



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería Geodésica,
Cartográfica y Topográfica

Evaluación comparativa de modelos 3D craneofaciales
utilizando dispositivos móviles y fotogrametría

Trabajo Fin de Máster

Máster Universitario en Ingeniería Geomática y Geoinformación

AUTOR/A: Quispe Enriquez, Omar Christian

Tutor/a: Lerma García, José Luis

CURSO ACADÉMICO: 2022/2023



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR
DE INGENIERÍA GEODÉSICA
CARTOGRÁFICA Y TOPOGRÁFICA

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA GEOMÁTICA Y GEOINFORMACIÓN

TRABAJO FINAL DE MÁSTER

“EVALUACIÓN COMPARATIVA DE MODELOS CRANEOFACIALES 3D UTILIZANDO DISPOSITIVOS MÓVILES Y FOTOGRAMETRÍA”

Autor: Omar Christian Quispe Enriquez

Tutor: José Luis Lerma García

2023

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi agradecimiento a mis abuelos Fedenciano E., Casimira C. Teofila C. y Jacinto Q. a mis padres Ana E. y Florian Q. así como a mi hermana Romina Q. por el apoyo incondicional que me brindaron en este camino. También quiero agradecer a mi tutor, José Luis Lerma, por su valiosa orientación y guía durante las diversas etapas de mi investigación. Además, no puedo dejar de mencionar a mis compañeros, quienes contribuyeron en gran medida a mi crecimiento personal y académico al compartir sus conocimientos y experiencias en clase.

COMPROMISO

"El presente documento ha sido realizado completamente por el firmante; no ha sido entregado como otro trabajo académico previo y todo el material tomado de otras fuentes ha sido convenientemente entrecomillado y citado su origen en el texto, así como referenciado en la bibliografía"

RESUMEN

Los modelos 3D craneofaciales se pueden utilizar hoy en día para diversos fines, como monitoreo craneal en infantes, análisis morfológicos craneales, educación e investigación médica, entre otros. Hoy en día, los escáneres 3D se utilizan ampliamente para determinar modelos 3D de distintas partes del cuerpo. Del mismo modo, utilizar teléfonos inteligentes con la fotogrametría de corto alcance se puede aplicar para construir modelos 3D craneofaciales. Otro enfoque alternativo para obtener un modelo 3D craneal es usar PhotoMeDAS (Photogrammetric Medical Deformation Assessment Solutions): una solución fotogramétrica basada en la nube de bajo costo que requiere una gorra codificada para analizar la deformación craneal del modelo 3D entregado.

El objetivo de este estudio fue evaluar comparativamente modelos 3D craneofaciales que fueron elaborados a partir del uso de dispositivos móviles y fotogrametría. Para el logro de este objetivo se evalúa 3 modelos craneofaciales 3D que se realizó a 6 personas voluntarias y 2 maquetas de cabezas. Para ello se utilizó el smartphone Samsung S22. Se brindó la instrucción a las personas voluntarias para que permanecieran quietas durante el proceso de recopilación de datos para minimizar cualquier error en la construcción del modelo. En la fase de adquisición de datos se utilizó el mismo teléfono inteligente Samsung S22, en modo cámara a 3000 x 4000 píxeles y en el modo video a 1080x1920 píxeles a 30 fps. Además, se utilizó también PhotoMeDAS para registrar el área craneal poco después durante la misma sesión. El escáner 3D de luz estructurada ACADEMIA 50 se utilizó para controlar la exactitud de los 3 modelos 3D craneofaciales derivados.

En la etapa de procesamiento fotogramétrico, el software Agisoft Metashape (v.1.7.4) produjo la nube de puntos a alta resolución, filtrado por nivel de confianza, el mallado del modelo 3D y el modelo 3D texturizado final adquirido con las imágenes de la cámara y video del Samsung S22. Además, se utilizó la aplicación móvil PhotoMeDAS (v. 1.7) para obtener un modelo craneal 3D del modelo voluntario.

Se llevó a cabo un proceso de referenciación de los diferentes modelos 3D en un sistema de referencia de coordenadas único establecido por el sistema de coordenadas del escáner 3D ACADEMIA 50 de cada modelo estudiado. El software CloudCompare (v. 2.11.3) se utilizó para evaluar la morfología y precisión de los 3 modelos (cámara Samsung Galaxy S22, video Samsung Galaxy S22 y aplicación PhotoMeDAS instalada también en el Samsung Galaxy S22) con respecto al modelo 3D proveniente del ACADEMIA 50.

La comparativa de distancias entre modelos de mallado en promedio general (8 voluntario con 4 modelos de cabeza por cada voluntario) para el procedimiento de la cámara se indica un promedio de 0.22 ± 1.29 mm, para el caso del video 0.47 ± 1.43 mm y para el caso de PhotoMeDAS 0.39 ± 1.02 mm. Respecto a la comparativa de los puntos referenciales anatómica se realizó un análisis estadístico (t-student) para analizar la equivalencia de distancia según el procedimiento se obtiene que con la cámara es de 0.75mm, en el caso del video es de 1mm y para el caso de PhotoMeDAS 1.25mm.

