



**Universidad**  
Zaragoza

## Trabajo Fin de Máster

HOMOLOGACION DE MEDIDAS DE INTERES  
ANTROPOLOGICO SOBRE CRANEO SECO  
MEDIANTE FOTOGAMETRIA Y TECNICAS DE  
ESCANER 3D PARA SU COMPARACION CON  
SISTEMAS DE MEDICION MANUAL

Autor

Marta Bailo Barrena

Director/es

José Javier Marín Zurdo

Salvador Manuel Baena Pinilla

Escuela de Ingeniería y Arquitectura

2014

<b>RESUMEN</b>	<b>4</b>
<b>1. OBJETO DEL PROYECTO</b>	<b>5</b>
<b>2. ALCANCE</b>	<b>7</b>
<b>3. ANTECEDENTES Y ANÁLISIS DE NECESIDAD</b>	<b>8</b>
<b>4. ESTADO DE LA TÉCNICA</b>	<b>10</b>
4.1.1. Aplicación de tecnología de reconstrucción 3D sobre piezas de interés antropológico y/o forense	10
4.1.2. Utilización de sistemas generadores de modelos 3D para la documentación y reconstrucción de elementos y eventos de interés forense	10
4.1.3. Establecimiento de nuevas metodologías en la determinación del sexo	11
4.1.4. Estudios para la estimación de la edad osteológica	11
4.1.5. Aplicación de la morfometría geométrica en el estudio de patrones con interés antropológico	12
4.1.6. Implementación de técnicas de imagen 2D y 3D para el establecimiento de patrones individualizadores a efectos de identificación	12
4.1.7. Sistemas de captura y modelado 3D para su aplicación ante estudios antropométricos	12
4.1.8. Sistemas de referencia y orientación craneal	13
<b>5. INSTRUMENTACION</b>	<b>15</b>
<b>5.1. Instrumentación para medición manual</b>	<b>15</b>
5.1.1. Calibre o pie de rey	15
5.1.2. Compás de espesor:	15
<b>5.2. Escáner 3D de superficie basado en luz estructurada</b>	<b>16</b>
5.2.1. Funcionamiento	16
5.2.2. Artec™ Eva 3D	16
<b>5.3. Fotogrametría</b>	<b>16</b>
5.3.1. Funcionamiento	16
5.3.2. Escáner 3D basado en fotografía	17
5.3.3. Photomodeler	17
<b>6. MUESTRA</b>	<b>18</b>
<b>7. PROCEDIMIENTOS Y RESULTADOS</b>	<b>19</b>
<b>7.1. Medición manual</b>	<b>19</b>
7.1.1. Descripción de <i>landmarks</i> y medidas	19
7.1.2. Mediciones	21
<b>7.2. Fotogrametría convencional</b>	<b>21</b>
7.2.1. Elaboración de modelos 3D	21
7.2.1.1. Toma de fotografías	21
7.2.1.2. Procesado de imágenes y digitalización de <i>landmarks</i>	22
7.2.2. Medición	25
7.2.2.1. Descripción de medidas	25

7.2.2.2.	Mediciones	26
<b>7.3.</b>	<b>Escáner de superficie 3D</b>	<b>27</b>
7.3.1.	Elaboración de modelos 3D	27
7.3.1.1.	Protocolo de escaneado	27
7.3.1.2.	Reconstrucción de escáneres	27
7.3.2.	Protocolo de orientación de modelos craneales tridimensionales en base a planos anatómicos estandarizados	27
7.3.3.	Validación del sistema	32
7.3.3.1.	Observadores	32
7.3.3.2.	Análisis de datos	32
7.3.3.3.	Resultados	35
7.3.4.	Medición	37
7.3.4.1.	Descripción de landmarks y medidas	37
7.3.4.2.	Mediciones	39
<b>7.4.</b>	<b>Escáner 3D basado en fotografía</b>	<b>39</b>
7.4.1.	Elaboración de modelos 3D	39
7.4.1.1.	Protocolo para la toma de fotografías	39
7.4.1.2.	Reconstrucción de escáneres a partir de fotografías	40
7.4.1.3.	Unión de mallas	43
7.4.2.	Mediciones	45
<b>8.</b>	<b>DISCUSIÓN</b>	<b>46</b>
<b>9.</b>	<b>CONCLUSIONES</b>	<b>49</b>
<b>10.</b>	<b>REFERENCIAS</b>	<b>50</b>

## RESUMEN

El presente proyecto plantea la aplicación de diversas tecnologías de elaboración de modelos virtuales tridimensionales en la creación de modelos craneales así como el uso de los mismos, gracias a la utilización de software de modelado 3D, para el establecimiento de medidas craneométricas homologables a las realizadas utilizando sistemas de medición manual. Adicionalmente, también se establece como objetivo el diseño de un protocolo de orientación de los modelos obtenidos en base a planos anatómicos estandarizados, más en concreto en relación con el denominado *Plano de Frankfurt*, así como su validación y análisis del grado de reproducibilidad intra/interobservador ante la aplicación del mismo.

Este proyecto surge motivado de la necesidad detectada dentro del ámbito antropológico forense, a tenor de una revisión bibliográfica realizada al efecto, del establecimiento y estandarización de nuevas metodologías de trabajo más objetivas, reproducibles y basadas en la implementación de tecnologías más avanzadas que las tradicionalmente utilizadas hasta la fecha, dependientes en gran medida de la pericia y habilidad del operador en cuando a su conocimiento y manejo.

En estos términos, se plantea pues la aplicación de tres tecnologías diferentes de creación de modelos virtuales tridimensionales como son la fotogrametría convencional, el escáner de superficie 3D de luz estructurada y el escáner 3D basado en fotografía.

El trabajo recoge una primera descripción introductoria referente al funcionamiento básico de las técnicas a utilizar así como del correspondiente software comercial de aplicación en el estudio. Se describe también la muestra utilizada prestando especial atención en su composición así como la descripción de aquellas tareas de adecuación y tratamiento previas a su utilización que es necesario realizar.

Para cada una de las técnicas implementadas, una exposición en detalle del procedimiento llevado a cabo de cara a obtener los correspondientes modelos craneales también es referida, así como de los puntos craneométricos y medidas a registrar, cuya descripción y protocolo de obtención se acompañan en cada caso del conjunto de resultados obtenidos.

En el caso concreto del escáner de superficie 3D se abordará asimismo la descripción del protocolo de orientación relativo al plano anatómico estandarizado establecido, junto con los resultados proporcionados por el análisis estadístico de los datos obtenidos de la aplicación de dicho protocolo.

Para concluir se recoge una discusión del conjunto de resultados, tanto relativos al establecimiento de *landmarks* y medidas craneométricas, como relativo al diseño y validación del procedimiento de orientación de los modelos tridimensionales.

## 1. OBJETO DEL PROYECTO

El objeto del presente proyecto es la aplicación de la fotogrametría y técnicas de escaneado 3D para la toma de medidas de interés antropométrico sobre modelos craneales tridimensionales para su homologación con respecto a los tradicionales sistemas de medición manual.

La puesta en marcha de este trabajo surge de la necesidad detectada dentro del ámbito antropológico forense, como bien se refleja en la revisión bibliográfica realizada al efecto, del establecimiento y estandarización de nuevas metodologías de trabajo más objetivas, reproducibles y basadas en la implementación de tecnologías más avanzadas que las tradicionalmente utilizadas hasta la fecha, dependientes en gran medida de la pericia y habilidad del operador en cuando a su conocimiento y manejo.

Así pues, en el presente trabajo se aborda la elaboración de una serie de modelos craneales tridimensionales haciendo uso para ello de tres tecnologías diferentes como son el escaneado 3D de superficie, la fotogrametría convencional y la generación de escáneres 3D a partir de fotografía. Elaborados los modelos, se procederá sobre los mismos a la toma de una serie de medidas craneométricas concretas mediante software de modelado 3D o el propio software de fotogrametría según corresponda, para su posterior comparativa con respecto a las mismas mediciones tomadas de manera manual sobre los cráneos físicos.

Si bien el objeto inicial del proyecto concluía con la cobertura de las tareas citadas, en el transcurso del trabajo fue detectada una necesidad de orientación espacial de los modelos tridimensionales elaborados, planteándose con ello un objetivo adicional, al cual también se ha tratado de dar respuesta mediante este estudio.

Este nuevo objetivo responde a la necesidad de establecer un procedimiento capaz de asegurar una correcta y reproducible orientación de todos aquellos modelos craneales generados y de asegurar el correcto establecimiento de los *landmarks* característicos y necesarios para la toma de medidas.

Se plantea también pues como parte del proyecto la elaboración de un procedimiento de orientación basado en el uso de software de modelado 3D, capaz de proporcionar una orientación de los modelos craneales tridimensionales en base a referencias anatómicas estandarizadas. Con tal fin, y dada la amplia aceptación que entre la comunidad médica internacional tiene el conocido como *Plano de Frankfurt* (plano definido por el punto Orbital izquierdo y los dos puntos Porion)<sup>1</sup> como sistema de referencia craneal de posicionamiento anatómico para el cráneo humano, este mismo plano fue seleccionado también como referencia para la reorientación de los modelos virtuales.

Además de la consecución de una orientación en el espacio de los modelos craneales en base al citado Plano de Frankfurt, se plantearon también como requerimientos a cumplir por el procedimiento a desarrollar el ser de una sencillez tal que lo hiciesen capaz de ser aplicado por personas con diferente grado de conocimiento médico-antropológico, logrando resultados semejantes independiente del perfil del observador, el estar dotado de una alta

reproducibilidad a nivel tanto intra como interpersonal, y tener la capacidad de ser informáticamente automatizable llegado el caso.

Desarrollado este protocolo de orientación se establece como último objetivo su validación, llevando a cabo para ello un estudio estadístico de su variabilidad intra/interpersonal destinado a establecer el grado de precisión en relación a la obtención de posicionamientos craneales anatómicamente estandarizados con respecto a los conseguidos mediante la convencional orientación manual, así como a establecer la dependencia, o no, del mismo con respecto al grado de experiencia del operador en el ámbito médico-forense.

Según lo expuestos los objetivos del presente proyecto se pueden sintetizar en los siguientes:

- Homologación del uso de la fotogrametría y técnicas de escaneo 3D como herramientas de uso para el establecimiento de medidas craneométricas.
- Elaboración de un procedimiento para la orientación de modelos craneales tridimensionales en base a referencias anatómicas estandarizadas (Plano de Frankfurt).
- Validación y estudio del grado de variabilidad intra/interpersonal ante la implementación del citado procedimiento de orientación.

## 2. ALCANCE

Para llevar a cabo los objetivos expuestos se aplicaron tres tecnologías de creación de modelos virtuales tridimensionales diferentes: fotogrametría convencional, escáner de superficie 3D y creación de escáneres 3D a partir de fotografía.

En cada una de las tecnologías aplicadas se han establecidos los procedimientos concretos para obtener un modelo digital que permitiese su tratamiento por medio de un software de modelado 3D convencional hasta lograr la caracterización de las medidas craneométricas del modelo a estudio.

En concreto las tareas que se han abordado para el desarrollo de este proyecto se describen a continuación.

Se ha realizado una revisión del estado del arte a efectos de obtener un mayor conocimiento del estado de la técnica así como de las principales líneas de investigación y metodologías de trabajo en el ámbito antropológico forense en la actualidad, claves tanto para el planteamiento de los objetivos a cubrir como de cara a idear la manera de abordarlos.

En lo relativo a la instrumentación, se han estudiado los medios de uso común a día de hoy en la realización de estudios craneométricos, así como el funcionamiento de las nuevas tecnologías para la elaboración de modelos 3D a aplicar en el presente trabajo. Asimismo, se han analizado los sistemas comerciales que utilizan las distintas tecnologías de aplicación planteadas en este campo.

Con respecto a la muestra, aquellas labores de pre-tratamiento de la misma a efectos de su adecuación de cara a la posterior elaboración de los correspondientes modelos craneales virtuales fueron llevadas a cabo.

Se ha desarrollado también, haciendo uso para ello de software de modelado 3D, el planteamiento de un procedimiento para la orientación de modelos craneales tridimensionales en base a planos anatómicos estandarizados, más concretamente con respecto al conocido como Plano de Frankfurt, por ser este un plano de referencia craneal internacionalmente reconocido y validado..

Diseñado tal procedimiento y establecido su protocolo de aplicación, se ha procedido a la validación y estudio de su variabilidad y grado de precisión a nivel tanto intra como inter-observador mediante estudio estadístico de los datos obtenidos tras su aplicación sobre los cuatro modelos craneales a estudio, por tres observadores diferentes con diferente grado de experiencia en el ámbito antropológico-forense.

A continuación se incluye los antecedentes y necesidades que motivaron la realización de este trabajo.

### 3. ANTECEDENTES Y ANÁLISIS DE NECESIDAD

Tradicionalmente, el estudio morfológico de restos óseos, así como de sus índices métricos y puntos característicos, ha sido un tema de interés a nivel tanto médico-forense como de otras disciplinas como la arqueología o la antropología física. Tales estudios han permitido obtener información acerca de la variabilidad existente en el ser humano y establecer patrones de dimorfismo sexual, edad u otros caracteres individualizadores como son la talla o afiliación étnica<sup>2-5</sup>.

Entre los instrumentos convencionalmente utilizados en el estudio de la biometría se encuentran calibres, compases de espesor, cranióforos o tablas osteométricas<sup>6</sup>, sistemas que si bien dan buenos resultados, no dejan de estar sujetos a sus propias tolerancias de medida y a la experiencia y habilidad del operador en cuanto a su uso, así como a la propia orientación espacial otorgada al espécimen objeto de estudio durante el análisis.

Por su parte, los métodos de análisis estandarizados y comúnmente aceptados a fin de establecer la etnia, edad o sexo de un individuo se basan en mediciones manuales y análisis morfológicos de los caracteres diferenciadores para cada región esquelética en base a un sistema de gradación numérica preestablecido; metodologías que, si bien ha demostrado una elevada eficiencia y eficacia, no carecen de subjetividad por parte del analista.

A la vista de la gran carga subjetiva a la que están sometidos los métodos clásicos de determinación en antropología física, se nos plantea pues como necesario el establecimiento y estandarización de nuevas metodologías de trabajo basadas en unos criterios más objetivos que la simple apreciación personal por parte del analista, máxime si se tiene en cuenta el uso que de la antropología física se hace asociada al contexto forense con fines identificativos, ámbito en el cual la objetividad en el análisis y así como el aseguramiento de la reproducibilidad de las pruebas a lo largo del proceso judicial son dos requisitos a demanda.

Una búsqueda bibliográfica al respecto confirmó dicho planteamiento al reflejar un cada vez mayor interés por parte de la comunidad científica dentro del ámbito de las ciencias forenses por el desarrollo de nuevos métodos destinados a la determinación del perfil biológico de un sujeto dotados de una mayor cuantitatividad y objetividad, valiéndose para ello de tecnologías de captura de imagen y análisis de datos ampliamente implementadas en otros sectores de la ciencia pero poco explotados hasta la fecha en el contexto antropológico forense<sup>4,6-28</sup>.

El presente proyecto surge pues en el marco de esta tendencia y plantea el estudio de la toma de medidas de interés antropológico sobre modelos digitalizados de restos óseos craneales obtenidos mediante tecnologías de captura de imagen y medición en 3D como son los escáneres de superficie 3D y la fotogrametría.

Inevitablemente, una nueva necesidad se plantea durante el trabajo con tales fines con los modelos digitalizados, pues la carencia por parte de los mismos una vez generados de una orientación espacial inicial dificulta el correcto establecimiento de los *landmarks* delimitadores de las distancias a calcular. Se hace pues necesario un protocolo capaz de asegurar la



semejante orientación de los modelos a evaluar capaz de asegurar una comparación entre regiones homólogas.

Una búsqueda en la literatura actual, especialmente centrada en el desarrollo y aplicación de metodologías sistemáticas y/o automatizadas para la orientación de modelos craneales tridimensionales en base a planos anatómicos estandarizados, revela la existencia de pocas referencias bibliográficas al efecto<sup>29-31</sup> motivo por el cual y pese a no ser uno de los objetivos inicialmente planteados en el proyecto, en el presente trabajo se aborda también el desarrollo y validación de un procedimiento para la orientación sistemática de modelos craneales digitalizados basado en el uso de software de modelado 3D.

## 4. ESTADO DE LA TÉCNICA

### 4.1.1. Aplicación de tecnología de reconstrucción 3D sobre piezas de interés antropológico y/o forense

El desarrollo experimentado en los últimos años por las tecnologías de reconstrucción en 3D como son los escáneres tridimensionales de superficie o la fotogrametría 3D, plantean cada vez más el uso de las mismas como instrumento a introducir entre el material habitual de uso en el ámbito tanto antropológico como forense a la vista de la gran necesidad dentro de estos círculos por conseguir capturar y reconstruir piezas de interés de manera sencilla y fácilmente manejable.

Un importante hándicap en la organización y gestión de laboratorios de antropología, museos etc. es el aprovechamiento del espacio disponible en virtud de la gran cantidad necesaria para el acomodo de diversas piezas y colecciones. La implementación de estas tecnologías, altamente portables, de coste cada vez más accesible y dotadas de un alto grado de precisión y reproducibilidad a nivel tanto intra como interpersonal en la elaboración de modelos, se plantea pues como una posibilidad muy atractiva a futuro capaz incluso no sólo de facilitar el estudio y almacenaje de las mismas, sino también de favorecer la colaboración incluso entre puntos muy alejados del planeta de ámbitos tan dispares como el judicial, educativo o museístico entre otros, lo cual a día de hoy alberga dificultades por lo complicado del transporte, posible fragmentación de piezas durante su traslado o manipulación... problemas que encontrarían solución al poder ser enviados directamente los ficheros con las piezas reconstruidas para su operación sobre los mismos<sup>32-34</sup>.

Con fines antropológicos, la capacidad de este tipo de escáneres de proporcionar representaciones altamente realistas plantea un gran número de utilidades a futuro a parte de las ya mencionadas que podrían cubrir desde la localización inequívoca de *landmarks* o la realización de mediciones osteométricas aquejadas de menores tasas de error, hasta la búsqueda de nuevas metodologías de trabajo o actualización de las ya existentes<sup>27,28</sup>.

