARCHIVES-XLVI-2-W1-2022-215-2022

Farella, E. M., Morelli, L., Rigon, S., Grilli, E., & Remondino, F. (2022). Analysing Key Steps of the Photogrammetric Pipeline for Museum Artefacts 3D Digitisation. *Sustainability*, *14*(9), 5740. https://doi.org/10.3390/SU14095740

Felicísimo, Á. M., Eugenia Polo, M., Rodero, A., & Tortosa, T. (2018). El valor de la imagen: del objeto arqueológico al objeto virtual. En A. Carretero Pérez, C. Papí Rodes, & G. Ruiz Zapatero (Eds.), *Actas del V congreso internacional de historia de la arqueología / IV jornadas de historiografía SEHA-MAN. Arqueología de los museos: 150 años de la creación del Museo Arqueológico Nacional* (pp. 1191–1202). Secretaría General Técnica, Subdirección General de Documentación y Publicaciones. http://www.man.es/man/dam/jcr:3caeb002-a7d0-403a-bbc3-d52cdce5756a/2018-actas-v-ciha.pdf

Felicísimo, Á. M., & Polo, M. E. (2022). Measurement and control of colour fidelity in scanned 3D models for heritage conservation. *Journal of Cultural Heritage*, *56*, 159–166. https://doi.org/10.1016/J.CULHER.2022.06.010

Ferdani, D., Fanini, B., Piccioli, M. C., Carboni, F., & Vigliarolo, P. (2020). 3D reconstruction and validation of historical background for immersive VR applications and games: The case study of the Forum of Augustus in Rome. *Journal of Cultural Heritage*, *43*, 129–143. https://doi.org/10.1016/J.CULHER.2019.12.004

Fernández Ruiz, M. (2011). Modelado, texturizado y ajuste de malla. En M. Armenteros (Ed.), *Postproducción digital* (pp. 105-132). Bubok. https://e-archivo.uc3m.es/handle/10016/12936

Ferrucci, F., Ciardi, M. R., & Amura, A. (2020). Conservation and virtual reconstruction of the Lucanian Paintings from the National Archaeological Museum of Paestum (ITALY). *Ge-Conservacion*, *18*(1), 275–282. https://doi.org/10.37558/GEC.V18I1.852

Festa, L., Iaccarino Idelson, A., Serino, C., & Vischetti, F. (2015). Il Mitra Tauroctono di Tarquinia: intervento di restauro e riassemblaggio con l'uso di tecnologie 3D. *In: Atti Del XIII Congresso Nazionale IGIIC Lo Stato Dell'Arte*, 271–278. http://www.icr.beniculturali.it/pagina.cfm?usz=5&uid=73&rid=84&rim=370

Finlayson, G. D., MacKiewicz, M., & Hurlbert, A. (2015). Color Correction Using Root-Polynomial Regression. *IEEE Transactions on Image Processing*, *24*(5), 1460–1470. https://doi.org/10.1109/TIP.2015.2405336

Fiorini, G., Maekawa, L., & Stiberc, P. (2008). Save the Plants: Conservation of Brendel Anatomical Botany Models. En K. Kwan, & R. Williams (Eds.), *Book and Paper Group session, AIC 36th Annual Meeting* (vol. 27, pp. 35–45). https://cool.culturalheritage.org/coolaic/sg/bpg/annual/v27/bpga27-07.pdf

Fischer, A., & Eska, M. (2011). Joining Broken Wax Fragments: Testing Tensile Strength of Adhesives on Fragile and Non-polar Substrates. En *Papers Ethnographic Session, 16 Th Triennial Conference. ICOM 19-23 September. Lisboa* (pp. 1-9). ICOM CC.

http://bh1.fpc.pt/nyron/Library/catalog/winlibimg.aspx?skey=A2431F66F2ED49F7824DF733CE5DD535&doc=13790&img=3619

Fontana, R., Greco, M., Materazzi, M., Pampaloni, E., Pezzati, L., Rocchini, C., & Scopigno, R. (2002). Three-dimensional modelling of statues: the Minerva of Arezzo. *Journal of Cultural Heritage*, *3*(4), 325–331. https://doi.org/10.1016/S1296-2074(02)01242-6

Fraser, C. S., & Brown, D. C. (1986). Industrial photogrammetry: new developments and recent applications. *The Photogrammetric Record*, *12*(68), 197–217. https://doi.org/10.1111/J.1477-9730.1986.TB00557.X

Gabbriellini, C., Nesi, G., Rossi, F., Santi, R., & Speranza, L. (2009). La collezione di cere del Museo di Anatomia Patologica di Firenze. Nótese sulle vicende storiche, sulla técnica esecutiva e sui restauri. *OPD Restauro*, *21*, 51–70. http://opificiodellepietredure.it/index.php?it/450/opd-restauro-n-21-2009

Gabbriellini, C., Pradier, I., Rossi, F., Rossignoli, G., Dallatana, D., Porro, A., Speranza, L., & Toni, R. (2013). Il restauro dello Spellato del Museo dipartimentale S.Bi.Bi.T. dell'Università di Parma. Biomateriali e tecnologie innovative per la valorizzazione della ceroplastica settecentesca: Progetto MIUR. *OPD Restauro*, *25*, 37–52. https://www.jstor.org/stable/24398121

Gaiani, M., Apollonio, F. I., & Fantini, F. (2020). Una metodología inteligente para la digitalización de colecciones museísticas. *EGA Expresión Gráfica Arquitectónica*, *25*(38), 170–181. https://doi.org/10.4995/EGA.2020.12281

Gaiani, M., Rossi, M., & Rizzi, A. (2003). Percezione delle immagini virtuali. En M. Gaiani (Ed.), *Metodi di prototipazione digitale e visualizzazione per il Disegno Industriale, l'architettura degli interni e i beni cultural* (pp. 33-254). Edizioni POLI.design. https://re.public.polimi.it/bitstream/11311/254506/3/Ceconello_Metodi%20di%20prototipazione.pdf

Galantucci, R. A., & Fatiguso, F. (2019). Advanced damage detection techniques in historical buildings using digital photogrammetry and 3D surface anlysis. *Journal of Cultural Heritage*, *36*, 51–62. https://doi.org/10.1016/J.CULHER.2018.09.014

Geary, A., & Howe, E. (2009). Three-dimensional documentation and virtual restoration of the Lichfield Angel. *Journal of the Institute of Conservation*, *32*(2), 165–179. https://doi.org/10.1080/19455220903059875

Geurds, A., Aguilar, J., & McKendrick, F. (2018). Prehistoric Stone Sculptures at the Gregorio Aguilar Barea Museum, Nicaragua: Photogrammetry Practices and Digital Immersive Virtual

Environment Applications for archaeology. En K. Kelley & R. K. L. Wood (Eds.), *Digital Imaging of Artefacts: Developments in Methods and Aims* (pp. 119–144). Archaeopress. https://n9.cl/3mpc0

Gherardini, F., & Sirocchi, S. (2022). Systematic integration of 2D and 3D sources for the virtual reconstruction of lost heritage artefacts: the equestrian monument of Francesco III d'Este (1774–1796, Modena, Italy). *Heritage Science*, *10*(1), 1–19. https://doi.org/10.1186/S40494-022-00711-8

Girelli, V. A., Tini, M. A., D'Apuzzo, M. G., & Bitelli, G. (2020). 3D digitisation in cultural heritage knowledge and preservation: the case of the neptune statue in bologna and its archetype. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, *XLIII-B2-2020*(B2), 1403–1408. https://doi.org/10.5194/ISPRS-ARCHIVES-XLIII-B2-2020-1403-2020

Girelli, V. A., Tini, M. A., Dellapasqua, M., & Bitelli, G. (2019). High resolution 3d acquisition and modelling in cultural heritage knowledge and restoration projects: the survey of the fountain of neptune in bologna. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, *XLII-2-W11*(2/W11), 573–578. https://doi.org/10.5194/ISPRS-ARCHIVES-XLII-2-W11-573-2019

Gomes, L., Pereira Bellon, O. R., & 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

Gonizzi Barsanti, S., Caruso, G., Micoli, L. L., Covarrubias Rodriguez, M., & Guidi, G. (2015). 3D Visualization of Cultural Heritage Artefacts with Virtual Reality devices. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, *XL-5-W7*(5W7), 165–172. https://doi.org/10.5194/ISPRSARCHIVES-XL-5-W7-165-2015

González Bueno, A. (2003). Museos de ciencia en las universidades: algunas reflexiones y una descripción. *Revista de Museología*, *27-28*, 67-71.