Este trabajo permite proponer la integración de fotogrametría con cámara de video y PhotoMeDAS para la obtención de un modelo integral de cráneo y facial lo cual es esencial en diversas áreas de la medicina y puede tener un impacto significativo en la planificación y realización de tratamientos y terapias, así como en la identificación de enfermedades y trastornos. Es importante seguir mejorando estas técnicas y tecnologías para garantizar una mayor precisión y confiabilidad en las mediciones realizadas.

Palabras clave: Modelos 3D | craneofacial | dispositivos móviles | fotogrametría

ABSTRACT

Craniofacial 3D models can be used today for various purposes, such as cranial monitoring in infants, cranial morphological analysis, medical education, and research, among others. Today, 3D scanners are widely used to determine 3D models of distinct parts of the body. Similarly, using smartphones with short-range photogrammetry can be applied to build craniofacial 3D models. Another alternative approach to obtaining a cranial 3D model is to use PhotoMeDAS (Photogrammetric Medical Deformation Assessment Solutions): a low-cost cloud-based photogrammetric solution that requires a coded cap to analyze the cranial deformation of the delivered 3D model.

The objective of this study was to comparatively evaluate craniofacial 3D models that were elaborated from the use of mobile devices and photogrammetry. To achieve this objective, 3 3D craniofacial models were evaluated, which were made to six volunteers and two models of heads. For this, the Samsung S22 smartphone was used. Volunteers were instructed to remain still during the data collection process to minimize any errors in the construction of the model. In the data acquisition phase, the same Samsung S22 smartphone was used, in camera mode at 3000 x 4000 pixels and in video mode at 1080x1920 pixels at 30 fps. In addition, PhotoMeDAS was also used to record the cranial area shortly after during the same session. The ACADEMIA 50 structured light 3D scanner was used to check the accuracy of the three derived craniofacial 3D models.

In the photogrammetric processing stage, Agisoft Metashape software (v.1.7.4) produced the high-resolution point cloud, filtered by confidence level, the meshing of the 3D model and the final textured 3D model acquired with the camera images and video of the Samsung S22. In addition, the PhotoMeDAS mobile application (v. 1.7) was used to obtain a 3D cranial model of the volunteer model.

A referencing process of the different 3D models was carried out in a unique coordinate reference system established by the coordinate system of the 3D scanner ACADEMIA 50 of each model studied. CloudCompare software (v. 2.11.3) was used to evaluate the morphology and accuracy of the three models (Samsung Galaxy S22 camera, Samsung Galaxy S22 video and PhotoMeDAS application also installed on the Samsung Galaxy S22) with respect to the 3D model from the ACADEMIA 50.

The comparison of distances between meshing models in general average (8 volunteer with 4 head models for each volunteer) for the camera procedure indicates an average of 0.22 ± 1.29 mm, for the case of video 0.47 ± 1.43 mm and for the case of PhotoMeDAS 0.39 ± 1.02 mm. Regarding the comparison of the anatomical reference points, a statistical analysis (t-student) was carried out to analyze the equivalence of distance according to the procedure it is obtained that with the camera it is 0.75mm, in the case of the video it is 1mm and for the case of PhotoMeDAS 1.25mm.

This work allows us to propose the integration of photogrammetry with video camera and PhotoMeDAS to obtain a comprehensive model of skull and facial which is essential in various areas of medicine and can have a significant impact on the planning and realization of treatments and therapies, as well as in the identification of diseases and disorders. It is important to continue improving these techniques and technologies to ensure greater accuracy and reliability in the measurements made.