### 4.1.2. Utilización de sistemas generadores de modelos 3D para la documentación y reconstrucción de elementos y eventos de interés forense

La correcta documentación de las evidencias acumuladas a lo largo de todo el proceso de investigación es vital dentro del ámbito forense. En los últimos años, métodos de captura no invasiva como son el escáner de superficie 3D, la Tomografía Axial Computarizada o la imagen radiológica, han ganado importancia en este aspecto dada su gran capacidad para proporcionar modelos digitales de elevada precisión y fácilmente exportables y compartibles lo que facilita tanto su almacenamiento y posterior análisis como su remisión a otros profesionales en caso necesario, o incluso la reproducción de los mismos mediante el uso de impresoras 3D en caso de que así se desee.

Ejemplos de la implementación de estos sistemas de captura de imagen en la reconstrucción de eventos de interés forense son por ejemplo la utilización del TAC para la reconstrucción y reproducción tridimensional de la morfología externa de armas punzantes a partir de

impresiones dejadas por las mismas sobre órganos y huesos<sup>35</sup> o el uso de técnicas como la fotogrametría<sup>36</sup> o los sistemas de escaneado de superficie en 3D en la documentación de lesiones<sup>37-39</sup>.

Asimismo, y derivando del creciente uso que de estas tecnologías de elaboración de modelos digitales 3D se está haciendo dentro del ámbito judicial, nuevas líneas de investigación comienzan a surgir encaminadas a la comparación entre protocolos y tecnologías diferentes con respecto a su nivel de precisión y reproducibilidad a efectos de asegurar el correcto uso de las mismas como herramientas de probado valor judicial<sup>38,40</sup>.

#### **4.1.3. Establecimiento de nuevas metodologías en la determinación del sexo**

La determinación del sexo en restos óseos es una de las finalidades básicas del informe antropológico forense y clave de cara a la identificación del sujeto. La variabilidad entre hombres y mujeres es apreciable en un gran número de los componentes del sistema esquelético, si bien es cierto que ciertos huesos tales como son el cráneo, coxales y huesos largos presentan un mayor dimorfismo sexual.

Tradicionalmente la estimación del sexo sobre restos óseos se ha realizado mediante análisis y clasificación en base a un sistema de gradación numérica de patrones característicos establecidos (Anexo I), si bien actualmente nuevas metodologías capaces de proporcionar determinaciones más fiables y objetivas están siendo desarrolladas y numerosas son las referencias bibliográficas que pueden encontrarse en la literatura al efecto. Por resumir, de entre todos los encontrados se destacan aquí aquellos estudios encaminados a hacer una estimación del género en base al estudio de nuevos patrones dimórficos sobre piezas óseas tridimensionales de diferente naturaleza obtenidas a partir de TAC o escaneado de superficie en 3D<sup>4,24-26</sup> así como las basadas en comparativas morfogeométricas de fotografías 2D convencionales<sup>22,23</sup> o mediante la toma de mediciones a través de fotogrametría<sup>21</sup>.

#### **4.1.4. Estudios para la estimación de la edad osteológica**

Si bien la estimación de la edad en el sujeto es un punto de máximo interés durante el estudio médico-legal y antropológico de un cuerpo, vivo o no, a efectos de establecer su identidad; dicha determinación es la mayor parte de las veces problemática dada la elevada variabilidad biológica de aquellas regiones indicadoras, así como a la diferente respuesta del sistema óseo a lo largo de la vida de un individuo (Anexo II).

La realización de estudios enfocados al establecimiento de nuevas metodologías más objetivas y capaces de aportar información de mayor precisión en cuanto a la edad de un sujeto, se muestra como una de las principales líneas de investigación actualmente en el campo de la antropología. Destacan en este aspecto los trabajos centrados en la elaboración de modelos tridimensionales de regiones anatómicas tradicionalmente estudiadas por su gran interés en cuanto a estimación de la edad como puede ser la sínfisis púbica para determinación de la edad en sujetos vivos<sup>19,20</sup>, o la explotación de tecnologías de uso común en medicina convencional como puede ser la radiografía o el TAC para el estudio de regiones anatómicas diversas con el fin de establecer patrones discriminantes de la edad de un sujeto<sup>17,18</sup>.

#### **4.1.5. Aplicación de la morfometría geométrica en el estudio de patrones con interés antropológico**

Una búsqueda en la bibliografía relacionada con la utilización de tecnologías de elaboración de modelos 3D, especialmente centrada en el ámbito de la antropología y en concreto en el uso de los mismos para dar respuesta a dos de las preguntas de mayor relevancia durante la elaboración del informe antropológico forense como son la determinación del sexo y la edad, puso de manifiesto el especial interés mostrado por gran número de investigadores por la aplicación de la morfometría geométrica<sup>14-16</sup>.

A la vista del gran número de resultados observados, y a tenor de la previsible relevancia que esta metodología de trabajo puede llegar a adquirir en un futuro, se decidió abordarlo como un campo de investigación propio descentralizado en sí de los estudios de determinación de edad y sexo anteriormente citados.

La morfometría geométrica trata de establecer patrones relativos a la forma de regiones concretas sobre imágenes digitalizadas, bien en 2D o 3D, para una comparación de los mismos gracias a la cual establecer dimorfismo o edad de un sujeto en el momento de su muerte.

#### **4.1.6. Implementación de técnicas de imagen 2D y 3D para el establecimiento de patrones individualizadores a efectos de identificación**

En la investigación antropológica forense el perfil biológico del sujeto es establecido a través del estudio de sexo, edad, ancestría y estatura. Ciertamente es que un gran número de veces a tenor de estos resultados, múltiples individuos pueden compartir un mismo perfil por lo que hará que sea la observación de detalles concretos lo que en muchas ocasiones proporcione información más específica capaz de contribuir con la identificación del sujeto.

Gran número de estudios recientes en el campo de la antropología física y forense se centran en la aplicación de nuevas estrategias en análisis de imagen, tanto en 2D como en 3D, especialmente centradas en la realización de comparativas morfogeométricas<sup>13</sup> o la superposición de contornos<sup>41</sup>, o encaminadas hacia la identificación y comparativa antepostmortem de patrones individualizadores capaces de arrojar luz acerca de la identidad de un sujeto<sup>11,12</sup>.

#### **4.1.7. Sistemas de captura y modelado 3D para su aplicación ante estudios antropométricos**

Son numerosas las investigaciones que abordan el tema del establecimiento de sistemas de medida antropométricos para su aplicación sobre modelos óseos tridimensionales generados a través de diferentes sistemas de captura de imagen en 3D como son el TAC, los escáneres de superficie o la fotogrametría 3D<sup>10</sup>. Estos sistemas, se plantean como una alternativa viable a futuro mucho más precisa y carente de subjetividad en la medición en comparación con los convencionales sistemas de medida utilizados en el ámbito de la antropometría<sup>6</sup>.

Junto con el establecimiento de estas nuevas metodologías, estudios más recientes muestran además una tendencia a la realización de análisis intra/interobservador a fin de evaluar la

precisión y reproducibilidad de las metodologías planteadas ante su aplicación con carácter repetitivo tanto por un mismo sujeto como por diferentes analistas<sup>7-9</sup>; bien es cierto que pocos son los estudios en los que se reportan validaciones fiables al respecto pues dichas comparativas han sido hasta la fecha por lo general realizadas sobre muestras muy reducidas razón por la cual, trabajos relacionados con este campo se vislumbran como interesantes a tener en cuenta para el futuro.

#### 4.1.8. Sistemas de referencia y orientación craneal

Cualquier trabajo sobre restos ya sea con fines comparativos, de medición, posicionamiento de *landmarks* etc pasa por el establecimiento de una sistemática en la orientación espacial de los mismos capaz de asegurar una homología en el procesado entre piezas diferentes.

Una búsqueda centrada de manera concreta en el cráneo por ser la pieza ósea de interés en este trabajo, mostró la existencia de diversos planos anatómicos estandarizados ampliamente utilizados como sistema de referencia en medicina y otras ciencias afines con el objetivo de conseguir un posicionamiento de la pieza lo más semejante posible a su orientación natural. A continuación se recogen algunos de estos planos de referencia<sup>42,43</sup>.

- Plano de Frankfurt (Plano auriculo-orbital): Plano cefalométrico establecido por el punto Infraorbitario izquierdo (punto más bajo del reborde inferior de la órbita) y ambos puntos el Porion (puntos más altos de los conductos auditivos externos). Por convenio se considera como posición anatómica de un cráneo como aquella en la que el citado plano se orienta en paralelo con respecto al suelo.
- Plano de Camper: plano cefalométrico establecido por la punta de la espina nasal anterior (Acantion) y los centros de ambos meatos auditivos externos.
- Plano horizontal de Broca (Plano alveolo – condíleo): plano cefalométrico establecido por el Prosthion (punto craneométrico situado en el centro del maxilar, justo por encima de los incisivos centrales) y los puntos más inferiores del cóndilo occipital.

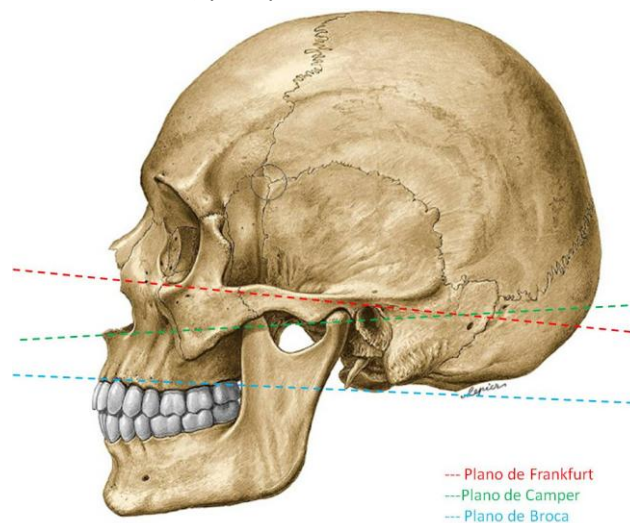


Figura 1. Planos craneales anatómicos de de referencia.

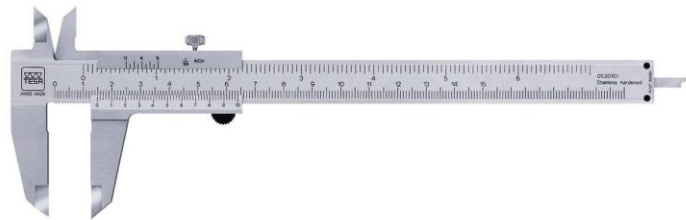
Paradójicamente, una búsqueda en la literatura actual, especialmente centrada en el desarrollo y aplicación de metodologías sistemáticas y/o automatizadas para la orientación de modelos craneales tridimensionales en base a estos planos anatómicos estandarizados, reveló la existencia de pocas referencias bibliográficas al efecto<sup>RW.ERROR - Unable to find reference:141</sup>.

## 5. INSTRUMENTACION

### 5.1. Instrumentación para medición manual

#### 5.1.1. Calibre o pie de rey

Instrumento de medida compuesto por una regla milimetrada con una escuadra fija en una de sus extremos y un brazo móvil paralelo a la misma en el otro capaz de ser desplazado a lo largo de la regla. Mediante apoyo de los extremos agudos de la pieza fija y móvil sobre el objeto sabremos su medida por lectura directa sobre la regla. En nuestro caso el calibre utilizado para la toma de mediciones permitía apreciar longitudes con una precisión de centésimas de mm.



*Figura 2 Calibre o pie de rey*

#### 5.1.2. Compás de espesor:

Instrumento de medida compuesto por dos ramas metálicas en forma de hoz articuladas entre ellas por uno de sus extremos. Los extremos libres pueden ser romos en el caso de ser utilizadas para mediciones sobre sujetos vivos, o agudos en el caso de tratarse de compases destinados a la medición sobre restos óseos. Está dotado además de una escala milimétrica gracias a la cual, mediante deslizamiento de un tornillo de fijación, se podrá conocer con precisión de décimas de mm la medida evaluada.



*Figura 3 Compás de espesor*

## 5.2. Escáner 3D de superficie basado en luz estructurada

### 5.2.1. Funcionamiento

La tecnología de escaneo de superficie 3D mediante luz estructurada se engloba dentro de las tecnologías de escaneo sin contacto y basa su funcionamiento en la emisión de patrones de luz sobre la superficie el objeto a escanear para posteriormente, y gracias al registro de la luz captada de vuelta por el sistema de adquisición del instrumento, analizar la deformación de dicho haz causada por la geometría de la pieza. Obtenida la información por parte del escáner, la posición de cada punto en el espacio tridimensional será calculada a través de diferentes algoritmos consiguiéndose de este modo la total reproducción de la geometría del objeto.

### 5.2.2. Artec™ Eva 3D

En el presente proyecto para la obtención de los modelos virtuales tridimensionales de los cráneos a estudio se optó por la utilización del escáner portátil Artec™ Eva 3D<sup>45</sup>; un escáner portátil basado en tecnología de luz estructurada con una resolución 3D de hasta 0.5 mm y velocidad de captura de 16 fotogramas por segundo el cual, gracias a la alineación automática y en tiempo real de las mallas capturadas y la integración en el dispositivo de una cámara fotográfica de 1.3 mp, permitió la digitalización y texturización en alta definición de la superficie de las piezas a estudio.



Figura 4 Escáner 3D de superficie Artec™ Eva 3D

## 5.3. Fotogrametría

### 5.3.1. Funcionamiento

La fotogrametría es una técnica capaz de, a partir de imágenes captadas mediante el uso de cámaras fotográficas convencionales, determinar la situación espacial y propiedades geométricas de un determinado objeto.

Durante la toma de cada imagen, la luz emitida por la cámara llega al objeto donde ésta se ve reflejada para ser de nuevo capturada por el sensor de la misma. Mediante el uso de múltiples fotografías, la posición de cada punto concreto en el espacio puede llegar a ser calculado geoméricamente siempre y cuando se conozcan los parámetros de la cámara utilizada (focal,



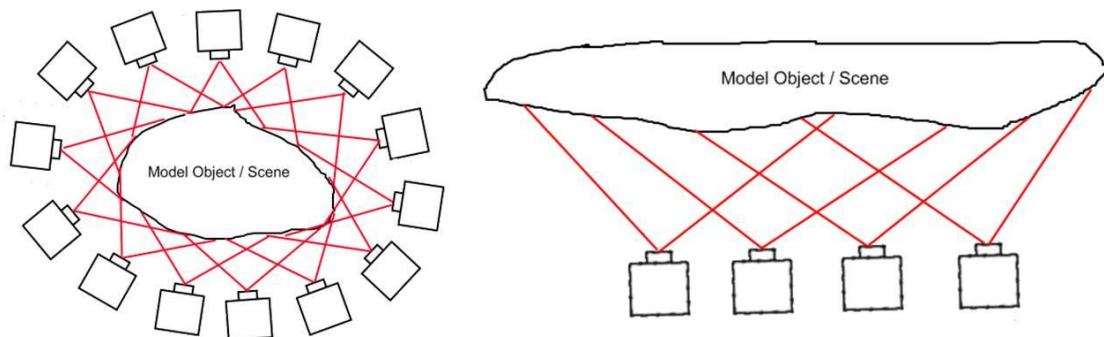
distorsión de la lente etc.), las posiciones relativas y ángulos de la misma durante la toma de fotografías y el lugar donde cada punto a reconstruir se refleja en cada foto.

Establecidos los puntos coincidentes entre las diferentes fotografías recogidas y mediante algoritmos matemáticos característicos del software en uso, se llevará a cabo un cálculo encaminado a determinar el mejor ajuste entre las posiciones y ángulos de las cámaras con respecto al objeto en la realidad. Establecida esta correlación y gracias a la inclusión dentro del proyecto de fotogrametría de una escala de referencia de longitud conocida, podrá llevarse a cabo la toma de medidas sobre el objeto en unidades reales o la reconstrucción de su superficie mediante creación de su correspondiente nube de puntos<sup>46</sup>.

### 5.3.2. Escáner 3D basado en fotografía

Photomodeler Scanner es una herramienta propia del software Photomodeler capaz de crear modelos 3D de alta precisión y calidad a partir de fotografías altamente similares a los obtenidos mediante tecnologías de escaneado de superficie convencionales.

El sistema es capaz de generar nubes de puntos densas a partir de fotografía convencional de superficies con textura, siendo prácticamente los únicos requisitos para ello un control de la variación de luz durante la toma de fotografías a efectos de evitar errores en la identificación de las texturas y una adquisición con el suficiente grado de solapamiento entre imágenes adyacentes capaz de alcanzar una suficiente localización de puntos coincidentes entre imágenes que asegure la posterior reconstrucción del modelo.



*Figura 5 Propuestas de colocación de las cámaras en la toma de fotografías por la reconstrucción de escáneres 3D a fin de asegurar un buen solapamiento entre imágenes*

### 5.3.3. Photomodeler

En este proyecto, tanto la aplicación de fotogrametría convencional para la toma de medidas de interés antropométrico como la elaboración de modelos craneales tridimensionales mediante establecimiento de la malla correspondiente a su superficie, fueron llevadas a cabo mediante Photomodeler, software para fotogrametría de reconocido prestigio internacional.

Las imágenes necesarias para ambos trabajos fueron tomadas mediante el uso de una cámara fotográfica modelo Canon EOS 60D<sup>47</sup>.

## 6. MUESTRA

Para la realización de este trabajo, una muestra de 4 cráneos fueron seleccionados de entre las 130 piezas de sexo y edad indubitados que constituyen, a día de hoy, la Colección Antropológica del Instituto de Medicina Legal de Aragón.

A fin de cubrir en la medida de lo posible el espectro de variabilidad humana, se seleccionaron como piezas a estudio 2 cráneos de sexo femenino y 2 de sexo masculino con edades de 83, 25, 37 y 69 años respectivamente.

Los cráneos seleccionados fueron escogidos atendiendo a su buen estado de conservación y ausencia de fragmentación o pérdida de elementos (a excepción de la pérdida de piezas dentales con carácter postmortem).

Como único tratamiento, los cráneos seleccionados fueron sometidos a un proceso de limpieza y esqueletización mediante sumersión en disoluciones de agentes oxidantes a baja concentración con el fin de limpiar y eliminar cualquier resto de materia orgánica adherida a los mismos.



*Figura 6 Cráneo constituyente de la muestra a estudio antes y después de ser sometido al proceso de esqueletización.*

Las tareas encaminadas a la recogida de muestra así como a la adecuación y tratamiento de la misma para su estudio, constituyen el periodo de prácticas en organizaciones externas a la propia Universidad requeridas como parte del periodo práctico-formativo del presente Máster. Una descripción más detallada de las operaciones llevadas a cabo durante el citado periodo de prácticas externas se recoge en el Anexo XX de esta memoria (Anexo VIII).