González López, M. J. (1995a). Metodología de estudio y criterios de intervención en escultura policromada en el IAPH (I). *Revista PH*, *11*, 30. https://doi.org/10.33349/1995.11.211

González López, M. J. (1995b). Metodología de estudio y criterios de intervención en escultura policromada en el IAPH (II). *Revista PH*, *12*, 44. https://doi.org/10.33349/1995.12.240

González López, M. J., & Martínez Calvo, V. (2009). idUS - Reintegración virtual de lagunas. Las pinturas de la Sala de los Reyes de la Alhambra de Granada. *Revista PH - Instituto Andaluz Del Patrimonio Histórico*, *70*, 98–113. https://idus.us.es/handle/11441/50986

Gouriveau, M. (2018). La fabrication des modèles anatomiques en papier-mâché du docteur auzoux. En C. Laroque y V. Lee (Eds.), *Papiers envolume, traditions asiatiques et occidentales, actes de la journée d'étude* du 4 novembre 2016, site de l' HiCSA, mis en linge en février 2018 (pp. 76–100). https://n9.cl/mnp1y

Graciano, A., Ortega, L., Segura, R. J., & Feito, F. R. (2017). Digitization of religious artifacts with a structured light scanner. *Virtual Archaeology Review*, *8*(17), 49–55. https://doi.org/10.4995/VAR.2016.4650

Grifoni, E., Bonizzoni, L., Gargano, M., Melada, J., Ludwig, N., Bruni, S., & Mignani, I. (2022). Hyper-dimensional Visualization of Cultural Heritage: A Novel Multi-analytical Approach on 3D Pomological Models in the Collection of the University of Milan. *ACM Journal on Computing and Cultural Heritage (JOCCH)*, *15*(2), 1–15. https://doi.org/10.1145/3477398

Grifoni, E., Legnaioli, S., Nieri, P., Campanella, B., Lorenzetti, G., Pagnotta, S., Poggialini, F., & Palleschi, V. (2018). Construction and comparison of 3D multi-source multi-band models for

cultural heritage applications. *Journal of Cultural Heritage*, *34*, 261–267. https://doi.org/10.1016/J.CULHER.2018.04.014

Grilli, E., & Remondino, F. (2019). Classification of 3D Digital Heritage. *Remote Sensing*, *11*(7), 847. https://doi.org/10.3390/RS11070847

Guidi, G., Atzeni, C., Spinetti, A., & Carosso, L. (2009). Digital Three-Dimensional Modelling of Donatello's David by Frequency-Modulated Laser Radar. *Studies in Conservation*, *54*(1), 3-11. https://www.jstor.org/stable/27867060

Guidi, G., & Frischer, B. D. (2020). 3D Digitization of Cultural Heritage. En Y. Liu, N. Pears, P. L. Rosin, & P. Huber (Eds.), *3D Imaging, Analysis and Applications, Second Edition* (pp. 631–697). Springer-Verlag London Ltd. https://doi.org/10.1007/978-3-030-44070-1

Hafeez, J., Lee, S., Kwon, S., & Hamacher, A. (2017). Image Based 3D Reconstruction of Texture-less Objects for VR Contents. *International Journal of Advanced Smart Convergence*, *6*(1), 9–17. https://doi.org/10.7236/IJASC.2017.6.1.9

Haskell, Francis., & Penny, Nicholas. (1990). *El gusto y el arte de la Antigüedad: el atractivo de la escultura clásica (1500-1900)*. Alianza.

Henriques, F., Gonçalves, A., Candeias, A., & Vieira, E. (2016). Heritage documentation and 3D retouching of virtual objects. En A. Bailão, F. Henriques, & A. Bidarra (Eds.), *Proccedings 3rd International Meeting on Retouching of Cultural Heritage (RECH 3)*. Escola Artística e Profissional Árvore. https://ciencia.ucp.pt/en/publications/heritage-documentation-and-3d-retouching-of-virtual-objects

Herbert, D. G. M., Correy, D. S., & Holmes, J. (2013). Virtualization and the democratization of science: 3D technologies revolutionize museum research and access. En A. C. Addison, L. De Luca, G. Guidi, & S. Pescarin (Eds.), *Digital Heritage International Congress (DigitalHeritage)* (vol. 2, pp.265–271).

Herholz, P., Matusik, W., & Alexa, M. (2015). Approximating Free-form Geometry with Height Fields for Manufacturing. *Computer Graphics Forum*, *34*(2), 239–251. https://doi.org/10.1111/CGF.12556

Hernández-Muñoz, Ó. (2023). Analysis of Digitized 3D Models Published by Archaeological Museums. *Heritage* 6(5), 3885-3902. https://doi.org/10.3390/heritage6050206

Hernández-Muñoz, Ó., Aranda Gabrielli, D., Maruri Palacín, A., Sterp Moga, E., & Sánchez-Ortiz, A. (2022). 3D Digital Technologies for the Elaboration of a Replica of a Dermatological Didactic Model Belonging to the Olavide Museum from the Original Mould. *Heritage*, *5*(2), 702–715. https://doi.org/10.3390/HERITAGE5020039

Hernández-Muñoz, Ó., Gabrielli, D. A., Palacín, A. M., Sterp Moga, E., & Sánchez-Ortiz, A. (2023). Virtualización de una muestra de la colección de modelos dermatológicos de cera del Museo Olavide. *Anuario Electrónico de Estudios En Comunicación Social "Disertaciones,"* *16*(1), 1–20. https://doi.org/10.12804/REVISTAS.UROSARIO.EDU.CO/DISERTACIONES/A.11714

Hernández-Muñoz, Ó., Sánchez Ortiz, A., & Sterp, E. (2020). Posibles aplicaciones de la digitalización 3D en la conservación y restauración de colecciones científicas: modelos anatómicos de cera. En R. L. Cabrera Collazo (Ed.), *Rumbos atrevidos, pero necesarios: conversaciones entre innovación, arte y creatividad* (pp. 129–139). GKA Ediciones. https://www.calameo.com/read/005098249e6df6dafbe14

Hernández-Muñoz, Ó., & Sánchez-Ortiz, A. (2019). Digitalización e impresión 3D para la reconstrucción de pérdidas volumétricas en un modelo anatómico de cera del siglo XVIII. *Conservar Património*, *30*(30), 59–72. https://doi.org/10.14568/cp2018003

Hernández-Muñoz, Ó., Sánchez-Ortiz, M. A., & Matía Martín, P. (2019). Anatomía animal. Técnicas digitales para la reconstrucción escultórica de la apariencia original de un modelo de cera del siglo XIX. *Intervención*, *10*(19), 64–76. https://doi.org/10.30763/INTERVENCION.2019.19.209

Hernández-Muñoz, Ó., Sterp Moga, E., & Sánchez-Ortiz, A. (2023a). Analysing two techniques for the digitisation of historical collections of anatomical models. *HUMAN REVIEW. International Humanities Review / Revista Internacional de Humanidades*, *17*(5), 1–10. https://doi.org/10.37467/REVHUMAN.V12.4762

Hernández-Muñoz, Ó., Sterp Moga, E., & Sánchez-Ortiz, A. (2023b). Estrategias innovadoras mediante escáner de luz estructurada para la digitalización en situaciones complejas de modelos anatómicos didácticos. *Ge-Conservacion*, *23*(1), 53–64. https://doi.org/10.37558/GEC.V23I1.1110

Hernández-Muñoz, Ó., Sterp Moga, E., & Sánchez-Ortiz, A. (2023c). Stabilization of an anatomical wax model of the complutense veterinary museum with the help of 3D digital technologies. *International journal of conservation science*, *14*(1), 45–56. https://doi.org/10.36868/IJCS.2023.01.04

Herráez, J., Martínez, J. C., Coll, E., Martín, M. T., & Rodríguez, J. (2016). 3D modeling by means of videogrammetry and laser scanners for reverse engineering. *Measurement*, *87*, 216–227. https://doi.org/10.1016/J.MEASUREMENT.2016.03.005

Hess, M., Korenberg, C., Ward, C., Robson, S., & Entwistle, C. (2015). Use of 3D laser scanning for monitoring the dimensional stability of a Byzantine ivory panel. *Studies in Conservation*, *60*, S126–S133. https://doi.org/10.1179/0039363015Z.000000000217