## 7. PROCEDIMIENTOS Y RESULTADOS

### 7.1. Medición manual

Para cada uno de los cráneos analizados un total de nueve medidas fueron determinadas por triplicado gracias al uso del calibre y compás de espesor.

En las siguientes secciones se recogen las descripciones correspondientes a las medidas a realizar y puntos craneométricos (*landmarks*) definidores de las mismas, así como los valores promedio y desviaciones estándar finalmente obtenidos tras la medición sobre los cráneos físicos.

#### 7.1.1. Descripción de *landmarks* y medidas

Landmark	Norma	Par/impar	Descripción
Nasion (n)	Frontal	Impar	Intersección de la sutura frontonasal con el plano medio sagital
Supraorbital (so)	Frontal	Par	Punto más superior de la órbita en plano frontal.
Ectoconchion (ec)	Frontal	Par	Punto más anterior del borde lateral de la órbita, donde un eje trazado desde el maxilofrontal paralelo al borde superior de la órbita la divide en dos mitades iguales.
Dacryon (d)	Frontal	Par	Punto en el borde medial de la órbita donde se ubica la intersección del frontal, maxilar y lacrimal.
Orbital (or)	Frontal	Par	Punto más inferior de la órbita en plano frontal. Se utiliza este punto para la orientación del cráneo en el plano de Frankfurt.
Rinion (rh)	Frontal	Impar	Punto distal de la sutura internasal.
Nasospinale (ns)	Frontal	Impar	Punto de intersección del plano medio sagital con la línea que une los bordes inferiores de la apertura piriforme.
Prosthion (pr)	Frontal	Impar	Punto más anterior y pronunciado del borde alveolar del maxilar entre los incisivos centrales maxilares en el plano medio sagital.
Euryon (eu)	Frontal	Par	Punto más lateral del cráneo localizado sobre los parietales.
Glabela (g)	Lateral	Impar	Punto más pronunciado en proyección en el plano sagital medio del borde inferior del frontal, entre los arcos superciliares, arriba de la raíz nasal y la sutura frontonasal, en la posición del plano de Frankfurt.
Esfenion (esf)	Lateral	Par	Punto de unión de los huesos esfenoides, frontal y parietal.
Krotafion (ktf)	Lateral	Par	Punto de unión de los huesos esfenoides, parietal y temporal.
Porion (po)	Lateral	Par	Punto en el borde superior del meato auditivo externo.
Asterion (ast)	Lateral	Par	Punto de unión de los huesos occipital, parietal y temporal.
Opistocranion (op)	Lateral	Impar	Punto más sobresaliente del cráneo en el plano medio sagital.
Bregma (b)	Coronal	Impar	Punto ectocraneal de la intersección de las suturas coronal y sagital.

Lambda (l)	Occipital	Impar	Punto ectocranial de unión del occipital con los parietales.
Inion (i)	Occipital	Impar	Punto más prominente de la protuberancia occipital externa, donde se unen las dos líneas nucales superiores con el plano medio sagital.
Condylion lateral (cdl)	Basal	Par	Punto más lateral en los cóndilos mandibulares.
Condylion medial (cdm)*	Basal	Par	Punto más medial en los cóndilos mandibulares.
Basion (ba)	Basal	Impar	Punto del borde anterior del foramen magnum donde se cruza con el plano sagital medio.
Opisthion (o)	Basal	Impar	Punto medio en el borde posterior del foramen magnum, en la intersección del plano medio sagital con el borde.
FM lateral (fml)*	Basal	Par	Punto más exterior del borde lateral del foramen magnum.

Tabla 1 Listado de landmarks craneométricos

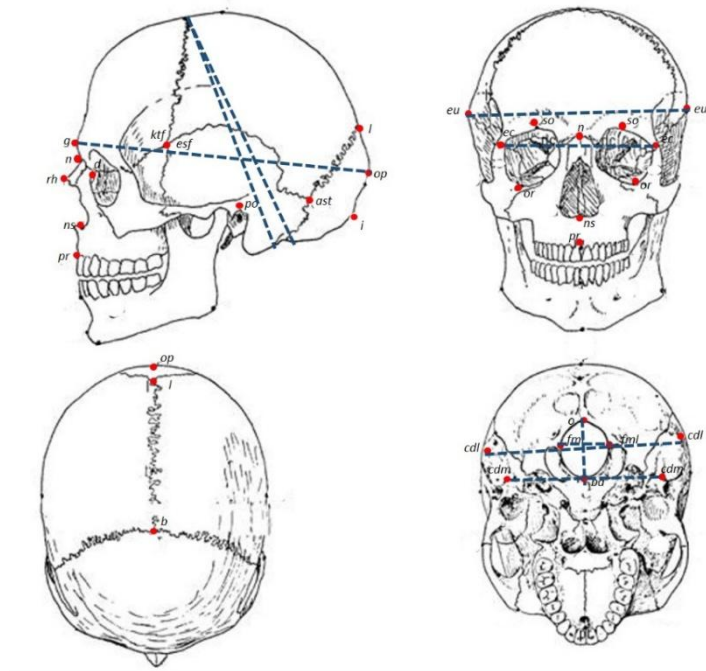


Figura 7 Distribución de puntos craneométricos y medidas por normas craneales

Medida	Landmarks	Instrumento de medida
Longitud	g-op	Compás de espesor
Anchura	eu-eu	Compás de espesor
Bicondilar interna	cdm-cdm	Calibre
Bicondilar externa	cdl-cdl	Calibre
Diámetro sagital del foramen magno	ba-o	Calibre
Diámetro coronal del foramen magno	fml-fml	Calibre
Interorbitaria	ec-ec	Calibre
Altura opistio-bregmática	o-b	Compás de espesor
Altura basio-bregmática	ba-b	Compás de espesor

Tabla 2 Listado de medidas craneométricas

### 7.1.2. Mediciones

En la tabla número 3 mostrada a continuación quedan reflejados los promedios y desviaciones estándar obtenidas mediante medición manual por triplicado de las diferentes medidas craneométricas para cada uno de los cuatro cráneos a estudio.

El registro total de medidas obtenidas queda recogido al completo para su consulta en el Anexo III del presente trabajo.

	001		054		065		072	
	$\bar{X}$	$\sigma$	$\bar{X}$	$\sigma$	$\bar{X}$	$\sigma$	$\bar{X}$	$\sigma$
<i>Longitud</i>	17,6	0,20	16,80	0,10	17.57	0,06	18.03	0,21
<i>Anchura</i>	13,4	0,10	12,40	0,20	13.70	0,20	14.03	0,06
<i>Bicondilar interna</i>	7,2	0,40	6,90	0,30	7,87	0,31	8.20	0,10
<i>Bicondilar externa</i>	10,70	0,20	9,70	0,30	11,07	0,23	11,83	0,06
<i>Diametro sagital fm</i>	3,70	0,10	3.30	0,10	3,57	0,06	3,93	0,06
<i>Diametro coronal fm</i>	3.00	0,20	2,80	0,06	3,10	0,10	3.43	0,12
<i>Interorbitaria</i>	9,70	0,10	8,83	0,06	9,80	0,06	9,33	0,21
<i>Opist-bregma</i>	14.30	0,10	13,30	0,10	13.73	0,15	14.50	0,10
<i>Basion-bregma</i>	12.80	0,20	11,80	0,10	12,13	0,06	13.07	0,16

$\bar{X}$  Promedio

$\sigma$  Desviación estándar

Tabla 3 Promedios y desviaciones estándar obtenidas mediante medición manual por medida (en cm) para cada uno de los cráneos a estudio.

## 7.2. Fotogrametría convencional

### 7.2.1. Elaboración de modelos 3D

#### 7.2.1.1. Toma de fotografías

La necesidad de registrar mediante fotografías la totalidad del volumen craneal sin posibilidad de reorientación de la pieza durante el proceso a fin de no perder las referencias espaciales, planteó como necesidad el diseño de una estructura en cuyo interior se soportase inmóvil la pieza a estudio y sobre la cual fijar los marcadores de fotogrametría destinados a facilitar el posterior posicionamiento y reconstrucción del modelo.

Se construyó para tal fin una estructura metálica de forma cúbica cuyas aristas se recubrieron con marcadores de fotogrametría y en el interior de la cual y por medio de un trípode se suspendió el cráneo inmovilizado.

Por cada una de las cuatro caras laterales de la estructura cúbica, cuatro fotografías fueron registradas tal y como queda representado de manera esquemática en la Figura 8 mostrada a continuación, tomándose finalmente para cada cráneo a modelar un total de 16 fotografías.

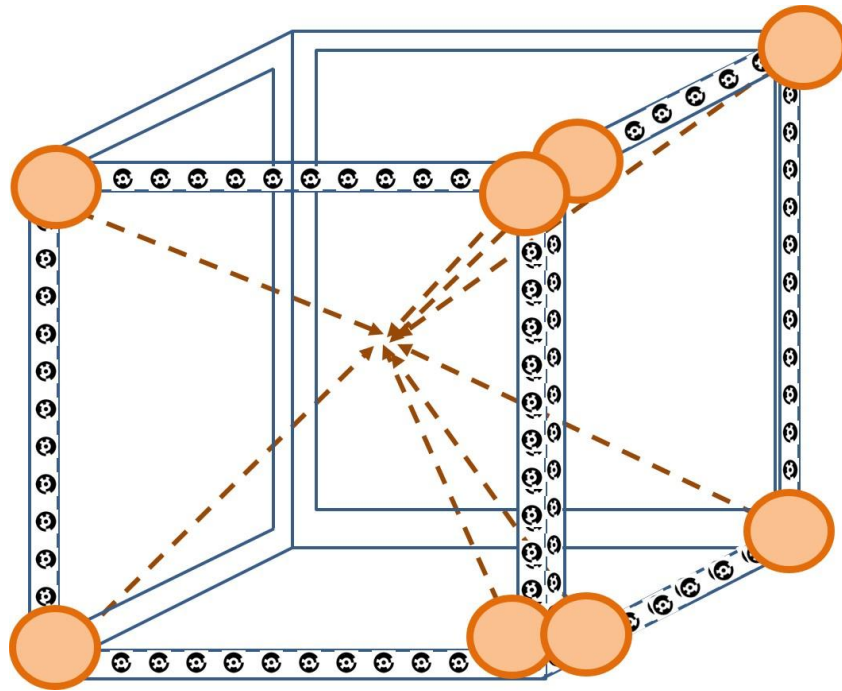


Figura 8 Representación esquemática de la estructura diseñada para la toma de fotografía para fotogrametría. Las figuras de color naranja representan las posiciones y orientaciones adoptadas por la cámara en el fotografiado de las caras frontal y lateral derecha.

#### 7.2.1.2. Procesado de imágenes y digitalización de landmarks

Previamente a su fotografiado, sobre la superficie de cada cráneo se localizaron y marcaron mediante rotulador indeleble un total de 25 puntos craneométricos seleccionados de entre el total de *landmarks* anteriormente descritos (Tabla 1).



Figura 9 Landmarks marcados sobre la superficie craneal

Dentro de la fase de procesado de las fotografías capturadas, la localización en el espacio para cada uno de los citados *landmarks* fue digitalizada y extraídas sus coordenadas XYZ las cuales fueron exportadas a un documento Excel gracias al cual, mediante la elaboración de una tabla dinámica se facilitó el cálculo de distancias.

La siguiente secuencia de imágenes ilustra el proceso de reconstrucción y digitalización de *landmarks* mediante fotogrametría realizado sobre uno de los cráneos a estudio.

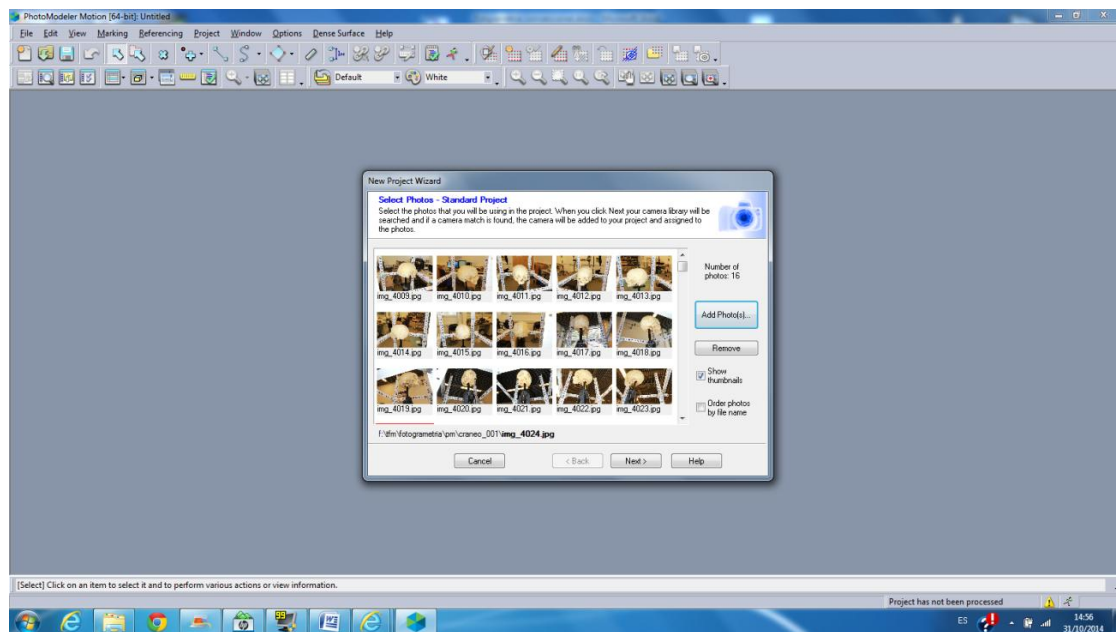


Figura 10 Carga de las fotos capturadas en Photomodeler para su procesado

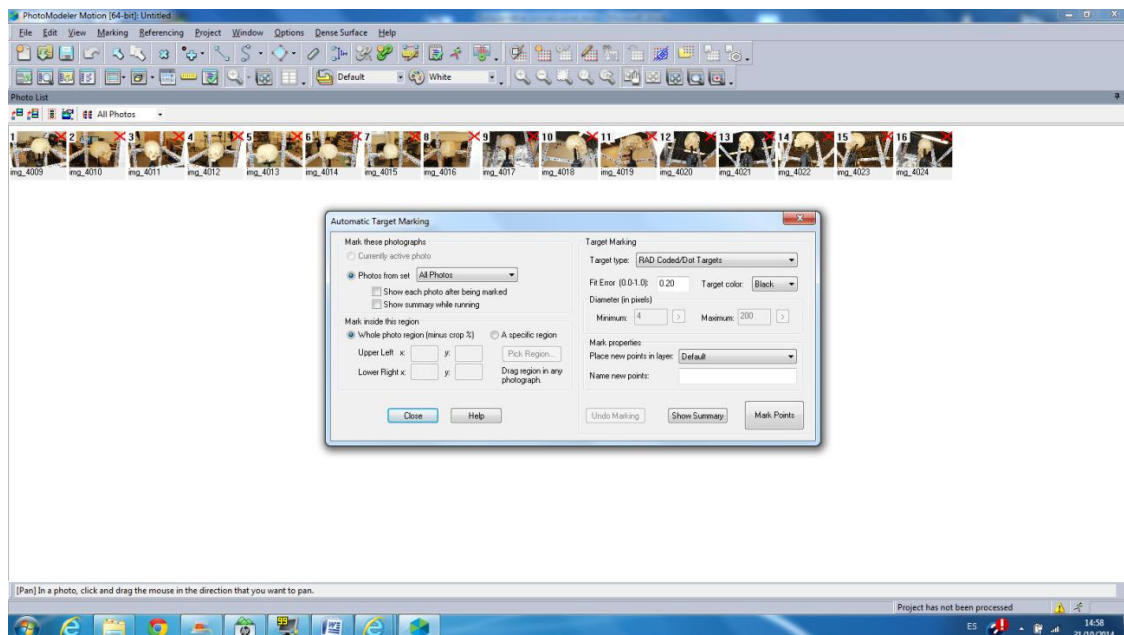


Figura 11 Identificación por parte de Photomodeler de los marcadores de fotogrametría fijados sobre la estructura metálica diseñada a fin de facilitar la orientación y reconstrucción del modelo

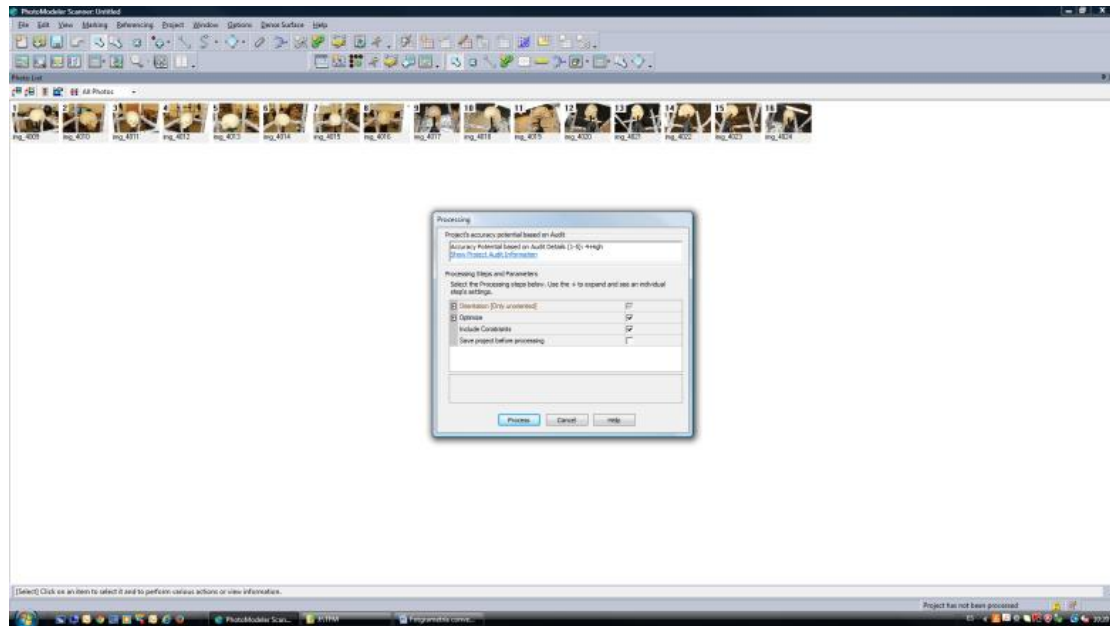


Figura 12 Procesado de la imágenes capturadas

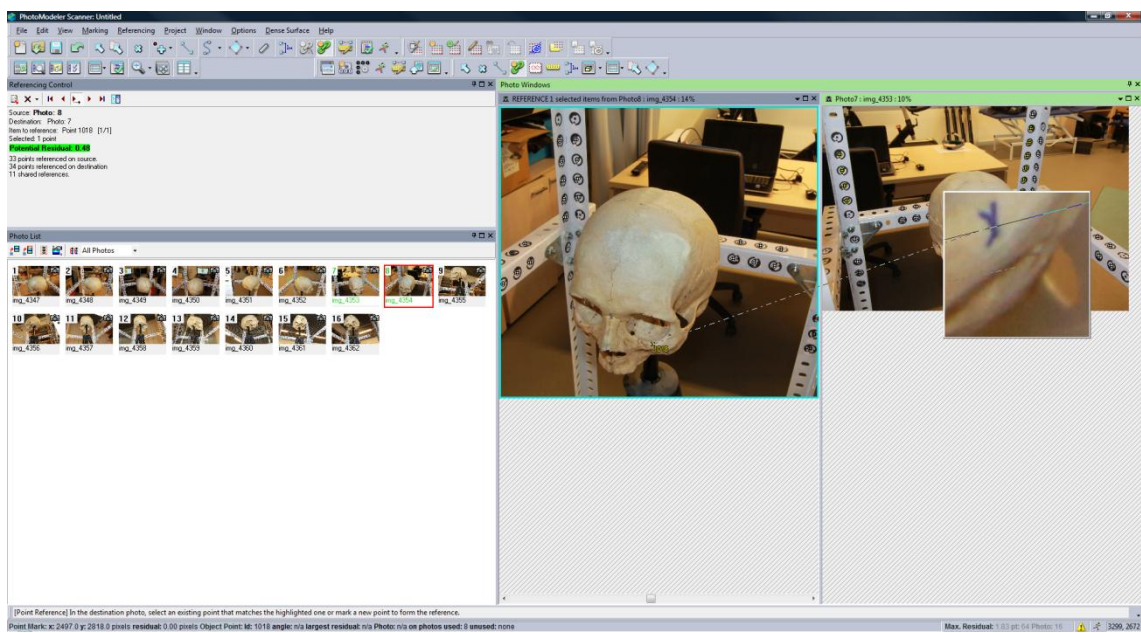


Figura 13 Digitalización de aquellos landmarks previamente identificados sobre la superficie craneal



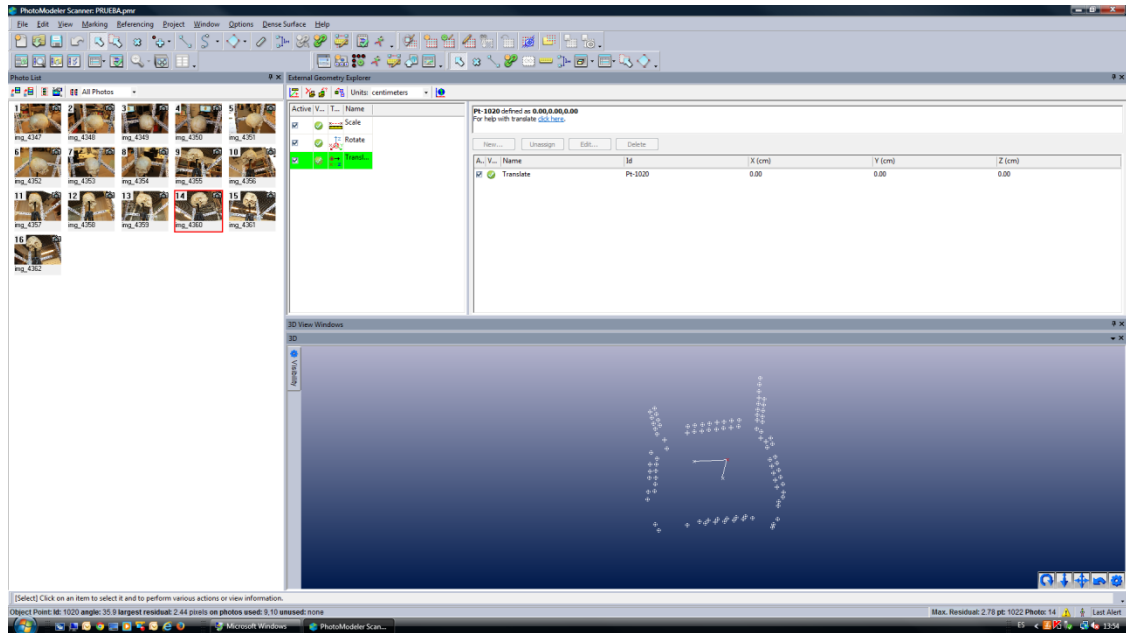


Figura 14 Escalado y reorientación en el espacio del modelo obtenido



Figura 15 Detalle final de la localización de los landmarks craneales tras su digitalización junto con la visualización tridimensional de los mismos

## 7.2.2. Medición

### 7.2.2.1. Descripción de medidas

La elaboración de una tabla dinámica capaz de contener y gestionar toda la información correspondiente a las coordenadas espaciales de los puntos determinados durante el procesado de las imágenes, facilitó la determinación de distancias craneométricas.

Exportadas en una hoja Excel las coordenadas XYZ correspondientes a cada punto y para cada uno de los cráneos analizados, el cálculo de distancias entre ellos pudo ser automatizado mediante aplicación de la fórmula matemática:

$$\text{Distancia} = \sqrt{(X1 - X2)^2 + (Y1 - Y2)^2 + (Z1 - Z2)^2}$$

La siguiente imagen muestra una captura de pantalla realizada sobre la citada tabla dinámica durante el cálculo de la distancia interorbitaria (ec-ec). Las distancias aparecen calculadas en mm.

Mín de NUM	Etiquetas de columna			eciz			DISTANCIA
Etiquetas de fila	X	Y	Z	X	Y	Z	
001	-89,4344	-10,2884	5,5177	5,6333	10,8265	10,1021	97,4921
054	83,1691	-11,3593	20,2657	-10,4775	-8,9409	20,4149	93,6779
065	-86,6858	-5,8464	-9,2061	12,0194	-9,9473	-8,2288	98,7952
072	-88,1764	-12,0415	-23,8489	8,8558	-10,6209	-11,6999	97,8002

Figura 16 Tabla dinámica para el cálculo de distancias generada a partir de coordenadas espaciales de puntos craneométricos

### 7.2.2.2. Mediciones

Si bien la creación de la anteriormente citada tabla dinámica facilita de manera notable la toma de medidas, un incompleto marcado del total de *landmarks* necesarios a efectos de cubrir el total de mediciones realizadas manualmente hizo que a efectos comparativos sólo las distancias: diámetro sagital del foramen magno, interorbitaria, altura opistio-bregmática y altura basio-bregmática pudiesen ser calculadas.

La tabla número 4 presentada a continuación recoge de manera resumida los resultados de distancias en mm obtenidos para cada uno de los cráneos a estudio. El registro detallado de coordenadas y medidas obtenidas puede ser consultado en su totalidad en el Anexo IV del presente trabajo.

	Diámetro sagital fm	Interorbitaria	Altura opistio-bregmática	Altura basio-bregmática
001	38,9094	97,4921	143,9112	128,7775
054	34,3728	93,6778	135,9065	120,9124
065	39,2870	98,795	140,0150	123,6165
072	41,0252	97,8001	145,2992	131,3564

Tabla 4 Medidas obtenidas mediante fotogrametría convencional (en mm)

### 7.3. Escáner de superficie 3D

#### 7.3.1. Elaboración de modelos 3D

##### 7.3.1.1. Protocolo de escaneado

Para la obtención de los modelos virtuales tridimensionales de los cuatro cráneos a estudio se optó por la utilización del escáner portátil Artec™ Eva 3D<sup>45</sup>.

A fin de capturar por completo la morfología craneal, se realizaron dos escáneres complementarios para cada pieza. Haciendo uso para ello de una plataforma rotatoria diseñada al efecto, se registró un primer escáner con el cráneo apoyado sobre su base gracias al cual pudieron reconstruirse las normas frontal, occipital y laterales; un segundo escáner, con la pieza en apoyo sobre el occipital, permitió la reconstrucción de la norma superior así como de la compleja morfología de la base craneal. Adicionalmente, en aquellos casos en los que se consideró oportuno y a fin de completar zonas de especial detalle, se realizaron escáneres adicionales de ciertas zonas de interés.

##### 7.3.1.2. Reconstrucción de escáneres

Las tareas de post procesado, incluyendo la alineación, registro, eliminación de "outliers" y fusión de los escáneres capturados para cada cráneo, fueron llevadas a cabo mediante el software Artec Studio v.9.2 consiguiéndose con ello generar la superficie final texturizada de las piezas.

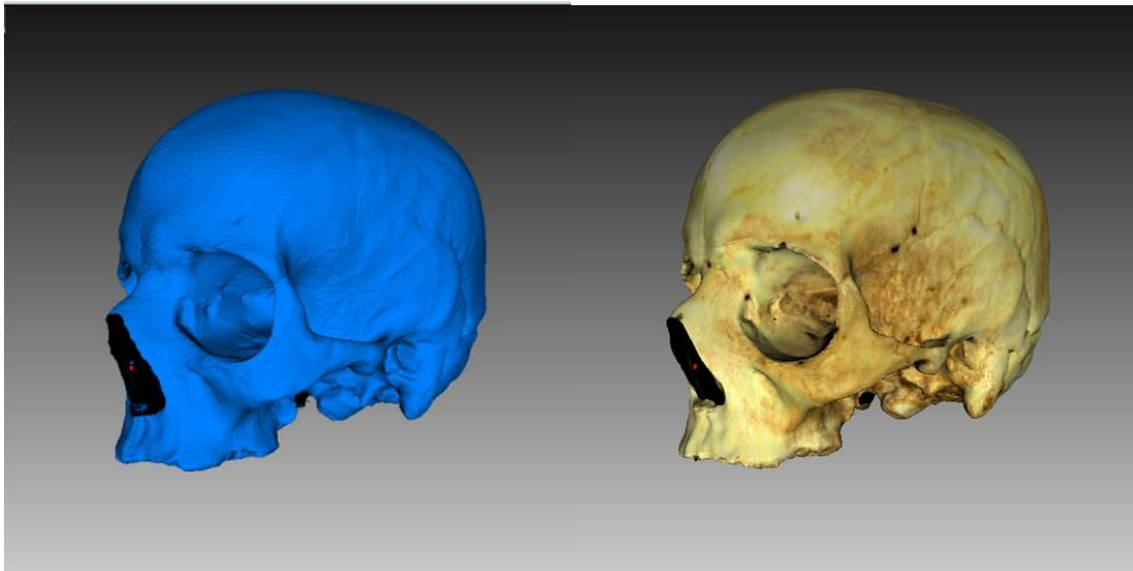


Figura 17 Ejemplo de escáner 3D con y sin textura obtenido para uno de los cráneos a estudios mediante implementación del escáner Artec™ Eva 3D

#### 7.3.2. Protocolo de orientación de modelos craneales tridimensionales en base a planos anatómicos estandarizados

Un análisis comparativo de modelos tridimensionales obtenidos mediante escaneo 3D, pasa por el establecimiento de una sistemática en la orientación espacial de los mismos que asegure la comparación entre regiones homólogas.

Con el siguiente protocolo se pretende obtener un procedimiento sistemático, capaz de proporcionar una orientación de modelos craneales tridimensionales con respecto a planos anatómicos estandarizados, en concreto con respecto al Plano de Frankfurt, plano que por convenio, y en base al acuerdo establecido en el Congreso Mundial de Antropología de 1884, establece la posición anatómica estándar del cráneo humano cuando el plano que lo constituye y queda definido por el punto Orbital izquierdo y los dos puntos Porion, se orienta en paralelo con respecto al suelo<sup>1</sup>.

Dado que la correcta determinación de cualquier punto craneométrico está determinada por la previa orientación espacial del cráneo, en nuestro caso de un modelo digital, el procedimiento orientador propuesto consta de un doble proceso de selección y reorientación de *landmarks* a fin de conseguir, en un primer paso, una orientación aproximada del modelo con respecto a la posición estándar anatómica, la cual permita en una segunda iteración, determinar de forma más objetiva, precisa y basada en criterios matemáticos, la determinación de los *landmarks* finales, cuya localización se ajuste con mayor exactitud a la posición teórica buscada.

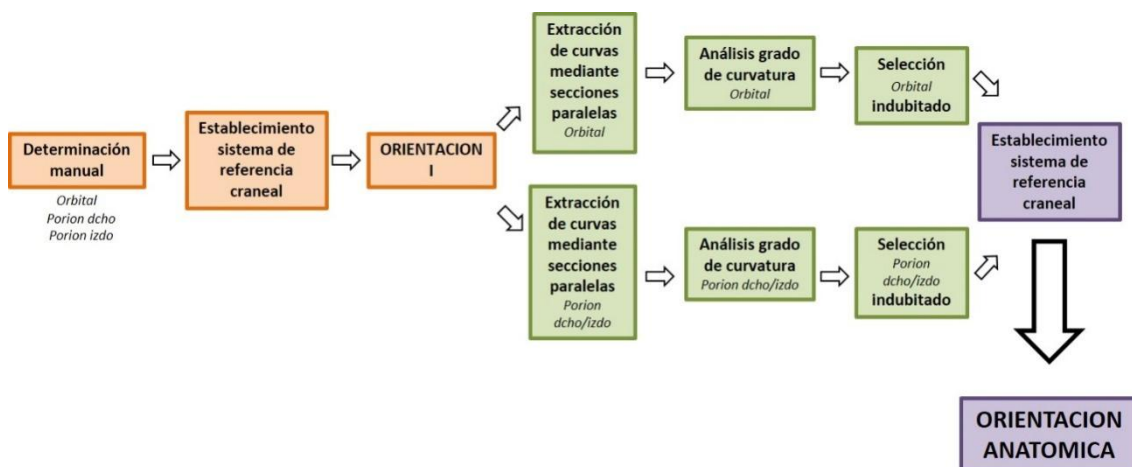


Figura 18 Diagrama de flujo recogiendo las etapas más importantes del procedimiento diseñado para la orientación de modelos craneales tridimensionales en base a planos anatómicos estandarizados.

El diagrama mostrado en la Figura 18 resume de manera esquemática los pasos constituyentes del procedimiento de orientación diseñados los cuales se describirán a continuación en detalle.

El procedimiento descrito sobre la superficie resultante del escaneo y del postprocesado descrito previamente se hizo mediante el uso de Rhinoceros, software con funciones específicas para el análisis y procesado de mallas poligonales. Importada en dicho software la superficie del modelo digital a estudio, se procedió a la identificación de los puntos característicos o *landmarks*, siguiendo el protocolo que se recoge a continuación.

Paso 1. Determinación manual de los tres *landmarks* característicos al Plano de Frankfurt (Orbital izquierdo y Porion derecho e izquierdo) mediante selección directa sobre la malla tridimensional (Figura 19).

Paso 2. Unión mediante línea de ambos puntos Porion. Al trazar la perpendicular a dicha línea pasando por el punto Orbital, el punto de corte generado es fijado como origen. El sistema de referencia resultante para el cráneo se establece como sigue: eje X, recta de unión entre ambos Porions (sentido positivo de Izq a Dcha); eje Y, el segmento con origen en el punto de intersección entre líneas pasando por el punto Orbital (Figura 20a).

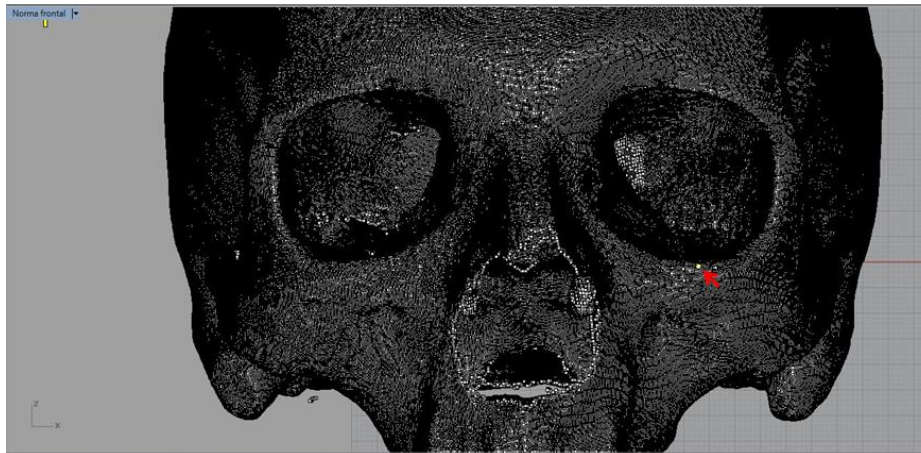


Figura 19 Primera estimación del punto Orbital mediante selección manual directa.

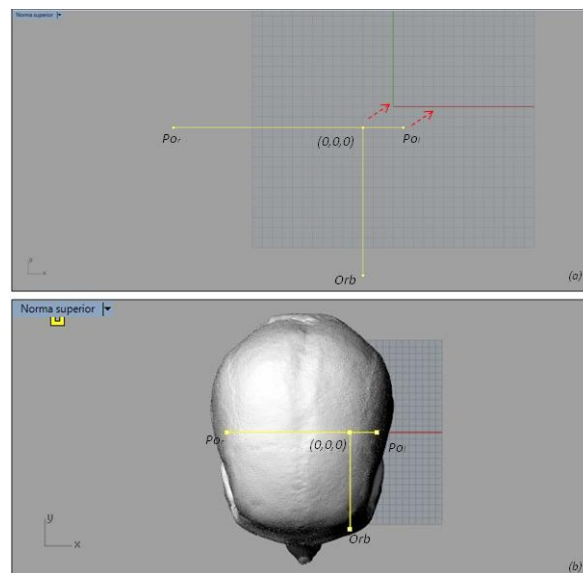


Figura 20 (a) Sistema de coordenadas asociado al cráneo antes de su confluencia con el sistema de referencia universal. (b) Modelo tras la orientación en el espacio

Paso 3. Giro y desplazamiento del sistema de referencia craneal hasta su coincidencia con el sistema de referencia general. Este paso permite hacer una primera orientación aproximada del modelo a su posición anatómica (Figuras 20a y 20b).