Historic England. (2017a). *BIM for Heritage: Developing a Historic Building Information Model*. https://historicengland.org.uk/images-books/publications/bim-for-heritage/

Historic England. (2017b). *Photogrammetric Applications for Cultural Heritage Guidance for Good Practice*. https://historicengland.org.uk/images-books/publications/photogrammetric-applications-for-cultural-heritage/

Historic England. (2018). *3D Laser Scanning for Heritage Advice and Guidance on the Use of Laser Scanning in Archaeology and Architecture*. https://historicengland.org.uk/images-books/publications/3d-laser-scanning-heritage/heag155-3d-laser-scanning/

Historic England. (2019). *BIM for Heritage Developing the Asset Information Model*. https://historicengland.org.uk/images-books/publications/bim-for-heritage-aim/

Hollinger, R. E., Edwell John, Jr., Jacobs, H., Moran-Collins, L., Thome, C., Zastrow, J., Metallo, A., Waibel, G., & Rossi, V. (2013). Tlingit-Smithsonian Collaborations with 3D Digitization of Cultural Objects. *Museum Anthropology Review*, *7*(1–2), 201–253. https://scholarworks.iu.edu/journals/index.php/mar/article/view/2173

Hooshmand, M. J., Mansour, S., & Dehghanian, A. (2021). Optimization of build orientation in FFF using response surface methodology and posterior-based method. *Rapid Prototyping Journal*, *27*(5), 967–994. https://doi.org/10.1108/RPJ-07-2020-0162

Hunter, W. (1774). *The Anatomy of the Human Gravid Uterus*. Birminghamiae: Impreso por Joannes Baskerville. En London: por S. Baker & G. Leigh, et al. NLM Unique ID: 2491060R. https://collections.nlm.nih.gov/catalog/nlm:nlmuid-2491060R-bk

Instituto del Patrimonio Cultural de España. (2017). *Proyecto COREMANS: criterios de intervención en retablos y escultura policromada*. Secretaría General Técnica. Subdirección General de Documentación y Publicaciones. https://www.libreria.culturaydeporte.gob.es/libro/proyecto-coremans-criterios-de-intervencion-en-retablos-y-escultura-policromada_5338/

International Color Consortium. (2010). *International Color Consortium ® Specification ICC.1:2010 (Profile version 4.3.0.0) Image technology colour management-Architecture, profile format, and data structure*. https://www.color.org/specification/icc1v43_2010-12.pdf

Inzerillo, L., & Di Paola, F. (2017). From sfm to 3D print: automated workflow addressed to practitioner aimed at the conservation and restauration. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, *XLII-2-W5*(2W5), 375–382. https://doi.org/10.5194/ISPRS-ARCHIVES-XLII-2-W5-375-2017

Jo, Y. H., & Hong, S. (2019). Application of Three-dimensional Scanning, Haptic Modeling, and Printing Technologies for Restoring Damaged Artifacts. *Journal of Conservation Science*, *35*(1), 71–80. https://doi.org/10.12654/JCS.2019.35.1.08

Jo, Y. H., Hong, S., Jo, S. Y., & Kwon, Y. M. (2020). Noncontact restoration of missing parts of stone Buddha statue based on three-dimensional virtual modeling and assembly simulation. *Heritage Science*, *8*(1), 1–12. https://doi.org/10.1186/S40494-020-00450-8

Kelley, K., & Wood, R. K. L. (2018). Digital imaging of artefacts: Developments in methods and aims. *Digital Imaging of Artefacts: Developments in Methods and Aims*, 1–182. https://doi.org/10.2307/J.CTV1ZCKZNQ

Kirchhöfer, M., Chandler, J., & Wackrow, R. (2011). Cultural Heritage Recording Utilising Low-Cost Closerange Photogrammetry. *Geoinformatics FCE CTU*, *6*, 185–192. https://doi.org/10.14311/GI.6.24

Kirchner, E., van Wijk, C., van Beek, H., & Koster, T. (2021). Exploring the limits of color accuracy in technical photography. *Heritage Science*, *9*(1), 1–13. https://doi.org/10.1186/S40494-021-00536-X

Koch, M., & Kaehler, M. (2009). Combining 3D Laser-Scanning and Close-Range Photogrammetry-An Approach to Exploit the Strength of Both Methods. En B. Frischer, J. W. Crawford, & D. Koller (Eds.), *Making history interactive: Computer Applications and*

Quantitative Methods in Archaeology (CAA): proceedings of the 37th international conference, Williamsburg, Virginia, United States of America, March 22-26, 2009. http://archive.caaconference.org/2009/articles/Koch_Contribution278_a.pdf

Korytkowski, P., & Olejnik-Krugly, A. (2017). Precise capture of colors in cultural heritage digitization. *Color Research & Application*, *42*(3), 333–336. https://doi.org/10.1002/COL.22092

Kraus, K. (2007). *Photogrammetry,geometry from images and laser scans.* (2ª ed.) Walter de Gruyter.

Lang, J. (2011). Adhesives for Wax Artifacts: Investigation of Suitable Materials and Their Adhesion Properties via Tensile and Bending Tests. En A*dhesives and Consolidants for Conservation: Research and Applications - Proceedings of Symposium 2011* (pp. 146–162). Canadian Conservation Institute. https://publications.gc.ca/collections/collection_2019/pch/CH57-4-8-2011.pdf

Lanman, D., Crispell, D., & Taubin, G. (2009). Surround structured lighting: 3-D scanning with orthographic illumination. *Computer Vision and Image Understanding*, *113*(11), 1107–1117. https://doi.org/10.1016/J.CVIU.2009.03.016

Lanteri, L., Agresti, G., & Pelosi, C. (2019). A New Practical Approach for 3D Documentation in Ultraviolet Fluorescence and Infrared Reflectography of Polychromatic Sculptures as Fundamental Step in Restoration. *Heritage*, *2*(1), 207–215. https://doi.org/10.3390/HERITAGE2010015

Lastilla, L., Ravanelli, R., & Ferrara, S. (2019). 3D high-quality modeling of small and complex archaeological inscribed objects: relevant issues and proposed methodology. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, *XLII-2-W11*(2/W11), 699–706. https://doi.org/10.5194/ISPRS-ARCHIVES-XLII-2-W11-699-2019

Leipner, A., Baumeister, R., Thali, M. J., Braun, M., Dobler, E., & Ebert, L. C. (2016). Multi-camera system for 3D forensic documentation. *Forensic Science International*, *261*, 123–128. https://doi.org/10.1016/J.FORSCIINT.2016.02.003

Levoy, M., Ginsberg, J., Shade, J., Fulk, D., Pulli, K., Curless, B., Rusinkiewicz, S., Koller, D., Pereira, L., Ginzton, M., Anderson, S., & Davis, J. (2000). The digital Michelangelo project. En *SIGGRAPH00: The 27th Internationl Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques Conferenc*e (pp. 131–144). ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co.1515 Broadway, 17th Floor New York, NY, United States. https://doi.org/10.1145/344779.344849

Ley 16/1985, de 25 de junio, del Patrimonio Histórico Español. (BOE de 29 de junio de 1985), articulo 3. https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-1985-12534

Libro de Acuerdos para el Real Colegio de Cirugía de San Carlos establecido en Madrid, año de 1787 [Manuscrito]. Madrid, 1787-1804 (BH MSS 930).

Liu, S., Tu, Y., Wang, X., Qin, B., Xie, Z., Zhang, Y., Zhang, H., & Hu, D. (2022). Transparent reversible prosthesis, a new way to complete the conservation–restoration of a Black Ding bowl with application of 3D technologies. *Heritage Science*, *10*(1), 1–14. https://doi.org/10.1186/S40494-022-00646-0

Lloyd, J. (2016). Contextualizing 3D cultural heritage. En *Digital Heritage. Progress in Cultural Heritage: Documentation, Preservation, and Protection* (Vol. 10058 LNCS, pp. 859–868). Springer Verlag. https://doi.org/10.1007/978-3-319-48496-9_69

Loaiza Carvajal, D. A., Morita, M. M., & Bilmes, G. M. (2020). Virtual museums. Captured reality and 3D modeling. *Journal of Cultural Heritage*, *45*, 234–239. https://doi.org/10.1016/J.CULHER.2020.04.013

López, L., Torres, J. C., Arroyo, G., Cano, P., & Martín, D. (2020). An efficient GPU approach for designing 3D cultural heritage information systems. *Journal of Cultural Heritage*, *41*, 142–151. https://doi.org/10.1016/J.CULHER.2019.05.003

López-Martínez, T., García-Bueno, A., & Medina-Flórez, V. J. (2018). New methodology for the assessment of cleaning treatments. Applications of photogrammetry for restoration. *Journal of Cultural Heritage*, *30*, 117–123. https://doi.org/10.1016/J.CULHER.2017.09.019

Macarrón Miguel, A. M. (2013). *Historia de la conservación y la restauración desde la antigüedad hasta el siglo XX*. (3ª ed.). Tecnos.