Paso 4. Para cada una de las regiones de interés (borde infraorbitario izquierdo y bordes superiores de ambos meatos auditivos) extracción de curvas mediante secciones en planos paralelos con una distancia de separación entre planos de 1 mm (Figura 21). En el caso de la región infraorbital las citadas curvas se obtienen mediante cortes en paralelo al plano YZ, y en paralelo al plano XZ para la extracción de contornos correspondientes a los orificios auditivos.

Paso 5. Análisis del grado de curvatura para las secciones extraídas. Para cada sección se establece el punto de mínimo radio de curvatura (punto en el cual el grosor del borde se minimiza) lo cual permite mediante unión del conjunto de puntos obtenidos, obtener una representación indubitada del contorno estudiado (Figura 22a).

Paso 6. Conocidas las coordenadas espaciales para cada punto de los contornos establecidos, determinación indubitada de los *landmarks* característicos mediante selección del punto de menor coordenada en el eje z para el caso del punto Orbital (Figura 23a), y de los puntos de mayor coordenada en este mismo eje pero para las regiones de ambos meatos auditivos en el caso del establecimiento de los Porion (Figura 23b).

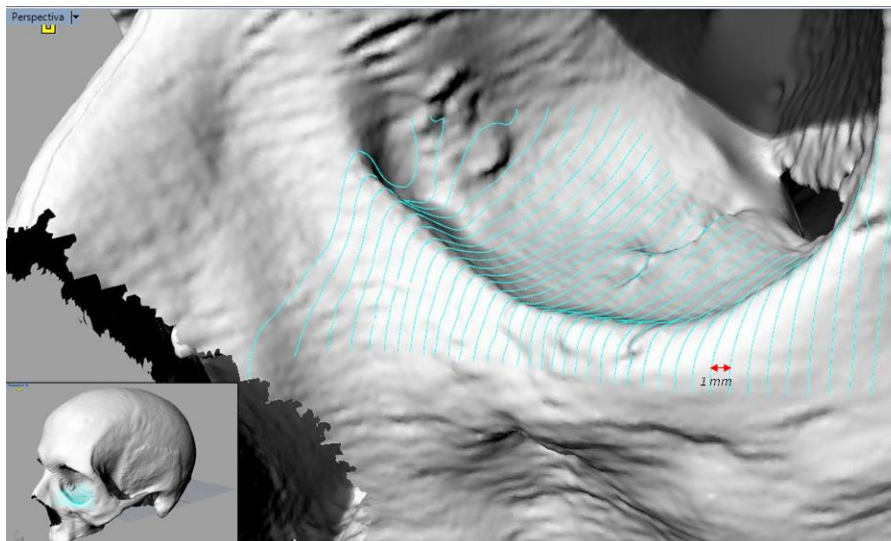


Figura 21 Secciones extraídas para el borde infraorbitario izquierdo.

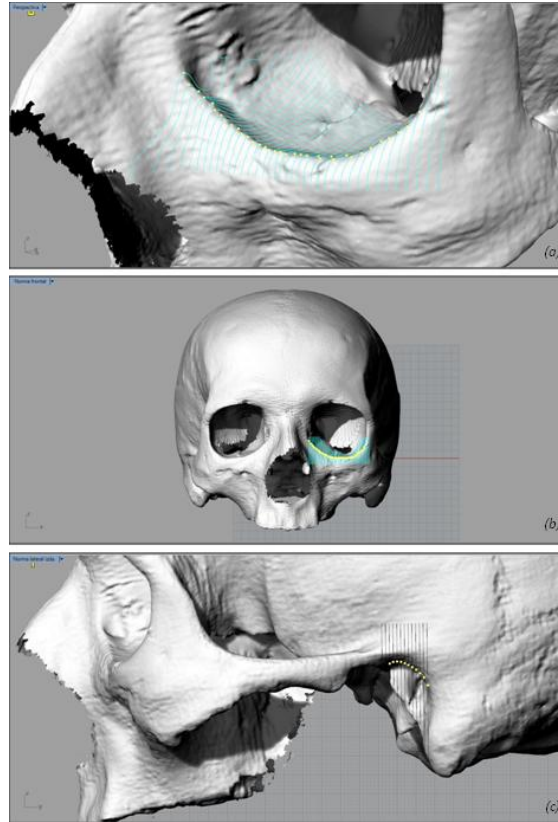


Figura 22 (a) Vista en perspectiva de los puntos de mínima curvatura proporcionados por el sistema para cada una de las secciones extraídas para el borde infraorbitario izquierdo. (b) Vista frontal del contorno infraorbitario izquierdo. (c) Secciones y puntos de mínima curvatura para el conducto auditivo izquierdo.

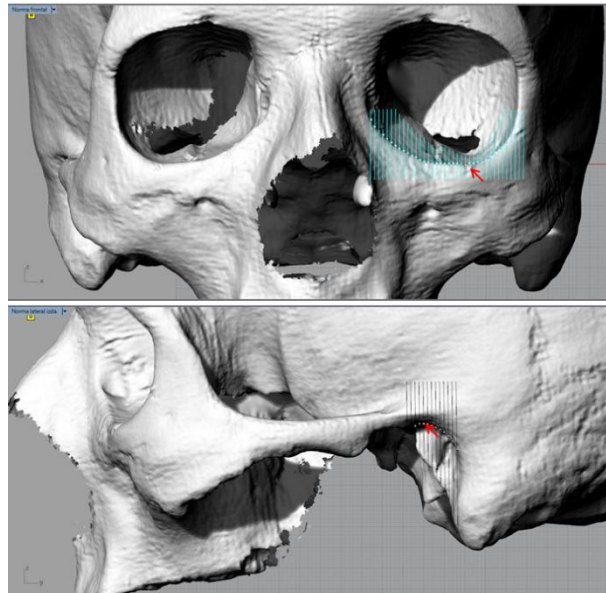


Figura 23 (a) Selección del punto de menor cota en el eje z devuelto por el sistema de entre los puntos de mínima curvatura obtenidos (Orbital indubitado). (b) Selección del punto de mayor cota en el eje z de entre los puntos de mínima curvatura obtenidos para el conducto auditivo izquierdo (Porion izquierdo indubitado)

Paso 7. Determinados los tres *landmarks* de carácter indubitado y de igual forma a como se procedió en el paso de reorientación inicial (Paso 3), unión de los puntos mediante líneas para el establecimiento del sistema de referencia craneal y reorientación del mismo para su coincidencia con el sistema de referencia general consiguiéndose con ello la orientación definitiva anatómicamente estandarizada de los modelos (Figura 24).

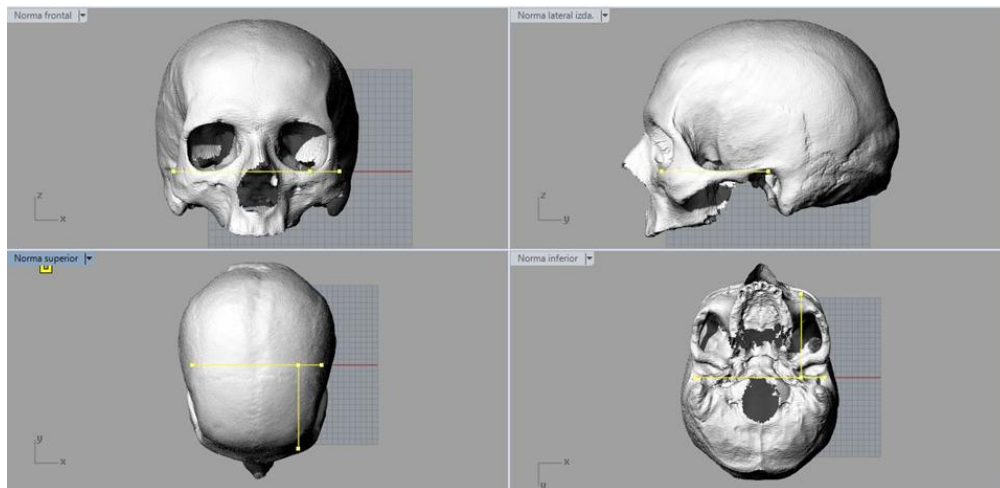


Figura 24 Modelo tridimensional orientado de manera anatómicamente estandarizada en base al Plano de Frankfurt tras la aplicación del protocolo.

### 7.3.3. Validación del sistema

#### 7.3.3.1. Observadores

Los 3 observadores implicados en el proceso de validación del procedimiento de orientación fueron seleccionados en base a su grado de experiencia en el ámbito de la antropología forense en el momento de realizar el análisis, siendo considerados los dos primeros observadores (Obs 1 y Obs 2) especialistas con probada experiencia y conocimiento en la determinación de puntos craneométricos, y el tercero (Obs 3) como investigador novel, conocedor del procedimiento y puntos a localizar pero con escasa experiencia previa al respecto.

#### 7.3.3.2. Análisis de datos

A fin de evitar una identificación del modelo analizado durante el estudio por parte de los observadores capaz de alterar los resultados obtenidos por aprendizaje, estos fueron codificados y remitidos a los observadores quienes en todo momento desconocieron la relación entre el modelo analizado y su identidad real.

Cada analista recibió un archivo compuesto por seis carpetas, una por cada día de análisis, conteniendo cada una de ellas tres documentos codificados como CRANEO A, B y C respectivamente, correspondientes a los modelos codificados a analizar (Figura 25). Asimismo un video tutorial explicativo en detalle del proceso a realizar también se adjuntó a la documentación (Anexo VII).



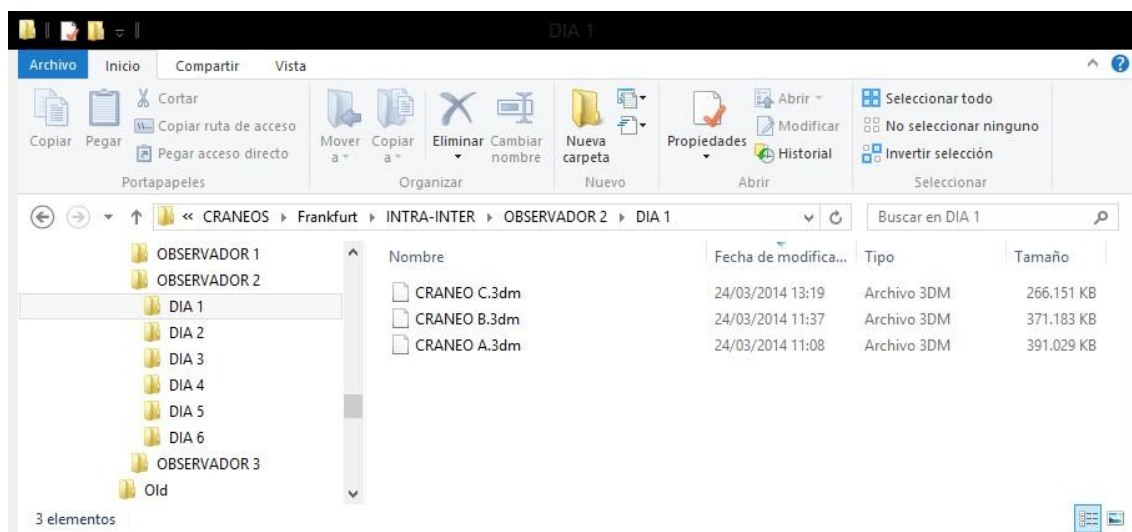


Figura 25 Ejemplo de distribución de modelos codificados para el Observador 2

Cada analista aplicó el proceso de orientación convencional así como el método propuesto sobre cada uno de los modelos craneales por triplicado, a lo largo de varios días y en distinto orden, a fin de asegurar una aplicación exenta de subjetividad y que pudiese falsear los resultados por aprendizaje.

La siguiente tabla recoge la codificación y asignación por día de análisis aplicado sobre los modelos craneales a estudio.

	A	B	C
<b>DIA 1</b>	072	001	TC1
<b>DIA 2</b>	054	TC3	065
<b>DIA 3</b>	TC1	072	001
<b>DIA 4</b>	054	TC3	065
<b>DIA 5</b>	072	001	TC1
<b>DIA 6</b>	TC3	054	065

Tabla 5 Codificación de modelos y distribución por días para su análisis

Recogidos los resultados obtenidos por los tres observadores implicados en el estudio, para cada proceso de orientación, orientación tras selección manual (Método A) y orientación tras determinación indubitada de *landmarks* (Método F), se calcularon las distancias desde el origen de coordenadas a cada uno de los puntos establecidos: distancia Origen – Orb (en adelante Orb), distancia Origen – Po<sub>dcho</sub> (en adelante Po<sub>dcho</sub>) y distancia Origen – Po<sub>izdo</sub> (en adelante Po<sub>izdo</sub>) tal y como puede verse reflejado en la Figura 26.

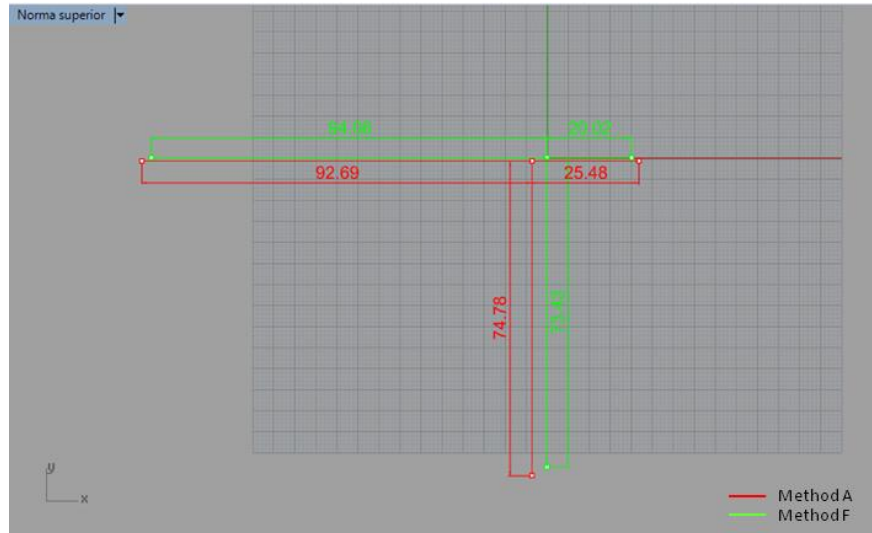


Figura 26 Cálculo de distancias en mm entre el origen y los landmarks establecidos.

A fin de reducir la distorsión en los resultados provocada por la propia variabilidad inter craneal, se restó a cada resultado el promedio del conjunto de medidas obtenidas para cada punto por el conjunto de observadores en el total de los análisis obteniéndose así el conjunto de resultados ( $Measure - \bar{X}$ ) a analizar posteriormente. En la Tabla 6 se recoge una muestra del cálculo descrito realizado sobre el modelo 065 para la medida Orb. El registro completo de cálculos realizados queda recogido en su totalidad en el Anexo V para su consulta.

CRANIUM 065 - Orb			
Method	Observer	Measure	Measure - $\bar{X}$
A	1	74,790	0,966
A	1	74,835	1,011
A	1	74,976	1,152
F	1	73,425	-0,399
F	1	72,792	-1,032
F	1	75,864	2,040
A	2	73,359	-0,465
A	2	72,871	-0,953
A	2	71,547	-2,277
F	2	73,825	0,001
F	2	74,817	0,993
F	2	73,135	-0,689
A	3	72,171	-1,653
A	3	74,273	0,449
A	3	72,069	-1,755
F	3	74,344	0,520
F	3	74,653	0,829
F	3	75,094	1,270
$\bar{X}$		73,824	

Tabla 6 Ejemplo del tratamiento de datos para la distancia Origen-Orb en uno de los cráneos estudiados.

Realizados los cálculos encaminados a reducir el efecto de la variabilidad intercraneal, una comparativa tanto entre métodos como a nivel inter observador de los resultados obtenidos tras los procesos de orientación, fue llevada a cabo haciendo uso para ello del software Minitab de análisis estadístico.

### 7.3.3.3. Resultados

#### Estudio de la normal distribución de los resultados

El conjunto de resultados obtenidos fue sometido a sendas pruebas estadísticas con el fin de evaluar la normalidad de los resultados escogiéndose para ello, en base al volumen de la muestra a analizar, los test de normalidad de Anderson-Darling y Kolmogorov-Smirnov.

El análisis realizado para las 3 medidas a estudio (Orb,  $Po_{dcho}$ ,  $Po_{izdo}$ ) arrojó en todos los casos resultados de p-valor superiores al nivel de significancia establecido en 0.05, dato que permitió en cada caso dar por válida la premisa establecida como  $H_0$  de que los resultados siguen una distribución normal. En la Tabla 7 se muestran resumidos los resultados de los estadísticos y p-valores obtenidos en cada test para cada medida a estudio.

		Orb	Po dcho	Po izdo
Anderson-Darling	<i>AD</i>	0.361	0.160	0.317
	<i>p-valor</i>	0.436	0.947	0.531
Kolmogorov-Smirnov	<i>KS</i>	0.064	0.064	0.062
	<i>p-valor</i>	>0.150	>0.150	>0.150

*AD estadístico de Anderson-Darling*

*KS estadístico de Kolmogorov-Smirnov*

*Tabla 7 Estadísticos y p-valores obtenidos para cada medida en el estudio de la normalidad mediante los métodos de Anderson-Darling y Kolmogorov-Smirnov*

#### Estudio de la varianza

Comprobada la normal distribución, se procedió a la realización de diversos análisis de la varianza para los resultados.

El primer análisis de varianzas efectuado se encaminó hacia la comparación de los resultados en función de la metodología de orientación implementada (Método A vs. Método F). Los resultados obtenidos fueron congruentes para las tres medidas analizadas obteniéndose en todos los casos p-valores > 0.05, lo que permitió dar como válida la hipótesis nula que defendía una semejanza estadísticamente significativa de los resultados obtenidos mediante cada una de las dos metodologías comparadas. A su vez, y como puede verse en la Tabla 8, los valores de desviación estándar proporcionados por cada método y para las diferentes medidas también presentaron un alto grado de semejanza.