Malik, U. S., Tissen, L. N. M., & Vermeeren, A. P. O. S. (2021). 3D Reproductions of Cultural Heritage Artifacts: Evaluation of Significance and Experience. *Studies in Digital Heritage*, *5*(1), 1–29. https://doi.org/10.14434/SDH.V5I1.32323

Mandelli, A., Achille, C., Tommasi, C., & Fassi, F. (2017). Integration of 3D models and diagnostic analyses through a conservation-oriented information system. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, *XLII-2-W5*(2W5), 497–504. https://doi.org/10.5194/ISPRS-ARCHIVES-XLII-2-W5-497-2017

Mandressi, R. (2012). *La mirada del anatomista: disecciones e invención del cuerpo en occidente*. Ciudad de México: Universidad Iberoamericana.

Manson, J., Petrova, G., & Schaefer, S. (2008). Streaming Surface Reconstruction Using Wavelets. *Computer Graphics Forum*, *27*(5), 1411–1420. https://doi.org/10.1111/J.1467-8659.2008.01281.X

Marić, I., Šiljeg, A., Cukrov, N., Roland, V., & Domazetović, F. (2020). How fast does tufa grow? Very high-resolution measurement of the tufa growth rate on artificial substrates by the development of a contactless image-based modelling device. *Earth Surface Processes and Landforms*, *45*(10), 2331–2349. https://doi.org/10.1002/ESP.4883

Marić, J., Bašić, Ž., Jerković, I., Mihanović, F., Anđelinović, Š., & Kružić, I. (2020). Facial reconstruction of mummified remains of Christian Saint-Nicolosa Bursa. *Journal of Cultural Heritage*, *42*, 249–254. https://doi.org/10.1016/J.CULHER.2019.08.008

Marziali, E., & Marziali, S. (2019). Focus-Stacking Technique in Macro-Photogrammetry. En W. Börner, & S. Uhlirz (Eds.), *Proceedings of the 22nd International Conference on Cultural Heritage and New Technologies 2017*. Museen der Stadt Wien – Stadtarchäologie. https://www.academia.edu/38934574/Focus_Stacking_Technique_in_Macro_Photogrammetry

Marziali, S., & Dionisio, G. (2017). Photogrammetry and macro photography. The experience of the MUSINT II Project in the 3D digitizing process of small size archaeological artifacts. *Studies in Digital Heritage*, *1*(2), 298–309. https://doi.org/10.14434/SDH.V1I2.23250

Matsuoka, R. (2014). Effect of Lossy JPEG Compression of an Image with Chromatic Aberrations on Target Measurement Accuracy. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, *II–5*(5), 235–242. https://doi.org/10.5194/ISPRSANNALS-II-5-235-2014

Mayoni, G. (2020). Artefactos, saberes y prácticas científico-educativas de la farmacobotánica argentina (siglo XIX y XX) Nuevas miradas sobre las colecciones históricas del Museo de Farmacobotánica "Juan Aníbal Domínguez" de la Universidad de Buenos Aires. *Dominguezia*, *36*(2), 31–45. https://ojs.dominguezia.org/index.php/Dominguezia/article/view/261

Mayoni, M. G. (2016). Plantas de papier-mâché. Estudios técnicos y conservación de la colección Brendel del Colegio Nacional de Buenos Aires. Argentina. *Ge-Conservacion*, *9*(9), 6–20. https://doi.org/10.37558/GEC.V9I0.324

McCarthy, J. (2014). Multi-image photogrammetry as a practical tool for cultural heritage survey and community engagement. *Journal of Archaeological Science*, *43*(1), 175–185. https://doi.org/10.1016/J.JAS.2014.01.010

Medina, J. J., Maley, J. M., Sannapareddy, S., Medina, N. N., Gilman, C. M., & McCormack, J. E. (2020). A rapid and cost-effective pipeline for digitization of museum specimens with 3D photogrammetry. *PLOS ONE*, *15*(8), e0236417. https://doi.org/10.1371/JOURNAL.PONE.0236417

Memorial Literario, Instructivo y Curioso de la Corte de Madrid. Enero de 1787 [UCM. Biblioteca Histórica FLL 23088]

Merchán, M. J., Merchán, P., Salamanca, S., Pérez, E., & Nogales, T. (2019). Digital fabrication of cultural heritage artwork replicas. In the search for resilience and socio-cultural commitment. *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*, *15*, e00125. https://doi.org/10.1016/J.DAACH.2019.E00125

Metashape. (2023). *Agisoft Metashape User Manual Professional Edition, Version 2.0*. https://www.agisoft.com/pdf/metashape-pro_2_0_en.pdf

Mohamed, O. A., Masood, S. H., & Bhowmik, J. L. (2015). Optimization of fused deposition modeling process parameters: a review of current research and future prospects. *Advances in Manufacturing*, *3*(1), 42–53. https://doi.org/10.1007/S40436-014-0097-7

Molada-Tebar, A., Lerma, J. L., & Marqués-Mateu, Á. (2017). Software development for colourimetric and spectral data processing: pycolourimetry desarrollo de software para el tratamiento de datos colorimetricos y espectrales: pycolourimetry. En A. M. Furones (Ed.), *1er Congreso en Ingeniería Geomática CIGeo* (pp. 48–53). Editorial Universitat Politècnica de València. https://doi.org/10.4995/CIGeo2017.2017.6568

Molada-Tebar, A., Marqués-Mateu, & Lerma, J. L. (2019). Correct use of color for cultural heritage documentation. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial*

Information Sciences, *IV-2-W6*(2/W6), 107–113. https://doi.org/10.5194/ISPRS-ANNALS-IV-2-W6-107-2019

Montusiewicz, J., Miłosz, M., Kęsik, J., & Żyła, K. (2021). Structured-light 3D scanning of exhibited historical clothing—a first-ever methodical trial and its results. *Heritage Science*, *9*(1), 1–20. https://doi.org/10.1186/S40494-021-00544-X

Nancarrow, J.-H. (2016). Democratizing the Digital Collection: New Players and New Pedagogies in Three-Dimensional Cultural Heritage. *Museum Worlds*, *4*(1), 63–77. https://doi.org/10.3167/ARMW.2016.040106

Narang, P., Raju, B., Jumah, F., Konar, S. K., Nagaraj, A., Gupta, G., & Nanda, A. (2021). The Evolution of 3D Anatomical Models: A Brief Historical Overview. *World Neurosurgery*, *155*, 135–143. https://doi.org/10.1016/J.WNEU.2021.07.133

Negrete Plano, A. (2012). *La colección de vaciados de escultura que Antonio Rafael Mengs donó a Carlos III para la Real Academia de Bellas Artes de San Fernando* [Tesis de doctorado, Universidad Complutense de Madrid]. Repositorio Institucional – Universidad Complutense de Madrid https://docta.ucm.es/entities/publication/d03fe470-6ecf-4215-98fb-23e23f81263d/full

Nepi, C. (2009). I modelli in cera delle piante e delle tavole didattiche. En M. Raffaelli (Ed.), Il Museo di Storia Naturale dell'Università di Firenze – Le collezioni botaniche Vol. II (pp. 217-227). Firenze University Press. 10.36253/978-88-8453-956-4

Nesi, G., Santi, R., & Taddei, G. L. (2009). Art and the teaching of pathological anatomy at the University of Florence since the nineteenth century. *Virchows Archiv*, *455*(1), 15–19. https://doi.org/10.1007/S00428-009-0794-Y

Nexus: adaptive 3D. (25 de enero de 2020). https://vcg.isti.cnr.it/nexus/

Nguyen, C. V., Lovell, D. R., Adcock, M., & La Salle, J. (2014). Capturing Natural-Colour 3D Models of Insects for Species Discovery and Diagnostics. *PLOS ONE*, *9*(4), e94346. https://doi.org/10.1371/JOURNAL.PONE.0094346

Nidagundi, V. B., Keshavamurthy, R., & Prakash, C. P. S. (2015). Studies on Parametric Optimization for Fused Deposition Modelling Process. *Materials Today: Proceedings*, *2*(4–5), 1691–1699. https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2015.07.097

Niquet, N. D., & Barberá, X. M. (2018). El Registro 3D como medio para el análisis y difusión del patrimonio escultórico. El caso de la escultura en cera del Écorché. *Ge-Conservacion*, *13*, 05–16. https://doi.org/10.37558/GEC.V13I0.551

Niquet, N. D., Mas-Barberà, X., & Vázquez, T. (2018). Virtual 3D registration of anatomic wax sculptures. *Eur. J. Anat*, *22*(3), 227–233.

Niquet, N. D., Sánchez-López, M., & Mas-Barberà, X. (2020). Development of reversible intelligent prosthesis for the conservation of sculptures. A case study. *Journal of Cultural Heritage*, *43*, 227–234. https://doi.org/10.1016/J.CULHER.2019.12.010

Olejnik-Krugly, A., & Korytkowski, P. (2020). Precise color capture using custom color targets. *Color Research & Application*, *45*(1), 40–48. https://doi.org/10.1002/COL.22435

Organización Internacional de Normalización (2017). *Photography-archiving systems- image quality analysis— part1: reflective originals* (ISO/TS 19264–1:2017). https://www.iso.org/standard/64221.html

Ortiz-Coder, P., & Sánchez-Ríos, A. (2020). An Integrated Solution for 3D Heritage Modeling Based on Videogrammetry and V-SLAM Technology. *Remote Sensing*, *12*(9), 1529. https://doi.org/10.3390/RS12091529

Palmas, G., Pietroni, N., Cignoni, P., & Scopigno, R. (2013). A computer-assisted constraint-based system for assembling fragmented objects. En A. C. Addison, L. De Luca, G. Guidi, & S. Pescarin (Eds.), *Digital Heritage International Congress (DigitalHeritage)* (vol. 2, pp.529–536). https://doi.org/10.1109/DIGITALHERITAGE.2013.6743793

Pan, J., Li, L., Yamaguchi, H., Hasegawa, K., Thufail, F. I., Brahmantara, & Tanaka, S. (2020). Fused 3D transparent visualization for large-scale cultural heritage using deep learning-based monocular reconstruction. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, *V-2–2020*(2), 989–996. https://doi.org/10.5194/ISPRS-ANNALS-V-2-2020-989-2020

Panetta, J., Zhou, Q., Malomo, L., Pietroni, N., Cignoni, P., & Zorin, D. (2015). Elastic textures for additive fabrication. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, *34*(4), 1–12. https://doi.org/10.1145/2766937

Patay-Horváth, A. (2012). The complete virtual 3D reconstruction of the east pediment of the temple of zeus at olympia. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, *XXXVIII-5-W16*, 53–59. https://doi.org/10.5194/ISPRSARCHIVES-XXXVIII-5-W16-53-2011

Patay-Horváth, A. (2014). The virtual 3D reconstruction of the east pediment of the temple of Zeus at Olympia an old puzzle of classical archaeology in the light of recent technologies. *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*, *1*(1), 12–22. https://doi.org/10.1016/J.DAACH.2013.06.001

Payne, E. M. (2019). 3D imaging of the Parthenon sculptures: an assessment of the archaeological value of nineteenth-century plaster casts. *Antiquity*, *93*(372), 1625–1642. https://doi.org/10.15184/AQY.2019.179

Pelosi, C., Calienno, L., Fodaro, D., Borrelli, E., Rubino, A. R., Sforzini, L., & Monaco, A. Lo. (2016). An integrated approach to the conservation of a wooden sculpture representing Saint Joseph by the workshop of Ignaz Günther (1727–1775): Analysis, laser cleaning and 3D documentation. *Journal of Cultural Heritage*, *17*, 114–122. https://doi.org/10.1016/J.CULHER.2015.07.004

Peral, R., Sagasti, D., & Sillaurren, S. (2005). Virtual Restoration of Cultural Heritage Through Real-Time 3D Models Projection. En M. Mudge, N. Ryan, & R. Scopigno (Eds.), *The 6th International Symposium on Virtual Reality, Archaeology and Intelligent Cultural Heritage VAST*. Conservation collection (Getty Research Institute). https://primo.getty.edu/primo-explore/fulldisplay/GETTY_ALMA21134106620001551/GRI

Pereira Uzal, J. M. (2013). *Gestión del color en proyectos de digitalización*. Marcombo.

Petrioli, G. (1750). *Le otto tavole anatomiche: con cinquanta figure in foglio delineate per compimento dell'opera sublime, et imperfetta del celebre Bartolomeo Eustachio de S. Severino della Marca*. En Roma: Nella Stamperia di Antonio de' Rossi. https://archive.org/details/b30459722/page/n23/mode/2up

Pfeuffer, C., Rahrig, M., Snethlage, R., & Drewello, R. (2018). 3D mapping as a tool for the planning of preservation measures on sculptures made of natural stone. *Environmental Earth Sciences*, *77*(8), 1–12. https://doi.org/10.1007/S12665-018-7479-2

Picollo, M., Stols-Witlox, M., & Fuster-López, L. (2020). *UV-Vis Luminescence imaging techniques/ Técnicas de imagen de luminiscencia UV-Vis*. Editorial Universitat Politècnica de València. http://hdl.handle.net/10251/138517

Pietroni, E. (2019). Experience Design, Virtual Reality and Media Hybridization for the Digital Communication Inside Museums. *Applied System Innovation*, *2*(4), 35. https://doi.org/10.3390/ASI2040035

Pietroni, E., & Ferdani, D. (2021). Virtual Restoration and Virtual Reconstruction in Cultural Heritage: Terminology, Methodologies, Visual Representation Techniques and Cognitive Models. *Information*, *12*(4), 167. https://doi.org/10.3390/INFO12040167

Pixel and Poly Design & Creative Services. (22 de mayo de 2021). *Index of Refraction values (IOR) - For use with 3d modeling / rendering and animation applications*. https://pixelandpoly.com/ior.html

Poggesi, M. (2009). La collezione delle cere anatomiche = The Anatomical Wax Collection. En G. Barsanti & G. Chelazzi (Eds.), *Il Museo di storia naturale dell'Università degli studi di Firenze* (Vol. 1, pp. 81–105). Firenze University Press. https://doi.org/10.1400/112573

Ponchio, F., & Dellepiane, M. (2015). Fast decompression for web-based view-dependent 3D rendering. En S. N. Spencer (Ed.), *Web3D 2015 20th International Conference on 3D Web Technology* (199–207). Association for Computing Machinery. https://doi.org/10.1145/2775292.2775308

Ponchio, F., Potenziani, M., Dellepiane, M., & Callieri, M. (2016). ARIADNE Visual Media Service: easy web publishing of advanced visual media. En S. Campana, R. Scopigno, G. Carpentiero, & M. Cirillo (Eds.), *CAA 2015 KEEP THE REVOLUTION GOING. Proceedings of the 43 rd Annual Conferenceon Computer Applications and QuantitativeMethods in Archaeology* (Vol. 52, pp.433-441). Archaeopress Publishing Ltd. https://www.researchgate.net/publication/306291041_ARIADNE_Visual_Media_Service_Easy_Web_Publishing_of_Advanced_Visual_Media

Potenziani, M., Callieri, M., Dellepiane, M., Corsini, M., Ponchio, F., & Scopigno, R. (2015). 3DHOP: 3D Heritage Online Presenter. *Computers & Graphics*, *52*, 129–141. https://doi.org/10.1016/J.CAG.2015.07.001

Principios de Sevilla. (2012). Los Principios de Sevilla: Principios Internacionales de la Arqueología Virtual. Forum Internacional de Arqueología Virtual. http://www.vi-mm.eu/wp-content/uploads/2016/10/The-Seville-Principles.pdf

Qian, Y., Gong, M., & Yang, Y. H. (2016). 3D Reconstruction of Transparent Objects with Position-Normal Consistency. En Lisa O'Conner (Ed.), *Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)* (Vol. 2016-December, pp. 4369–4377). IEEE Computer Society. https://doi.org/10.1109/CVPR.2016.473

Rahaman, H., Champion, E., & Bekele, M. (2019). From photo to 3D to mixed reality: A complete workflow for cultural heritage visualisation and experience. *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*, *13*, e00102. https://doi.org/10.1016/J.DAACH.2019.E00102