	Orb	Po dcho	Po izdo
<i>p</i> -valor	0.492	0.962	0.200
$\sigma_A$	1.490	2.079	2.511
$\sigma_F$	1.325	2.096	2.017

$\sigma_A$  desviación estándar para el Método A  
 $\sigma_F$  desviación estándar para el Método F

Tabla 8 Estudio de la varianza. Análisis general por método (A vs. F)

Un segundo análisis de varianzas sirvió para comparar los resultados obtenidos por los dos observadores con experiencia, Obs1 y Obs2 (Tabla 9). El total de las medidas proporcionó resultados similares, siendo en todos los casos los p-valores > 0.05, dato que confirma la semejanza entre observadores, y con resultados de desviación estándar altamente similares entre sí.

	Orb	Po dcho	Po izdo
<i>p</i> -valor	0.604	0.889	0.783
$\sigma_1$	1.352	2.375	2.315
$\sigma_2$	1.212	2.306	2.453

$\sigma_1$  desviación estándar para el Observador 1  
 $\sigma_2$  desviación estándar para el Observador 2

Tabla 9 Estudio de la varianza. Análisis por observador (Obs1 vs. Obs2)

Por último, cada uno de los observadores participantes en el estudio fue evaluado de manera individualizada y atendiendo a la respuesta obtenida para cada uno de los métodos de orientación (Método A vs. Método F). En la Tabla 10 se recogen los datos de desviación estándar y p-valor obtenidos al efecto para cada uno de los observadores.

		Orb	Po dcho	Po izdo
Observador 1	<i>p</i> -valor	0.387	0.439	0.745
	$\sigma_A$	1.160	2.303	2.473
	$\sigma_F$	1.518	1.812	2.236
Observador 2	<i>p</i> -valor	0.391	0.935	0.713
	$\sigma_A$	1.180	2.043	1.802
	$\sigma_F$	0.904	1.992	1.609
Observador 3	<i>p</i> -valor	0.233	0.456	0.867
	$\sigma_A$	2.019	1.865	2.344
	$\sigma_F$	1.938	2.349	2.226

$\sigma_A$  desviación estándar para el método de orientación manual  
 $\sigma_F$  desviación estándar para el método de orientación asistido

Tabla 10 Estudio de la varianza. Análisis del método por observadores (A vs. F)

### 7.3.4. Medición

#### 7.3.4.1. Descripción de landmarks y medidas

Establecido y demostrada la validez del protocolo de orientación de modelos craneales tridimensionales en base a planos anatómicos estandarizados descrito, se abordó el diseño de un procedimiento capaz de asegurar, de una manera objetiva, inequívoca y basada en criterios matemáticos, la determinación de *landmarks* de interés craneométrico.

El desarrollo de un procedimiento tal basado en el uso de software de modelado 3D, permitiría registrar y mantener inalterados a futuro dichos puntos asegurando con ello la total repetitividad de las mediciones y eliminando la incertidumbre siempre inherente a cualquier tipo de medición repetitiva basada en los convencionales sistemas manuales.

En la Tabla 11 se recoge aunada la descripción que en la bibliografía se hace para cada uno de los *landmarks* cuya determinación inequívoca fue abordada junto con la descripción del procedimiento a seguir para su consecución.

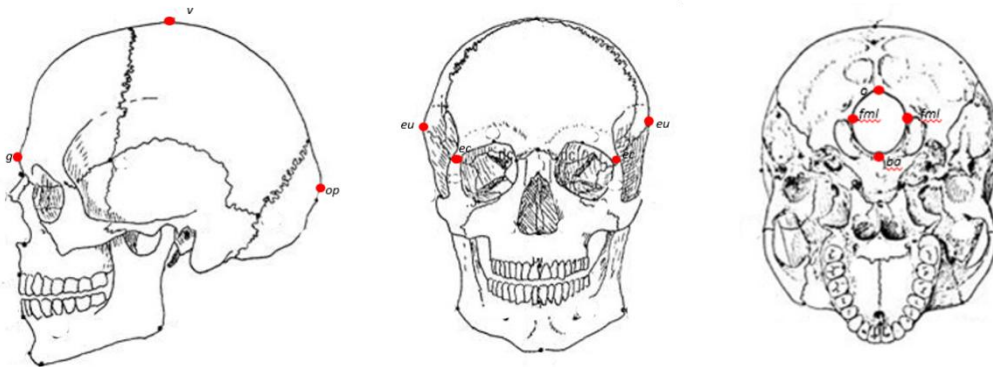


Figura 27 Landmarks de interés craneométrico a determinar de forma indubitada

Landmark	Descripción bibliográfica	Procedimiento de determinación
Ectoconchion (ec)	Punto más anterior del borde lateral de la órbita, donde un eje trazado desde el maxilofrontal paralelo al borde superior de la órbita la divide en dos mitades iguales.	Puntos más laterales de ambos contornos orbitarios, establecidos de igual manera a como se abordó en la determinación del punto Orbital
Euryon (eu)	Punto más lateral del cráneo localizado sobre los parietales.	Establecida la caja de abarque contenedora del volumen craneal total, puntos más laterales de la misma en contacto con el modelo.
Glabela (g)	Punto más pronunciado en proyección en el plano sagital medio del borde inferior del frontal, entre los arcos superciliares, arriba de la raíz nasal y la sutura frontonasal, en la posición del plano de Frankfurt.	Punto de mayor coordenada en el eje Y de entre los puntos de la malla constituyentes de la región glabellar.
Opistocranion (op)	Punto más sobresaliente del cráneo en el plano medio sagital.	Establecida la caja de abarque contenedora del volumen craneal total, punto más posterior de la misma en contacto con el modelo.
Vertex (v)	Punto medio más alto del cráneo en el plano sagital medio	Establecida la caja de abarque contenedora del volumen craneal total, punto más superior de la misma en contacto con el modelo.
Basion (ba)	Punto del borde anterior del foramen magno donde se cruza con el plano sagital medio.	Punto más anterior del contorno del foramen magno, establecido de igual manera a como se abordó la determinación del contorno orbitario en la determinación del punto Orbital.
Opisthion (o)	Punto medio en el borde posterior del foramen magno, en la intersección del plano medio sagital con el borde.	Punto más posterior del contorno del foramen magno, establecido de igual manera a como se abordó la determinación del contorno orbitario en la determinación del punto Orbital.
<i>FM lateral (fml)*</i>	Punto más exterior del borde lateral del foramen magno.	Puntos más laterales del contorno del foramen magno, establecido de igual manera a como se abordó la determinación del contorno orbitario en la determinación del punto Orbital.

Tabla 11 Descripción bibliográfica y procedimiento de determinación mediante software de modelado 3D de landmarks de interés craneométrico

Establecidos los *landmarks* de manera indubitada y conocidas sus coordenadas espaciales XYZ, un tratamiento similar al realizado ante la toma de medidas mediante fotogrametría convencional basado en la elaboración de tablas dinámicas capaces de gestionar la información recogida y calcular aquellas medidas deseadas sería fácilmente abordable.

#### **7.3.4.2. Mediciones**

La aparición a lo largo del desarrollo del presente proyecto de objetivos adicionales no planteados inicialmente pero prioritarios de cara a la correcta resolución del mismo, hecho que ha consumido una mayor cantidad de tiempo a la inicialmente prevista, ha impedido abordar en su totalidad la completa toma de medidas sobre el global de la muestra a estudio habiéndose centrado únicamente en el planteamiento y desarrollo del protocolo a seguir.

Una extensión de esta línea de trabajo se plantea pues a futuro encaminada a la obtención y comparativa con fines de homologación de mediciones obtenidas mediante metodologías diversas para la toma de medidas craneométricas.

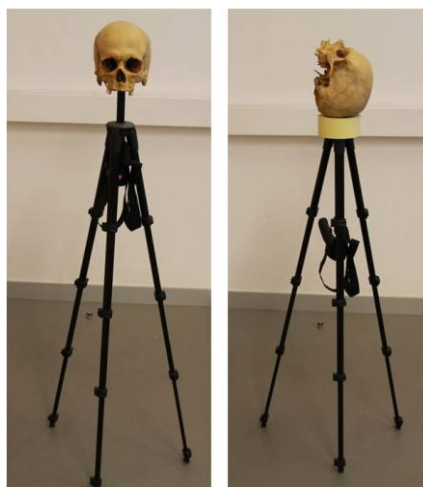
### **7.4. Escáner 3D basado en fotografía**

#### **7.4.1. Elaboración de modelos 3D**

##### **7.4.1.1. Protocolo para la toma de fotografías**

La necesidad de capturar al completo el total del volumen craneal sin posibilidad de reorientación de la pieza durante el proceso a fin de no perder las referencias espaciales, llevó a abordar la toma de fotografías mediante implementación de un protocolo similar al aplicado para la creación de modelos tridimensionales mediante escáner de superficie 3D.

Así pues, para cada cráneo a reconstruir dos proyectos completos fueron llevados a cabo. En el primero de ellos las fotografías fueron tomadas estando el cráneo apoyado sobre su base en un trípode gracias a lo cual pudieron reconstruirse las normas frontal, occipital y laterales; un segundo proyecto, con la pieza en apoyo sobre el occipital y encaminado a reconstruir las normas superior e inferior del mismo fue también realizado de manera semejante.



*Figura 28 Posición del cráneo sobre el trípode para cada uno de los dos proyectos realizado por cráneo en la reconstrucción mediante escáner 3D basado en fotografía*

A fin de asegurar el suficiente solapamiento entre imágenes adyacentes necesario para la posterior reconstrucción tridimensional, un total de 24 imágenes por proyecto, subdivididas en dos series con un grado de separación entre imágenes de 30º, fueron registradas.

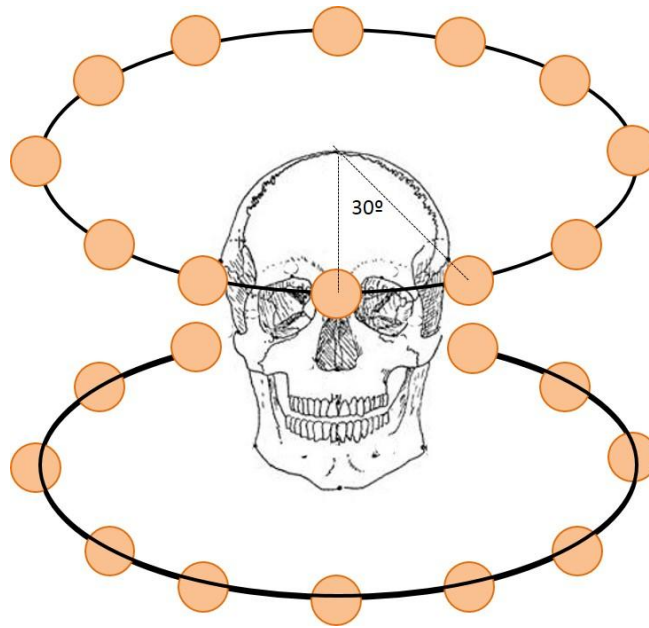


Figura 29 Representación esquemática de las posiciones de toma de fotografías para la creación de modelo 3D mediante Photomodeler scanner

#### 7.4.1.2. Reconstrucción de escáneres a partir de fotografías

La siguiente secuencia de imágenes recoge, para uno de los cráneos a estudio, el proceso de reconstrucción de su correspondiente escáner 3D en base a las fotografías tomadas mediante el procedimiento descrito en la sección anterior.

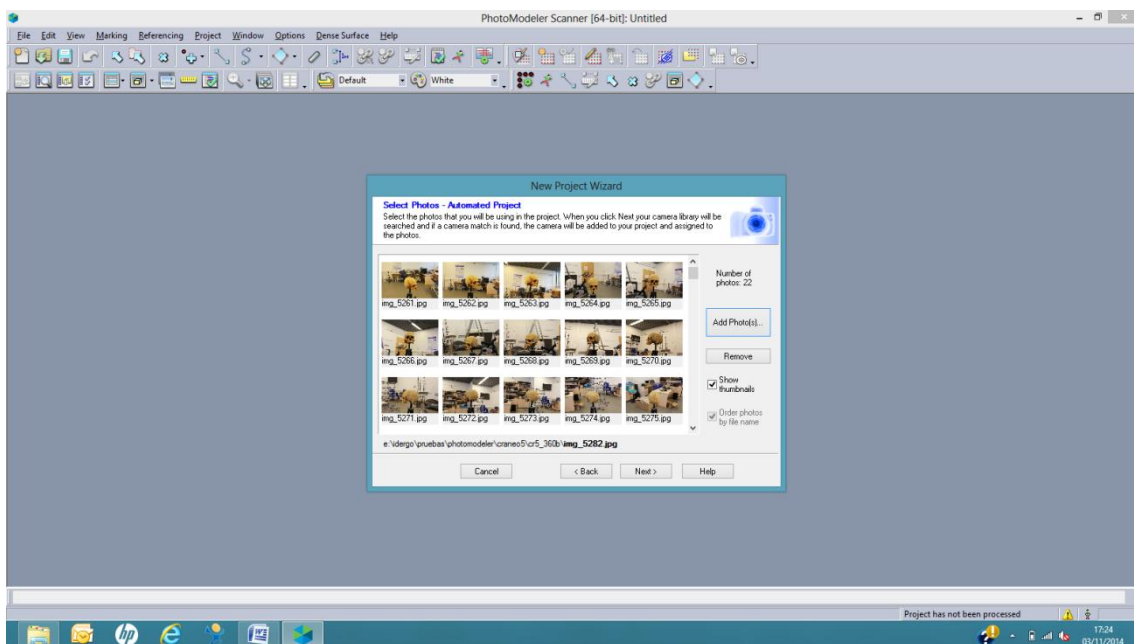


Figura 30 Carga de las fotos capturadas en el software para procesado de las mismas



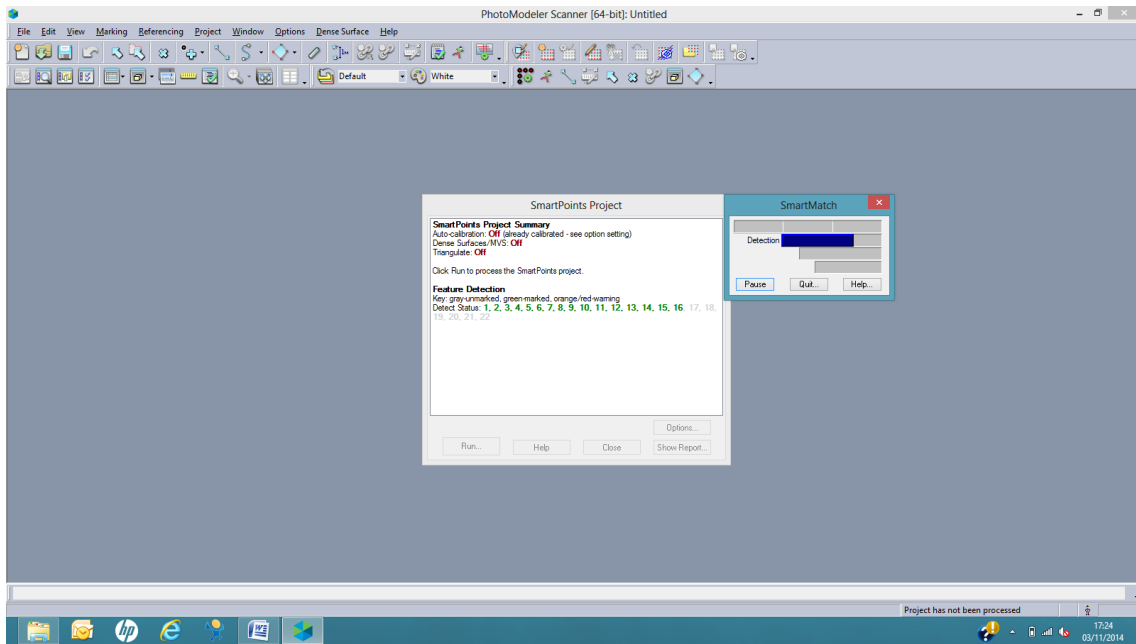


Figura 31 Identificación de puntos coincidentes entre imágenes y orientación de las fotografías realizada de manera automática por el propio software Photomodeler

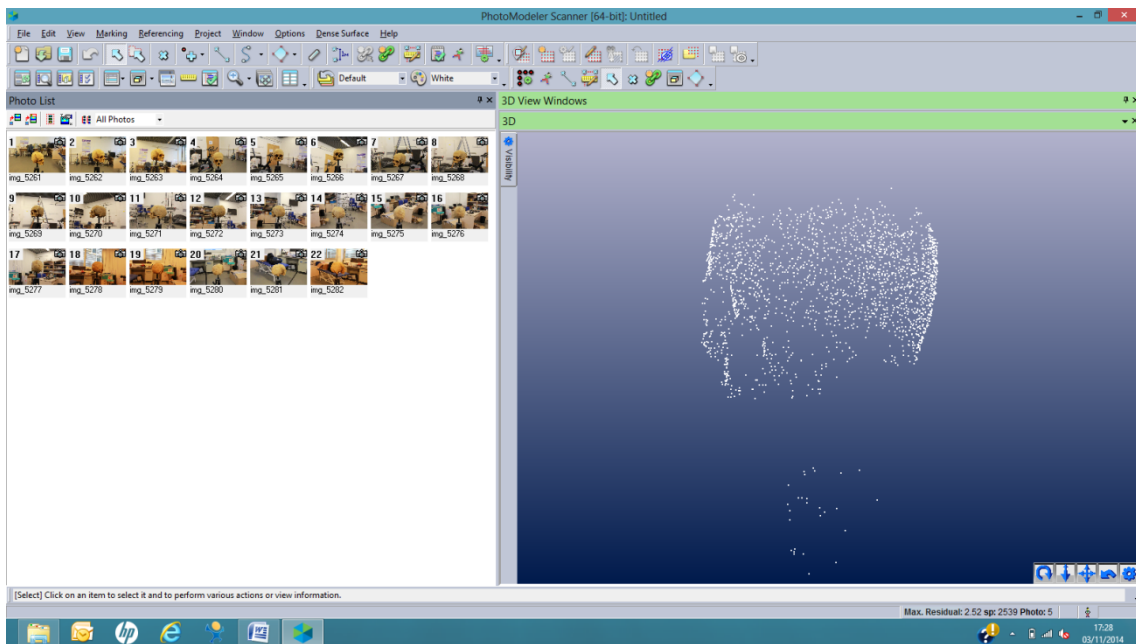


Figura 32 Primera aproximación de la nube de puntos generada. La imagen muestra el conjunto de puntos coincidentes de entre el total de fotografías capturadas encontrados por el sistema; dichos puntos serán utilizados como base para la obtención de la malla densa final