Ramm, R., Heinze, M., Kühmstedt, P., Christoph, A., Heist, S., & Notni, G. (2022). Portable solution for high-resolution 3D and color texture on-site digitization of cultural heritage objects. *Journal of Cultural Heritage*, *53*, 165–175. https://doi.org/10.1016/J.CULHER.2021.11.006

Ratigan, A. M. (2017). 3D Applications in Conservation and Connoisseurship: Investigating and Supplementing the Scholarly Catalogues of the Red Faun. *Studies in Digital Heritage*, *1*(2), 123–164. https://doi.org/10.14434/SDH.V1I2.23579

Ravanelli, R., Lastilla, L., & Ferrara, S. (2022). A high-resolution photogrammetric workflow based on focus stacking for the 3D modeling of small Aegean inscriptions. *Journal of Cultural Heritage*, *54*, 130–145. https://doi.org/10.1016/J.CULHER.2022.01.009

Reichert, J., Schellenberg, J., Schubert, P., & Wilke, T. (2016). 3D scanning as a highly precise, reproducible, and minimally invasive method for surface area and volume measurements of scleractinian corals. *Limnology and Oceanography: Methods*, *14*(8), 518–526. https://doi.org/10.1002/LOM3.10109

Riccardelli, C., Morris, M., Wheeler, G., Soultanian, J., Becker, L., & Street, R. (2014). The Treatment of Tullio Lombardo's Adam: A New Approach to the Conservation of Monumental Marble Sculpture. *Metropolitan Museum*, *49*(1), 48–116. https://www.metmuseum.org/art/metpublications/the_treatment_of_adam_metropolitan_museum_journal_v_49_2014

Rieger, T. (2016). *Technical Guidelines for Digitizing Cultural Heritage Materials Creation of Raster Image Files*. Federal Agencies Digital Guidelines Initiative. https://www.digitizationguidelines.gov/guidelines/FADGI%20Federal%20%20Agencies%20Digital%20Guidelines%20Initiative-2016%20Final_rev1.pdf

Rioux, M. (1994). Digital 3D imaging: theory and applications. *Videometrics III*, *2350*, 2–15. https://doi.org/10.1117/12.189122

Riva, A., Conti, G., Solinas, P., & Loy, F. (2010). The evolution of anatomical illustration and wax modelling in Italy from the 16th to early 19th centuries. *Journal of Anatomy*, *216*(2), 209–222. https://doi.org/10.1111/J.1469-7580.2009.01157.X

Rocchini, C., Cignoni, P., Montani, C., Pingi, P., Scopigno, R., Fontana, R., Greco, M., Pampaloni, E., Pezzati, L., Cygielman, M., Giachetti, R., Gori, G., Miccio, M., & Pecchioli, R. (2001). 3D Scanning the Minerva of Arezzo. En *International Cultural Heritage Informatics Meeting: Proceedings from ICHIM* (Vol.2, pp. 266-272). Archives & Museum Informatics. https://www.researchgate.net/publication/2376910_3D_Scanning_the_Minerva_of_Arezzo

https://dblp.org/db/conf/ichim/ichim2001-2.html

Rodríguez González de Canales, E. (2023). *Anatomía animal en cera. Arte, ciencia y conservación de la colección de modelos tridimensionales del Museo Veterinario Complutense*. [Tesis de doctorado, Universidad Complutense de Madrid]. Repositorio Institucional – Universidad Complutense de Madrid. https://docta.ucm.es/entities/publication/6fc3b407-1cf0-45fa-bcb3-28cf26b954c6/full

Roland. Monofab SRM-20 (2014). *Manual para el fresado a doble cara*. https://static1.squarespace.com/static/5d6e4ca633f26e00011a0c01/t/5e3805c56ce96b4a7960fa20/1580729820170/RolandmonofabSRM20_manual+%28ES%29.pdf

Rouf, S., Raina, A., Irfan Ul Haq, M., Naveed, N., Jeganmohan, S., & Farzana Kichloo, A. (2022). 3D printed parts and mechanical properties: Influencing parameters, sustainability aspects, global market scenario, challenges and applications. *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, *5*(3), 143–158. https://doi.org/10.1016/J.AIEPR.2022.02.001

Ruiz de Lacanal, M. D., & Galán-Pérez, A. M. (2013). Las colecciones científicas, técnicas y didácticas en los centros educativos y su conservación preventiva. Estado de la cuestión. En E. Vieira (Ed.), *IX Jornadas da Arte e Ciência UCP. V Jornadas da ARP: homenagem a Luís Elias Casanovas. A prática da conservação preventiva* (pp.227–240). Universidade Católica Editora – Porto. https://idus.us.es/bitstream/handle/11441/44140/LasColeccionesCientificas.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Ruiz, J. F., & Pereira, J. (2014). The colours of rock art. Analysis of colour recording and communication systems in rock art research. *Journal of Archaeological Science*, *50*(1), 338–349. https://doi.org/10.1016/J.JAS.2014.06.023

Sánchez Ortiz, M. A. (2015). Restauración de modelos anatómicos en cera: Colección del Real Colegio de Cirugía de San Carlos. *Ge-Conservacion*, *7*, 37–49. https://doi.org/10.37558/GEC.V7I0.274

Sánchez-Ortiz, A. (2016). "La Parturienta" Corporizar la idea / Metamorfosear la materia. En Ediciones Complutense (Ed.), *Arte y carne: la anatomía a la luz de la Ilustración*. Ediciones Complutense.

Sánchez, A., & Castelo, L. (2017). The Application of Colour Management to a Photographic Record for the Conservation of Scientific Collections: Anatomical Wax Models. *E-Conservation Journal*, *5*. https://doi.org/10.18236/ECONS5.201705

Sánchez Ortiz, A., del Moral Azanza, N., & Micó Boró, S. (2012). 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), 329-349.

Sánchez Ortiz, A., del Moral Azanza, N., & Micó Boró, S. (2014). La cera, metáfora de vida o muerte. Materiales, técnicas y procedimientos en la elaboración de modelos anatómicos. *Goya: Revista de arte*, *346*, 42-57.

Sánchez-Ortiz, A., Hernández-Muñoz, Ó., & Sterp Moga, E. (2021). Flora Artefacta. Historia, Tecnología y Conservación de la Colección de Modelos Botánicos Brendel en la Universidad

Complutense de Madrid. *Anales de Historia Del Arte*, *31*, 103–125. https://doi.org/10.5209/ANHA.78052

Sánchez Ortiz, A., & Matia Martín, P. (2016). Modelos plásticos o simulacros de carne: procedimientos tecnológicos en la creación de esculturas en cera. *De Arte. Revista de Historia Del Arte*, *15*, 310–326. https://doi.org/10.18002/DA.V0I15.3677

Sánchez Ortiz, A., & Micó Boró, S. (2012). Preventive conservation strategies for wax bodies in scientific university collections. *Conservation Science in Cultural Heritage*, *12*, 215–245. https://doi.org/10.6092/ISSN.1973-9494/3400

Sánchez Ortiz, A., Rodríguez González de Canales, E., Cantos Martínez, O., & Sánchez de Lollano Prieto, J. (2018). Comparative study of aqueous cleaning systems for wax sculptures. *International Journal of Conservation Science*, *9*(4), 653–666. https://ijcs.ro/public/IJCS-18-56_Ortiz.pdf

Sánchez-Ortiz, A., Sterp Moga, E., & Hernández-Muñoz, Ó. (2022). Natural versus artificial anatomy in science education. *HUMAN REVIEW. International Humanities Review / Revista Internacional de Humanidades*, *12*(1), 1–17. https://doi.org/10.37467/REVHUMAN.V11.3918

Santos, P., Ritz, M., Fuhrmann, C., & Fellner, D. (2017). 3D mass digitization: a milestone for archeological documentation. *Virtual Archaeology Review*, *8*(16), 1–11. https://doi.org/10.4995/VAR.2017.6321

Santos, P., Ritz, M., Fuhrmann, C., Monroy, R., Schmedt, H., Tausch, R., Domajnko, M., Knuth, M., & Fellner, D. (2017). Acceleration of 3D Mass Digitization Processes: Recent Advances and Challenges. *Mixed Reality and Gamification for Cultural Heritage*, 99–128. https://doi.org/10.1007/978-3-319-49607-8_4

Sanz, N., & Bergan, S. (Eds.). (2002). *The heritage of European universities*. Council of Europe Pub.

Sapirstein, P. (2016). Accurate measurement with photogrammetry at large sites. *Journal of Archaeological Science*, *66*, 137–145. https://doi.org/10.1016/J.JAS.2016.01.002

Sapirstein, P. (2018). A high-precision photogrammetric recording system for small artifacts. *Journal of Cultural Heritage*, *31*, 33–45. https://doi.org/10.1016/J.CULHER.2017.10.011

Sapirstein, P., & Murray, S. (2017). Establishing Best Practices for Photogrammetric Recording During Archaeological Fieldwork. *Journal of Field Archaeology*, *42*(4), 337–350. https://doi.org/10.1080/00934690.2017.1338513

Scopigno, R., Callieri, M., Cignoni, P., Corsini, M., Dellepiane, M., Ponchio, F., & Ranzuglia, G. (2011). 3D models for cultural heritage: Beyond plain visualization. *Computer*, *44*(7), 48–55. https://doi.org/10.1109/MC.2011.196

Scopigno, R., Callieri, M., Dellepiane, M., Ponchio, F., & Potenziani, M. (2017). Delivering and using 3D models on the web: are we ready? *Virtual Archaeology Review*, *8*(17), 1–9. https://doi.org/10.4995/VAR.2017.6405

Segreto, T., Bottillo, A., Teti, R., Galantucci, L. M., Lavecchia, F., & Galantucci, M. B. (2017). Non-contact Reverse Engineering Modeling for Additive Manufacturing of Down Scaled Cultural Artefacts. *Procedia CIRP*, *62*, 481–486. https://doi.org/10.1016/J.PROCIR.2017.03.042

Shafqat Malik, U., & Guidi, G. (2018). Massive 3D digitization of sculptures: Methodological approaches for improving efficiency. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, *364*(1), 1–8. https://doi.org/10.1088/1757-899X/364/1/012015

Shao, J., Zhang, W., Mellado, N., Grussenmeyer, P., Li, R., Chen, Y., Wan, P., Zhang, X., & Cai, S. (2019). Automated markerless registration of point clouds from TLS and structured light scanner for heritage documentation. *Journal of Cultural Heritage*, *35*, 16–24. https://doi.org/10.1016/J.CULHER.2018.07.013

Smellie, W. (1754). *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.* En London [editor no identificado]. NLM Unique ID: 2523045R. https://collections.nlm.nih.gov/catalog/nlm:nlmuid-2523045R-bk

Soler, F., Melero, F. J., & Luzón, M. V. (2017). A complete 3D information system for cultural heritage documentation. *Journal of Cultural Heritage*, *23*, 49–57. https://doi.org/10.1016/J.CULHER.2016.09.008

Song, Y., Li, Y., Song, W., Yee, K., Lee, K. Y., & Tagarielli, V. L. (2017). Measurements of the mechanical response of unidirectional 3D-printed PLA. *Materials & Design*, *123*, 154–164. https://doi.org/10.1016/J.MATDES.2017.03.051

Soto-Martin, O., Fuentes-Porto, A., & Martin-Gutierrez, J. (2020). A Digital Reconstruction of a Historical Building and Virtual Reintegration of Mural Paintings to Create an Interactive and Immersive Experience in Virtual Reality. *Applied Sciences*, *10*(2), 597. https://doi.org/10.3390/APP10020597

Soud, W. A., Baqer, I. A., & Ahmed, M. R. (2019). Experimental Study of 3D printing Density Effect on the Mechanical Properties of the Carbon-Fiber and Polylactic Acid Specimens. *Engineering and Technology Journal*, *37*(4A), 128–132. https://doi.org/10.30684/ETJ.37.4A.3

Squires, N. (16 de febrero de 2017). *Stone sculptures smashed by Isil in ancient city of Palmyra restored to former glory by Italian experts*. The Telegraph. https://www.telegraph.co.uk/news/2017/02/16/stone-sculptures-smashed-isil-ancient-city-palmyra-restored/

Statham, N. (2019). Scientific rigour of online platforms for 3D visualization of heritage. *Virtual Archaeology Review*, *10*(20), 1–16. https://doi.org/10.4995/VAR.2019.9715

Stanbury, P. (2000). University museums and collections. *Museum International*, 52(2), 4-9. https://doi.org/10.1111/1468-0033.00251

Sterle, A., & Ramovš, L. M. (2020). The use of a virtual image as a step to the aesthetic presentation of an overpainted baroque painting. *Ge-Conservacion*, *18*(1), 347–355. https://doi.org/10.37558/GEC.V18I1.819

Sterp, E. (2017). *Aplicación de técnicas digitales 3d en una propuesta de conservación-restauración para un modelo anatómico en cera (siglo XVIII). Venus de Medici*. [Trabajo Fin de Grado]. Repositorio Institucional – Universidad Complutense de Madrid https://docta.ucm.es/entities/publication/875867f0-c99f-48dd-a87b-78db9aa58799/full

Sterp Moga, E. (2019). *Aplicación de técnicas digitales 3D: protocolo de conservación y restauración de un modelo anatómico en cera del siglo XVIII.* [Trabajo Fin de Máster no publicado]. Universidad de Alicante.

Sterp Moga, E., Hernández Muñoz, Ó., & Sánchez Ortiz, A. (2020). Protocolos innovadores mediante tecnologías 3D para la creación de un modelo de toma de decisiones en intervenciones de conservación sobre artefactos de cera. En D. Caldevilla Domínguez (Ed.), *Investigando sobre tendencias en análisis de contenidos de vanguardia* (pp. 429–440). Tirant lo Blanch.

Sterp Moga, E., Hernández-Muñoz, Ó., del Río Esteban, J., & Sánchez-Ortiz, A. (2022b). 3D digital technologies applied to the design and printing of auxiliary structures for fragment adhesion strategies on wax artifacts. *Heritage Science*, *10*(1), 1–19. https://doi.org/10.1186/S40494-022-00737-Y

Sterp Moga, E., Hernández-Muñoz, Ó., & Sánchez-Ortiz, A. (2021). Aplicación de fuentes de iluminación en modelos fotogramétricos para la diagnosis y restauración virtual de objetos en cera policromados. *Conservar Património*, *38*, 10–21. https://doi.org/10.14568/cp2020021

Sterp Moga, E., Hernández-Muñoz, Ó., & Sánchez-Ortiz, A. (2022c). 3D scanning for comparative analysis of manufacture and deterioration tracking: a case study of the 18th century wax Venus de' Medici. *SCIRES-IT - SCIentific RESearch and Information Technology*, *12*(1), 1–18. https://doi.org/10.2423/I22394303V12N1P1

Sterp Moga, E., Sánchez-Ortiz, A., & Hernández-Muñoz, Ó. (2022a). 3D printing of molds for the creation of facsimiles and volumetric reintegrations in wax anatomical sculptures. *Heritage Science*, *10*(1), 1–16. https://doi.org/10.1186/S40494-022-00838-8

Ströbel, B., Schmelzle, S., Blüthgen, N., & Heethoff, M. (2018). An automated device for the digitization and 3D modelling of insects, combining extended-depth-of-field and all-side multi-view imaging. *ZooKeys*, *759*(759), 1–27. https://doi.org/10.3897/ZOOKEYS.759.24584

Stylianidis, E. (2020). *Photogrammetric Survey for the Recording and Documentation of Historic Buildings* (Solari Giovanni, Chen Sheng-Hong, di Prisco Marco, & Vayas Ioannis, Eds.). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-47310-5

Suarez, A. V., & Tsutsui, N. D. (2004). The Value of Museum Collections for Research and Society. *BioScience*, *54*(1), 66–74. https://doi.org/10.1641/0006-3568(2004)054[0066:TVOMCF]2.0.CO;2

Tan, Y. K., Burke, A. C., & Thomas, E. (2022). Out of Their Shells: Digitisation of Endangered Diversity in Orphaned Collections Spurs Access and Discovery. *Curator: The Museum Journal*, *65*(2), 355–378. https://doi.org/10.1111/CURA.12464

Taylor, J., Beraldin, J. A., Godin, G., Cournoyer, L., Baribeau, R., Blais, F., Rioux, M., & Domey, J. (2003). NRC 3D imaging technology for museum and heritage applications. *The Journal of Visualization and Computer Animation*, *14*(3), 121–138. https://doi.org/10.1002/VIS.311