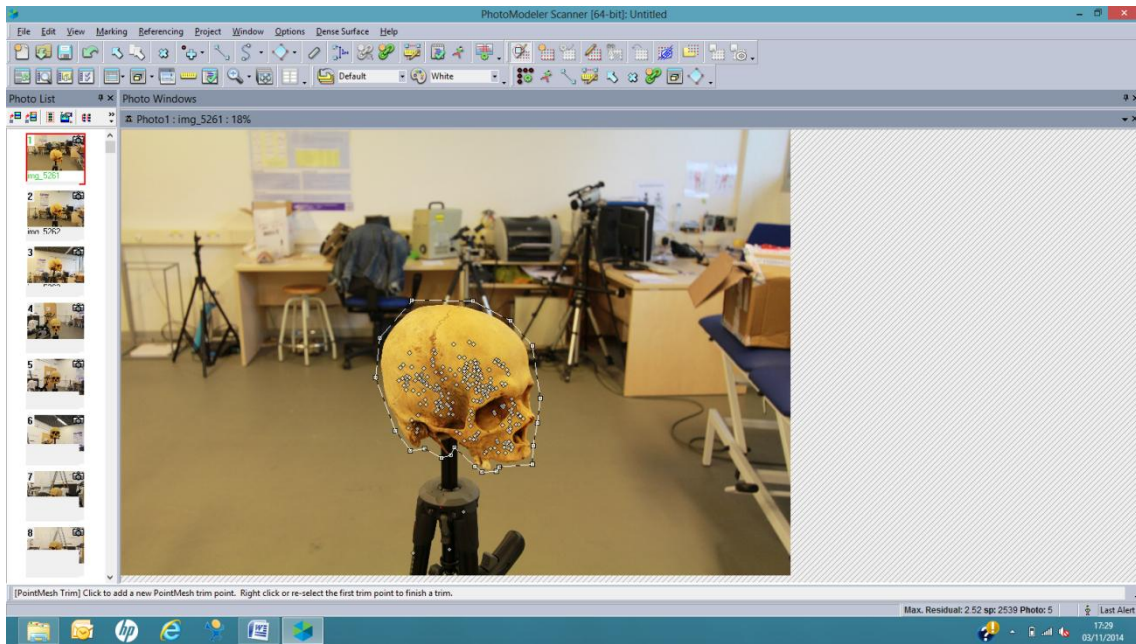


Figura 33 Selección de la zona concreta de la imagen sobre la que se quiere que Photomodeler centre la implementación de los algoritmos destinados a la generación de la malla tridimensional final

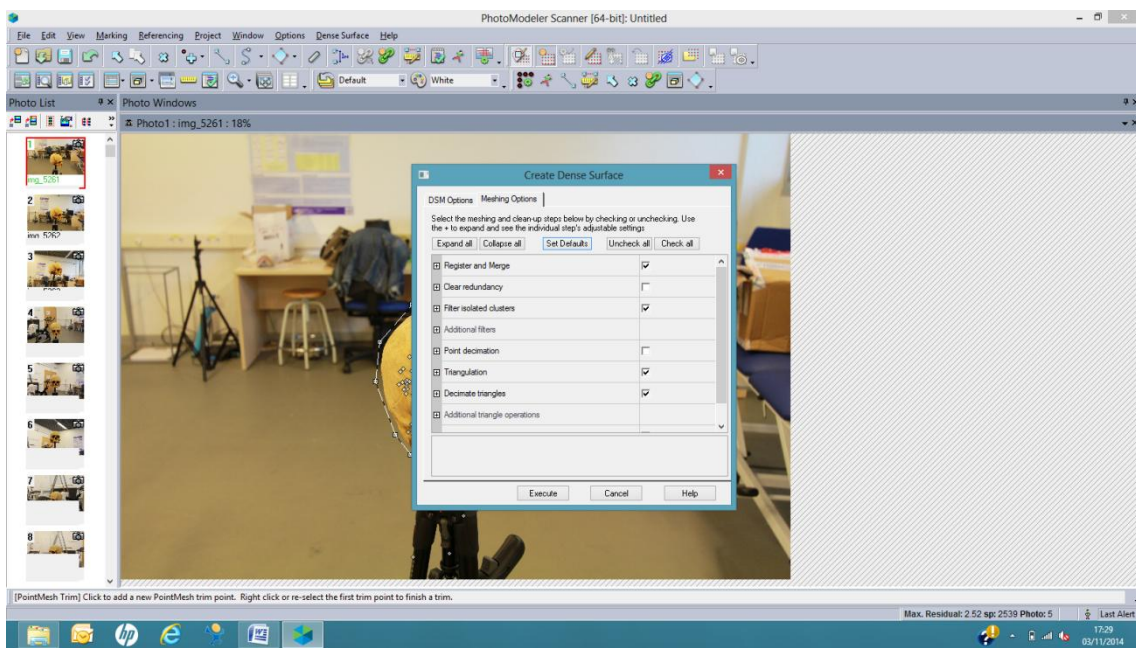


Figura 34 Procesado de la malla tridimensional

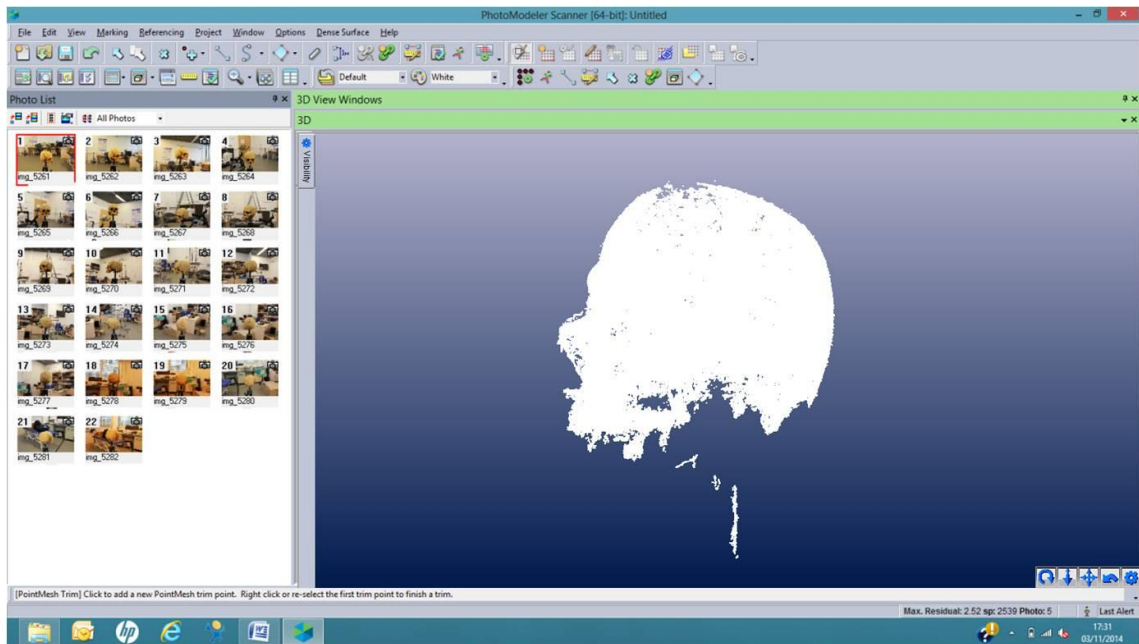


Figura 35 Malla tridimensional finalmente obtenida (sin textura)

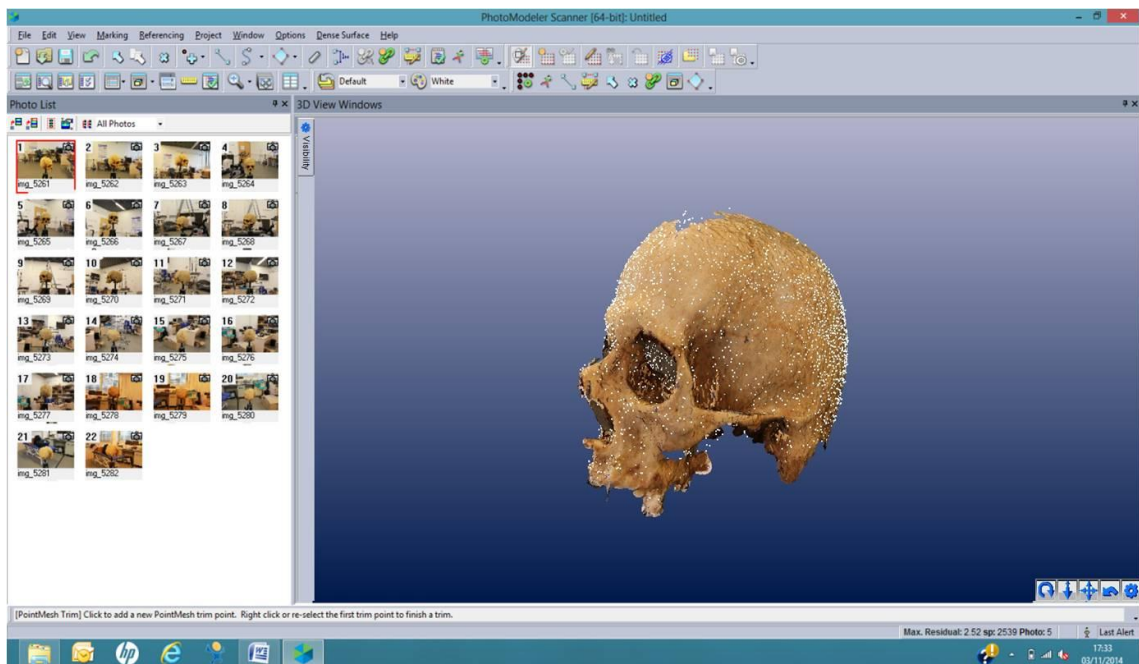


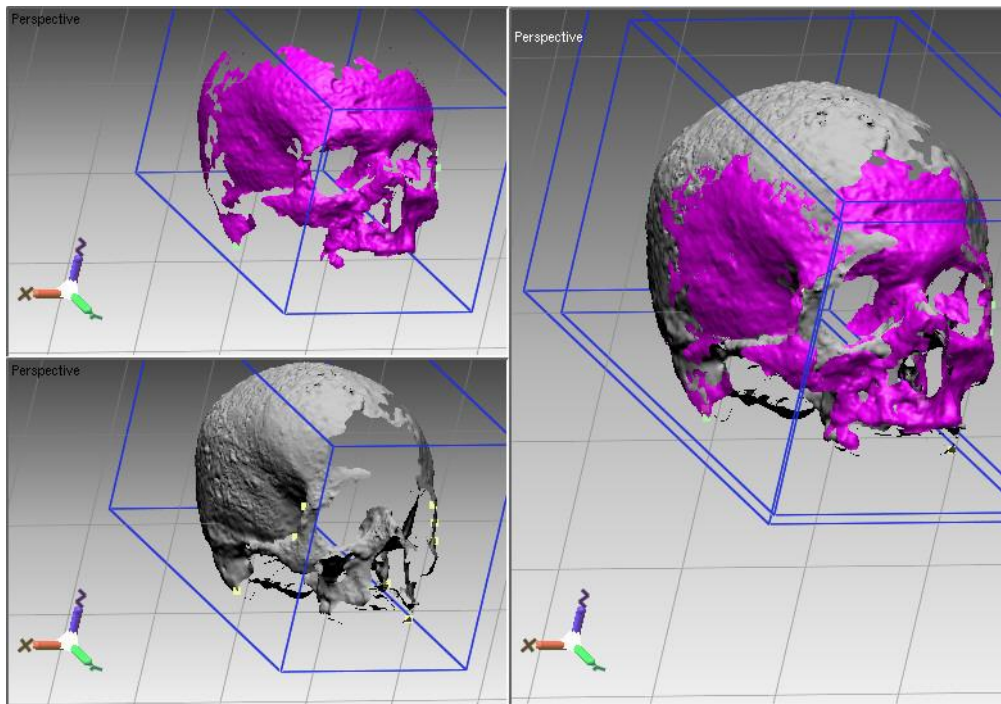
Figura 36 Malla tridimensional finalmente obtenida (con textura)

#### 7.4.1.3. Unión de mallas

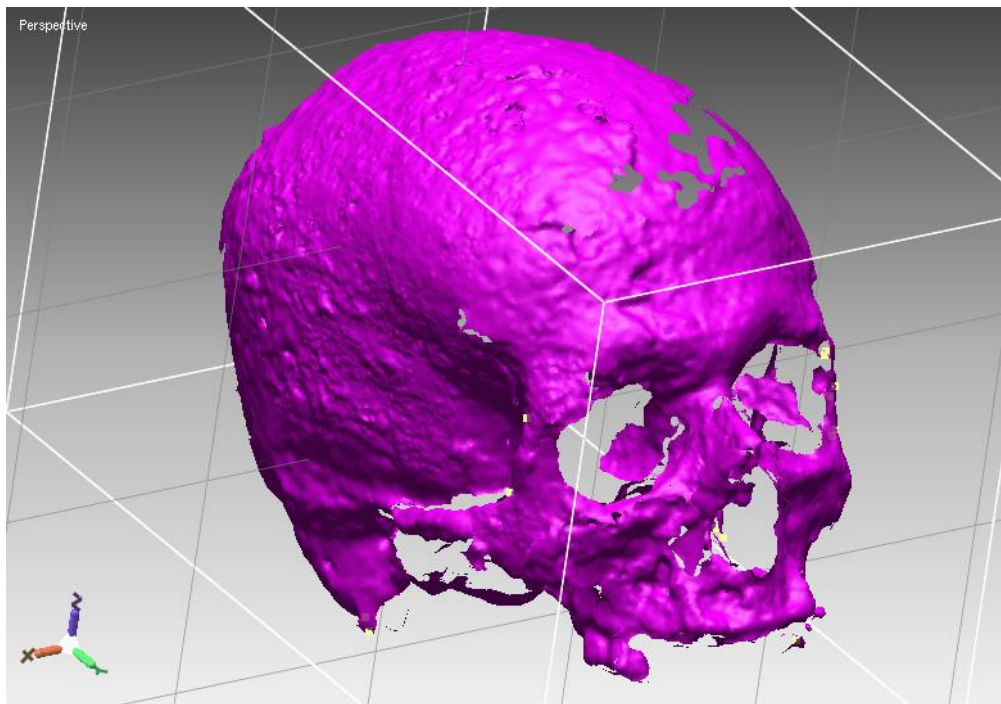
Generada una malla tridimensional para cada uno de los dos proyectos llevados a cabo por cráneo, tal y como se planteó en la sección 4.4.1.1, se abordó la unión de ambas a fin de generar el correspondiente modelo craneal completo.

Tal operación fue llevada a cabo mediante el uso del software de modelado 3D Rapidform gracias al cual, mediante determinación de puntos coincidentes entre ambas mallas, pudo llevarse a cabo la fusión de las mismas reconstruyéndose así el volumen craneal total.

Las figuras 37 y 38 respectivamente, muestran el proceso de relación entre mallas mediante establecimiento de puntos coincidentes así como el modelo craneal tridimensional finalmente obtenido.



*Figura 37 Relación mediante establecimiento de puntos coincidentes entre las dos mallas generadas para uno de los cráneos analizados.*



*Figura 38 Modelo craneal tridimensional obtenido finalmente tras la fusión de las mallas*

#### 7.4.2. Mediciones

El notable ruido y la dificultad observada para la reconstrucción de mallas tridimensionales homogéneas observados para los modelos resultantes tras la fusión de las mallas generadas mediante Photomodeler scanner, pusieron de manifiesto que los resultados obtenidos, si bien prometedores, no fueron a priori tan satisfactorios como inicialmente se esperaba y por ende no útiles de cara al establecimiento de medidas craneométricas de la necesaria calidad y objetividad.

Esto, unido al hecho de que como ya se planteó anteriormente objetivos adicionales de prioritaria resolución se han planteado a lo largo del trabajo y a cuyo estudio se ha dedicado una notable cantidad del tiempo total del presente proyecto, ha impedido ahondar más en profundidad en la obtención de escáneres de una mayor calidad así como en el uso de los mismos ante la toma de medidas; si bien es cierto que se plantea como una opción altamente probable a futuro el hecho de que, llegando a obtener escáneres de una mayor calidad, tanto la aplicación del procedimiento de orientación espacial en base a planos anatómicos estandarizados así como el establecimiento de *landmarks* con carácter indubitado de interés craneométrico planteados en el presente trabajo puedan ser procedimientos perfectamente válidos de aplicación también ante modelos tridimensionales generados mediante la técnica aquí planteada.

## 8. DISCUSIÓN

Tal y como se desprende ante una revisión del estado del arte, una tendencia generalizada dentro del ámbito antropológico forense hacia la búsqueda de metodologías de trabajo más objetivas y basadas en el uso de metodologías de trabajo más modernas con respecto a las convencionalmente utilizadas es observada.

Con el presente estudio se pretende ahondar en la viabilidad del uso de diferentes técnicas de reconstrucción de modelos 3D de cara a la obtención de modelos virtuales tridimensionales capaces de reproducir de una manera fiable la compleja morfología craneal así como el uso de los mismos para el establecimiento de nuevas metodologías de determinación de medidas craneométricas más objetivas y cualitativas.

Atendiendo a los resultados obtenidos puede establecerse que a priori, las tres técnicas implementadas son capaces de proporcionar resultados satisfactorios con respecto a la obtención de modelos digitales de un modo sencillo, reproducible y de relativo bajo coste, hechos especialmente notables en el caso de la fotogrametría convencional y el escáner 3D de superficie basado en luz estructurada. Algo menos satisfactorios en términos de reconstrucción han sido los resultados obtenidos para la obtención de escáneres 3D en base a fotografía, pues si bien inicialmente las mallas tridimensionales generadas mediante Photomodeler poseían aparentemente una alta calidad, el posterior tratamiento de las mismas mediante el software Rapidform de cara a unir los diferentes escáneres generados para un mismo cráneo generó mallas aquejadas de un alto nivel de ruido e inhomogeneidad. Sin embargo cabe destacar que, a pesar de estas observaciones y a la vista de los satisfactorios resultados proporcionados por Photomodeler con respecto a la generación de modelos, así como a la importante ventaja a nivel de reducción de costes que esta técnica podría suponer con respecto a alternativas como el escáner 3D de superficie convencional, no se descarta el uso de a futuro de la misma si bien más trabajo destinado a mejorar los protocolos de toma de imágenes o el procesado de las mismas se hace claramente necesario.