Torrado, A. R., Shemelya, C. M., English, J. D., Lin, Y., Wicker, R. B., & Roberson, D. A. (2015). Characterizing the effect of additives to ABS on the mechanical property anisotropy of specimens fabricated by material extrusion 3D printing. *Additive Manufacturing*, *6*, 16–29. https://doi.org/10.1016/J.ADDMA.2015.02.001

Torrado Perez, A. R., Roberson, D. A., & Wicker, R. B. (2014). Fracture surface analysis of 3D-printed tensile specimens of novel ABS-based materials. *Journal of Failure Analysis and Prevention*, *14*(3), 343–353. https://doi.org/10.1007/S11668-014-9803-9

Torres, J. C., López, L., Romo, C., Arroyo, G., Cano, P., Lamolda, F., & Villafranca, M. M. (2013). Using a Cultural Heritage Information System for the documentation of the restoration process. En A. C. Addison, L. De Luca, G. Guidi, & S. Pescarin (Eds.), *Digital Heritage International Congress (DigitalHeritage)* (vol. 2, pp.249–256). https://doi.org/10.1109/DIGITALHERITAGE.2013.6744761

Torresani, A., & Remondino, F. (2019). Videogrammetry vs photogrammetry for heritage 3D reconstruction. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, *XLII-2-W15*(2/W15), 1157–1162. https://doi.org/10.5194/ISPRS-ARCHIVES-XLII-2-W15-1157-2019

Tucci, G., & Bonora, V. (2007). Application of high resolution scanning systems for virtual moulds and replicas of sculptural works. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences,* 721-726. https://www.researchgate.net/publication/253055290

Tucci, G., Bonora, V., Conti, A., & Fiorini, L. (2015). Benchmarking Range-Based and Image-Based Techniques for Digitizing a Glazed Earthenware Frieze. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, *II-5-W3*(5W3), 315–322. https://doi.org/10.5194/ISPRSANNALS-II-5-W3-315-2015

Tucci, G., Bonora, V., Conti, A., & Fiorini, L. (2017). High-quality 3D models and their use in a cultural heritage conservation project. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, *XLII-2-W5*(2W5), 687–693. https://doi.org/10.5194/ISPRS-ARCHIVES-XLII-2-W5-687-2017

Una Norma Española (2012). *Fabricación por adición de capas en materiales plásticos. Fabricación aditiva. Preparación de probetas*. (UNE 116005:2012). https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0049159

Una Norma Española. Organización Internacional de Normalización (2014). Plásticos. Métodos de exposición a fuentes luminosas de laboratorio. Parte 2: Lámparas de arco de xenón. (ISO 4892-2:2014). https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0052425

Una Norma Española. Organización Internacional de Normalización (2020a). *Plásticos. Determinación de las propiedades en tracción. Parte 1: Principios generales* (ISO 527-1:2020). https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0064896

Una Norma Española. Organización Internacional de Normalización (2020b). *Plásticos. Determinación de las propiedades de flexión* (ISO 178:2020). https://tienda.aenor.com/norma-une-en-iso-178-2020-n0063218

UNESCO. (2015). *Carta sobre la Preservación del Patrimonio Digital*. https://es.unesco.org/themes/information-preservation/digital-heritage

UNESCO. (2021). *Directrices sobre selección del patrimonio digital para su conservación a largo plazo*. https://n9.cl/pzr1p

Valverde de Hamusco, J. (1556). *Historia de la composicion del cuerpo humano / escrita por Ioan Valuerde de Hamusco*. En Roma: impressa por Antonio de Salamanca y Antonio Lafrerij: en casa de Antonio Blado, 1556. https://digibug.ugr.es/handle/10481/28086

Van Damme, T., Auer, J., Ditta, M., Grabowski, M., & Couwenberg, M. (2020). The 3D annotated scans method: a new approach to ship timber recording. *Heritage Science*, *8*(1), 1–18. https://doi.org/10.1186/S40494-020-00417-9

Verhoeven, G., Doneus, M., Briese, C., & Vermeulen, F. (2012). Mapping by matching: a computer vision-based approach to fast and accurate georeferencing of archaeological aerial photographs. *Journal of Archaeological Science*, *39*(7), 2060–2070. https://doi.org/10.1016/J.JAS.2012.02.022

Visual Media Service. (10 de junio de 2021). http://visual.ariadne-infrastructure.eu/

Walthew, J., Barack, S., Quinn, A., & Hill, N. (2020). Sharing Conservation Imaging Research with the Public. *Journal of the American Institute for Conservation*, *59*(1), 18–26. https://doi.org/10.1080/01971360.2019.1690908

Wang, H. L., Wong, T. H., Chan, Y. M., Cheng, Y. S., & Wai Lau, D. T. (2022). Photogrammetric reconstruction of 3D carpological collection in high resolution for plants authentication and species discovery. *PLOS ONE*, *17*(8), e0270199. https://doi.org/10.1371/JOURNAL.PONE.0270199

Webb, E. K., Robson, S., & Evans, R. (2020). Quantifying depth of field and sharpness for image-based 3D reconstruction of heritage objects. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, *XLIII-B2-2020*(B2), 911–918. https://doi.org/10.5194/ISPRS-ARCHIVES-XLIII-B2-2020-911-2020

Webb, E. K., Robson, S., MacDonald, L., Garside, D., & Evans, R. (2018). Spectral and 3D cultural heritage documentation using a modified camera. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, *XLII–2*(2), 1183–1190. https://doi.org/10.5194/ISPRS-ARCHIVES-XLII-2-1183-2018

Were, G. (2010). Re-engaging the university museum: knowledge, collections and communities at University College London. *Museum Management and Curatorship*, *25*(3), 291–304. https://doi.org/10.1080/09647775.2010.498987

Westoby, M. J., Brasington, J., Glasser, N. F., Hambrey, M. J., & Reynolds, J. M. (2012). 'Structure-from-Motion' photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology*, *179*, 300–314. https://doi.org/10.1016/J.GEOMORPH.2012.08.021

Wijnhoven, M. A., & Moskvin, A. (2020). Digital replication and reconstruction of mail armour. *Journal of Cultural Heritage*, *45*, 221–233. https://doi.org/10.1016/J.CULHER.2020.04.010

Wilson, P. F., Stott, J., Warnett, J. M., Attridge, A., Smith, M. P., & Williams, M. A. (2018). Museum visitor preference for the physical properties of 3D printed replicas. *Journal of Cultural Heritage*, *32*, 176–185. https://doi.org/10.1016/J.CULHER.2018.02.002

Wu, B., Zhou, Y., Qian, Y., Gong, M., & Huang, H. (2018). Full 3D reconstruction of transparent objects. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, *37*(4), 1–11. https://doi.org/10.1145/3197517.3201286

Yeh, C. K., Matsuda, N., Huang, X., Li, F., Walton, M., & Cossairt, O. (2016). A streamlined photometric stereo framework for cultural heritage. En Hua, G., Jégou, H. (Eds.) *Computer Vision – ECCV 2016 Workshops. ECCV 2016. Lecture Notes in Computer Science* (Vol. 9913, pp. 738–752). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-46604-0_51

Yot, R. (2020). *Light for visual artists: understanding and using light in art & design*. (2ª ed.) Laurence King Publishing.

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

Zhou, L. Y., Fu, J., & He, Y. (2020). A Review of 3D Printing Technologies for Soft Polymer Materials. *Advanced Functional Materials*, *30*(28), 2000187. https://doi.org/10.1002/ADFM.202000187

Ziegler, M. J., Perez, V. J., Pirlo, J., Narducci, R. E., Moran, S. M., Selba, M. C., Hastings, A. K., Vargas-Vergara, C., Antonenko, P. D., & MacFadden, B. J. (2020). Applications of 3D Paleontological Data at the Florida Museum of Natural History. *Frontiers in Earth Science*, *8*, 570. https://doi.org/10.3389/FEART.2020.600696

Zohdi, N., & Yang, (Chunhui) Richard. (2021). Material Anisotropy in Additively Manufactured Polymers and Polymer Composites: A Review. *Polymers*, *13*(19), 3368. https://doi.org/10.3390/POLYM13193368

Zwier, M. P., & Wits, W. W. (2016). Design for Additive Manufacturing: Automated Build Orientation Selection and Optimization. *Procedia CIRP*, *55*, 128–133. https://doi.org/10.1016/J.PROCIR.2016.08.040