Con respecto a la implementación de estas nuevas tecnologías de cara a la homologación de medidas craneométricas cabe destacar que, como ya se hizo constar anteriormente, la aparición de objetivos alternativos en el transcurso de este proyecto, no previstos inicialmente pero a los cuales por su especial relevancia se ha dedicado una considerable cantidad de tiempo, ha hecho que un análisis exhaustivo al respecto no haya podido ser realizado.

Aun con todo, ciertas conclusiones si han podido extraerse en relación a la homología entre aquellas medidas obtenidas a través de los convencionales procedimientos de medición manual con respecto a las obtenidas por aplicación de fotogrametría convencional tal y como puede verse reflejado en el Anexo VI. Como se desprende de los resultados, una elevada correlación entre los valores obtenidos mediante ambas tecnologías es apreciable por lo que puede establecerse la semejanza en cuanto a resultados entre ambas, contando además con la ventaja adicional en el caso de la fotogrametría de una eliminación del error aleatorio asociado a su uso dada la posibilidad mediante dicha técnica de fijar de forma inalterada aquellos *landmarks* determinantes de las mediciones, hecho completamente inviable ante determinaciones manuales.

Por contraposición, decir que si bien la posibilidad de fijación de los citados *landmarks* en fotogrametría supone una gran ventaja con respecto a la medición manual, el establecimiento inicial mediante marcado de los mismos sobre la superficie craneal para su posterior digitalización no deja de estar influenciado por la subjetividad inherente a la propia pericia y conocimiento de la tarea a realizar por parte del operador. Esto, junto con el hecho de que se hace altamente dificultoso el establecimiento a posteriori de nuevos *landmarks* tras el procesado del modelo en caso de que el establecimiento de nuevos puntos no previstos de antemano se hiciesen necesarios, hacen augurar una no excesiva idoneidad de la fotogrametría a efectos de determinación inequívoca de *landmarks* y medidas craneométricas frente a otras posibles alternativas.

Por su parte, en relación al trabajo sobre aquellos modelos obtenidos tanto por escáner de superficie 3D como a partir de fotografía, si bien establecer medidas concretas a partir de los mismos no ha sido posible, cabe destacar que en ambos casos la metodología planteada en la sección 4.3.4.1 para el establecimiento de *landmarks* con carácter indubitado podría ser de aplicación, hecho que supondría una importante ventaja frente a los convencionales métodos manuales al estar basada su determinación en criterios matemáticos y geométricos acordes a las descripciones de los mismos recogidas en los manuales de antropología, pero prescindiendo de la valoración personal del observador en cuanto a su determinación. Tales determinaciones contarían además con el beneficio descrito anteriormente con relación a la aplicación de la fotogrametría de poder mantener fijados dichos puntos inalterados e inalterables a futuro eliminándose con ello el error aleatorio asociado a las mediciones, hecho que dotaría al método de un alto grado de reproducibilidad.

El otro gran objetivo del presente trabajo, inicialmente no planteado pero surgido durante el transcurso del mismo ha sido el establecimiento y evaluación de un procedimiento sistemático de orientación de modelos craneales tridimensionales en base al llamado Plano de Frankfurt por ser este un plano de referencia validado internacionalmente, tratando de proporcionar una metodología capaz de conseguir orientaciones con un mayor grado de precisión y reproducibilidad, y no influenciado por el grado de experiencia del operador.

Comparando los dos métodos aplicados para la orientación de los modelos (Método A vs Método F) y a la vista de los datos obtenidos para la comparación de sus varianzas, una gran similitud se desprende para las tres medidas evaluadas.

En los tres casos, los p-valores obtenidos fueron superiores al nivel de significación, permitiendo concluir que los resultados obtenidos mediante ambas metodologías fueron semejantes de una manera estadísticamente significativa. Así mismo, y dentro de la gran similitud entre los valores obtenidos para las desviaciones estándar en ambos métodos, se puede apreciar una tendencia a obtener resultados aquejados de una menor incertidumbre al aplicar el método propuesto. Dicho de otro modo, el Método F se presenta como una metodología ligeramente más precisa frente al Método convencional A.

A la vista de los resultados obtenidos se puede concluir que una orientación de los modelos craneales en base al Plano de Frankfurt mediante aplicación del Método F se muestra como capaz de lograr un grado de precisión no inferior, sino igual o incluso superior, en comparación con el método de orientación manual convencional.

Cabe exponer que, durante la realización de los procesos de orientación, todos los observadores presentaron ciertas dificultades en la extracción de los contornos correspondientes a los conductos auditivos al ser difícil establecer un límite entre oído externo e interno, hecho que probablemente haya repercutido en la obtención de mayores valores de desviación estándar en este caso para el método automatizado para los puntos Porion, con respecto al valor obtenido para el punto Orbital.

Se plantea como posibilidad a futuro, el poder establecer criterios objetivos alternativos encaminados a determinar de forma estandarizada y con mayor precisión, la localización de aquellos puntos que se prestan a una mayor posibilidad de interpretación lo que conferiría una mayor objetividad y fiabilidad al proceso, al liberarlo de posibles interpretaciones personales.

La comparativa inter-observador realizada sobre los dos operadores experimentados en el ámbito de la antropología (Obs 1 y Obs 2) apenas mostró diferencias, ni a nivel estadístico dado que los p-valores obtenidos siempre fueron superiores al nivel de significación, ni en relación a la precisión, a la vista de los similares valores de desviación estándar obtenidos entre ellos como puede verse reflejado en la Tabla 9.

Asimismo, y analizando ya por separado a estos dos observadores, se apreció una semejanza estadística en los valores independientemente del método utilizado, acompañado además de una sensible mejora en la mayoría de los casos para el dato de la desviación estándar al implementar el segundo método (Método F). A la vista de estos resultados puede interpretarse que, personal experimentado mediante la utilización del sistema asistido obtendría resultados mejores en cuanto a precisión, frente a los obtenidos mediante orientación manual. También cabe destacar que los resultados obtenidos fueron estadísticamente similares con independencia de la persona operante.

A su vez, el observador 3 considerado como analista novel, presentó resultados congruentes con los de los observadores 1 y 2, si bien afectados de una mayor imprecisión tanto para el método manual como para el alternativo F, observándose una cierta tendencia a mejorar la precisión tras la implementación del método digital.

Estos resultados permiten concluir que, el procedimiento aquí planteado proporciona un método preciso y reproducible de orientación de modelos digitales craneales incluso en el caso de ser aplicado por personas con escasa experiencia al respecto, si bien con el conocimiento necesario de anatomía y uso de la aplicación informática para garantizar la calidad de los resultados.



## 9. CONCLUSIONES

En base a lo expuesto anteriormente puede concluirse que las tres metodologías analizadas mediante el presente estudio se muestran como capaces de proporcionar resultados satisfactorios, tanto en relación al grado de reproducibilidad como de objetividad con relación a la obtención de modelos craneales tridimensionales, aunque de cara a un establecimiento de *landmarks* y medidas craneométricas de carácter indubitado más exactos y precisos, técnicas como el escáner 3D de superficie o el escáner basado en fotografía, se muestran como tecnologías de una aparentemente mayor aplicación; si bien es cierto que más trabajo destinado a establecer mejores protocolos de captura y procesado de datos de cara a obtener los modelos finales son necesarios a futuro, hecho especialmente importante en el segundo caso.

Con respecto al método aquí expuesto de orientación de modelos craneales digitales obtenidos mediante técnicas de escaneado, decir que ha demostrado ser capaz de lograr orientaciones espaciales de los modelos en relación al llamado Plano de Frankfurt de una manera sistematizada, con un alto grado de precisión, e independiente del grado de experiencia del operador que lo realice. Esto, junto con la posibilidad de guardar aquellas orientaciones realizadas constituyendo en consecuencia una información inalterable, hecho inviable en orientaciones sobre restos óseos in vivo, así como el hecho de que sea posible el desarrollo y programación de sistemas informáticos capaces de automatizar parcial o totalmente tales procesos disminuyendo con ello la intervención humana y en consecuencia la posibilidad de error, plantean las metodologías aquí descritas como palpables mejoras con respecto a aquellas existentes en la actualidad.

## 10. REFERENCIAS

1. Spencer F. *History of physical anthropology*. Taylor & Francis.; 1997.  
<http://books.google.es/books?id=QP8u1RHKQAUC>.
2. Gapert R, Last J, Black S. Test of age-related variation in the craniometry of the adult human foramen magnum region: Implications for sex determination methods. *Forensic Science, Medicine and Pathology*. 2013;9(4):478.
3. Kažoka D, Nagle E, Vetra J, Teibe U. Comparison of craniofacial measurements in various female ethnic groups. *Papers on Anthropology*. 2010;19:169.
4. Franklin D, Cardini A, Flavel A, Kuliukas A. Estimation of sex from cranial measurements in a western australian population. *Forensic Sci Int*. 2013;229(1-3):158.e1.
5. Kanchan T, Gupta A, Krishan K. Estimation of sex from mastoid triangle - A craniometric analysis. *Journal of Forensic and Legal Medicine*. 2013;20(7):855.
6. Coma JMR. Antropometría. In: *Antropología forense*. 2ª Edición ed. Madrid: MINISTERIO DE JUSTICIA.SECRETARIA GENERAL TÉCNICA.CENTRO DE PUBLICACIONES; 1999:123-129-155.  
<http://books.google.es/books?id=2AuuglB6JG8C>.
7. Stull KE, Tise ML, Ali Z, Fowler DR. Accuracy and reliability of measurements obtained from computed tomography 3D volume rendered images. *Forensic Sci Int*. 2014;238:133.
8. Fourie Z, Damstra J, Ren Y, Gerrits PO. Evaluation of anthropometric accuracy and reliability using different three-dimensional scanning systems. *Forensic Sci Int*. 2011;207(1-3):127.
9. Guyomarc'h P, Santos F, Dutailly B, Coqueugniot H, Desbarats P, Bou C. Three-dimensional computer-assisted craniometrics: A comparison of the uncertainty in measurement induced by surface reconstruction performed by two computer programs. *Forensic Sci Int*. 2012;219(1-3):221.
10. Franke-Gromberg C, Schüler G, Scheffler C, Hermanussen M. Digital 2D-photogrammetry and direct anthropometry - A comparing study on test accomplishment and measurement data. *Anthropologischer Anzeiger*. 2010;68(1):11.
11. Stephan CN, Guyomarc'h P. Quantification of perspective-induced shape change of clavicles at radiography and 3D scanning to assist human identification. *J Forensic Sci*. 2014;59(2):447.
12. Verna E, Piercecchi-Marti M-, Chaumoitre K, Bartoli C, Leonetti G, Adalian P. Discrete traits of the sternum and ribs: A useful contribution to identification in forensic anthropology and medicine. *J Forensic Sci*. 2013;58(3):571.

13. Stephan CN, Guyomarc'h P, Byrd JE, Amidan B, Trease H, Pulsipher T. Morphometric comparison of clavicle outlines from 3D bone scans and 2D chest radiographs: A shortlisting tool to assist radiographic identification of human skeletons. *J Forensic Sci.* 2014;59(2):306.
14. Geometric morphometric study of temporal variations in human crania excavated from the himrin basin and neighboring areas, northern iraq. . 2009;117(1):9.
15. Ozdemir ST, Cankur NS, Ercan I, Ozkaya G, Erdal YS. Geometric morphometric study and cluster analysis of late byzantine and modern human crania. *Coll Antropol.* 2010;34(2):493.
16. Rein TR, Harvati K. Geometric morphometrics and virtual anthropology: Advances in human evolutionary studies. *Anthropologischer Anzeiger; Bericht Über Die Biologisch-Anthropologische Literatur.* 2014;71(1-2):41.
17. Hackman L, Black S. Age estimation from radiographic images of the knee. *J Forensic Sci.* 2013;58(3):732.
18. Colombo A, Coqueugniot H, Dutailly B, Tillier A-, Desbarats P. New data on the development and age estimations of molars in children, using medical and 3D imaging: Contributions and perspectives. *Bulletins et Memoires de la Societe d'Anthropologie de Paris.* 2013;25(3-4):127.
19. Wink AE. Pubic symphyseal age estimation from three-dimensional reconstructions of pelvic CT scans of live individuals. *Journal of Forensic Sciences (Wiley-Blackwell).* 2014;59(3):696.
20. Chiba F, Makino Y, Motomura A, et al. Age estimation by quantitative features of pubic symphysis using multidetector computed tomography. *Int J Legal Med.* 2014;128(4):667.
21. Macaluso PJ. Sex discrimination from the acetabulum in a twentieth-century skeletal sample from france using digital photogrammetry. *HOMO- Journal of Comparative Human Biology.* 2011;62(1):44.
22. Gonzalez PN, Bernal V, Perez SI. Geometric morphometric approach to sex estimation of human pelvis. *Forensic Sci Int.* 2009;189(1-3):68.
23. Hemy N, Flavel A, Ishak N, Franklin D. Sex estimation using anthropometry of feet and footprints in a western australian population. *Forensic Sci Int.* 2013;231(1-3).
24. Djorojevic M, García-Parra P, Alemán I, Botella M, Roldán C. Morphometric sex estimation from 3D computed tomography os coxae model and its validation in skeletal remains. *Int J Legal Med.* 2014;128(5):879.
25. Abdel Fatah EE, Shirley NR, Jantz RL, Mahfouz MR. Improving sex estimation from crania using a novel three-dimensional quantitative method. *J Forensic Sci.* 2014;59(3):590.

26. Bongiovanni R, Spradley MK. Estimating sex of the human skeleton based on metrics of the sternum. *Forensic Sci Int.* 2012;219(1-3):290.e1.
27. Park HK, Chung JW, Kho HS. Use of hand-held laser scanning in the assessment of craniometry. *Forensic Sci Int.* 2006;160(2-3):200.
28. Sholts S,B., Wärmländer S,K.T.S., Flores L,M., Miller K,W.P., Walker P,L. Variation in the measurement of cranial volume and surface area using 3D laser scanning technology. *Journal of Forensic Sciences.* July 2010;55(4):871–876.
29. Yuan C, Wee KL, Thiam CL. Automatic identification of frankfurt plane and mid-sagittal plane of skull. *2012 IEEE Workshop on the Applications of Computer Vision (WACV).* 2012:233.
30. De Momi E, Chapuis J, Pappas I, et al. Automatic extraction of the mid-facial plane for cranio-maxillofacial surgery planning. *Int J Oral Maxillofac Surg.* 2006;35(7):636-642.
31. Van Sofie C, De Beule M, Verhegghe B, Okkerse W, Brijs G, Braem M. 3D cephalometry: A new approach for landmark identification and image orientation. *IFMBE Proceedings.* 2008;22:1442.
32. Kuzminsky SC, Gardiner MS. Three-dimensional laser scanning: Potential uses for museum conservation and scientific research. *Journal of Archaeological Science.* 2012;39(8):2744.
33. Ousley S, McKeown A. Three dimensional digitizing of human skulls as an archival procedure. *Human Remains: Conservation, Retrieval, and Analysis Proceedings.* 2001;S934:173-184.
34. Katz D, Friess M. Technical note: 3D from standard digital photography of human crania-a preliminary assessment. *Am J Phys Anthropol.* 2014;154(1):152.
35. Gaudio D, Gibelli D, Cerutti E, Cattaneo C, Galassi A, Di Giancamillo M. Does cone beam CT actually ameliorate stab wound analysis in bone? *Int J Legal Med.* 2014;128(1):151.
36. Cattaneo C, Sansoni G, Trebeschi M, Gibelli D, Porta D, Picozzi M. Feasibility of contactless 3D optical measurement for the analysis of bone and soft tissue lesions: New technologies and perspectives in forensic sciences. *J Forensic Sci.* 2009;54(3):540.
37. Evans S, Jones C, Plassmann P. 3D imaging for bite mark analysis. *Imaging Science Journal.* 2013;61(4):351.
38. Komar D, Davy-Jow S, Decker S. The use of a 3-D laser scanner to document ephemeral evidence at crime scenes and postmortem examinations. *J Forensic Sci.* 2012;57(1):188.
39. Buck U, Naether S, Thali M, Braun M. Haptics in forensics: The possibilities and advantages in using the haptic device for reconstruction approaches in forensic science. *Forensic Sci Int.* 2008;180(2-3):86.

40. Brzobohatá H, Velemínská J, Prokop J, Jančárek A, Horák M. Accuracy and benefits of 3D bone surface modelling: A comparison of two methods of surface data acquisition reconstructed by laser scanning and computed tomography outputs. *Coll Antropol.* 2012;36(3):801.
41. Sholts SB, Walker PL, Kuzminsky SC, Wärmländer SKTS, Miller KW. Identification of group affinity from cross-sectional contours of the human midfacial skeleton using digital morphometrics and 3D laser scanning technology. *J Forensic Sci.* 2011;56(2):333.
42. Zhulev EN, Gaivoronsky IV, Bogatova EA, Gaivoronskaya MG. Comparative analysis of the degree of variability in frankfurt, camper, HIP and occlusal planes in the facial skeleton. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta, Seriya 7: Geologia, Geografia.* 2013(3):159.
43. Coma JMR. Antropometría. In: *Antropología forense.* 2ª Edición ed. Madrid: MINISTERIO DE JUSTICIA.SECRETARIA GENERAL TÉCNICA.CENTRO DE PUBLICACIONES; 1999:123-181-183. <http://books.google.es/books?id=2AuuglB6JG8C;>
44. Cheng Y, Kheng Leow W, Chye Lim T. Automatic identification of frankfurt plane and mid-sagittal plane of skull. *Proceedings of IEEE Workshop on Applications of Computer Vision.* 2012:233.
45. Especificaciones técnicas artec™ eva 3D. <http://www.artec3d.com/es/hardware/artec-eva/specifications/>. Accessed Octubre 29, 2014.
46. <http://www.photodeler.com/products/how-it-works.html>.
47. [http://www.canon.es/For\\_Home/Product\\_Finder/Cameras/Digital\\_SLR/EOS\\_600D/](http://www.canon.es/For_Home/Product_Finder/Cameras/Digital_SLR/EOS_600D/).