Keywords: 3D models | craniofacial | mobile devices | photogrammetry

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquemas de deformidad craneal.	12
Figura 2. Clasificación de deformaciones craneales	13
Figura 3. Dimensiones antropométricas.....	13
Figura 4. Distribución de posicionamiento de toma de imágenes.	15
Figura 5. Cabeza con gorro PhotoMeDAS y 3 pegatinas.....	15
Figura 6. Productos obtenidos con PhotoMeDAS.....	16
Figura 7. Visualización del modelo 3D generado por PhotoMeDAS.	16
Figura 8. Uso de escáner 3D ACADEMIA50.....	17
Figura 9. Visualización de nube de puntos densa utilizando Agisoft Metashape.	18
Figura 10. Plataforma de acceso y descarga de aplicativo PhotoMeDAS	18
Figura 11. Capelina con ArUcos y sticker.	19
Figura 12. Característica general del equipo para el procesamiento fotogramétrico.	19
Figura 13. Escáner 3D ACADEMIA 50.....	20
Figura 14. Características del escáner 3D ACADEMIA 50.	20
Figura 15. Modelo 3D obtenido con escáner ACADEMIA 50, importado en CloudCompare.	21
Figura 16. Esquema metodológico del desarrollo de la investigación.....	22
Figura 17. Capelina con ArUcos para PhotoMeDAS y sticker circulares para el escáner 3D.	23
Figura 18. Proceso de calibración software VXelement.....	24
Figura 19. Configuración del Laser Escáner	24
Figura 20. Desarrollo del escaneado 3D.....	24
Figura 21. Características de fotografía.	25
Figura 22. Características del video.	25
Figura 23. Desplazamiento del móvil para la toma de datos.....	26
Figura 24. Toma de datos con PhotoMeDAS.....	26
Figura 25. Código para la conversión de video a frame.....	27
Figura 26. Comparativo de visualización de imágenes	28
Figura 27. Calibración de cámara:	29
Figura 28. Configuración del procedimiento alineación de las imágenes.....	30
Figura 29. Configuración de la construcción de nube puntos densa.....	30
Figura 30. Nube de puntos densa sin filtrar. Visualización del índice de confianza.	31
Figura 31. Aplicación del filtro de confianza.	31
Figura 32. Asignación de la nube de puntos	32
Figura 33. Configuración de parámetros del mallado.....	32
Figura 34. Proceso de construcción del modelo texturizado.....	33
Figura 35. Resultado del proceso de texturizado.	33
Figura 36. Visualización del modelo 3D generado por PhotoMeDAS.	34
Figura 37. Extracción de las coordenadas de referencia XYZ	35
Figura 38. Referenciación del modelo PhotoMeDAS.....	35
Figura 39. Comparativo del mallado y del texturizado en la vista frontal.	36
Figura 40. Comparativo del mallado y del texturizado en la vista lateral izquierda.	36
Figura 41. Comparativo del mallado y texturizado en la vista posterior.	37
Figura 42. Comparativo del mallado y texturizado en la vista lateral derecha.	37
Figura 43. Comparativo del mallado y texturizado en la vista superior.	38
Figura 44. Comparativo del mallado y texturizado en la vista perspectiva.....	38
Figura 45. Comparativo de distancia entre modelos 3D – Modelo 3R.	40
Figura 46. Comparativo de distancia entre modelos 3D – Modelo 3R.	40
Figura 47. Comparativo de distancia entre modelos 3D – Voluntario 1.	41
Figura 48. Comparativo de distancia entre modelos 3D – Voluntario 2.	41
Figura 49. Comparativo de distancia entre modelos 3D – Voluntario 3.	42
Figura 50. Comparativo de distancia entre modelos 3D – Voluntario 4.	42
Figura 51. Comparativo de distancia entre modelos 3D – Voluntario 5.	43
Figura 52. Comparativo de distancia entre modelos 3D – Voluntario 6.	43
Figura 53. Histograma y distribución Gauss - Modelo R.....	44
Figura 54. Histograma y distribución Gauss - Modelo J.....	45
Figura 55. Histograma y distribución Gauss – Voluntario 1.	46
Figura 56. Histograma y distribución Gauss – Voluntario 2.	47
Figura 57. Histograma y distribución Gauss – Voluntario 3.	48
Figura 58. Histograma y distribución Gauss – Voluntario 4.	49
Figura 59. Histograma y distribución Gauss – Voluntario 5.	50
Figura 60. Histograma y distribución Gauss – Voluntario 6.	51
Figura 61. Zonificación de la cabeza. Elaboración propia.....	52

"Evaluación comparativa de modelos craneofaciales 3D utilizando dispositivos móviles y fotogrametría"

Figura 62. Obtención de coordenadas de los modelos referenciados para cámara y video.....	53
Figura 63. Comparativo de resolución de enmallado cámara y video.....	55
Figura 64. Comparativo de densidad de puntos cámara y video.....	55
Figura 64. Comparativo de error de reproyección de textura cámara y video.....	56
Figura 65. Comparativo de GSD cámara y video.....	56
Figura 67. Resumen de error de referenciación entre modelos - Cámara.....	57
Figura 68. Resumen de error de referenciación entre modelos – Video.....	58
Figura 68. Comparativo de factor de escala - PhotoMeDAS.....	59
Figura 70. Comparativa grafica respecto a la distancia entre modelos mallados 3D.....	60
Figura 71. Comparativo de caras utilizadas en el mallado del cráneo.....	61
Figura 72. Resumen comparativo de distancias entre modelos – Cámara.....	66
Figura 73. Resumen comparativo de distancias entre modelos – Video.....	67
Figura 74. Resumen comparativo de distancias entre modelos – PhotoMeDAS.....	67
Figura 75. Comparativo de distancias de puntos de referencia anatómica en la cabeza entre modelos.....	68
Figura 76. Comparativo de distancias de puntos de referencia anatómica por zona.....	68
Figura 77. Evaluación de la Hipótesis según el instrumento de análisis.....	69
Figura 78. Comparativo de distancia promedio mallado, considerando los 8 casos.....	70
Figura 79. Comparativo de distancia promedio de puntos de referencia anatómica, considerando los 8 casos.....	70
Figura 80. Comparativo de enmallado del área cubierta por la gorra – Modelo J.....	71
Figura 81. Comparativo de texturizado – Modelo J.....	71
Figura 82. Superposición de modelo 3D craneofacial obtenido con Smartphone y PhotoMeDAS.....	73

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Parámetros antropométricos. Extraído de (Enrique Colmenares-Guillén, 2018).....	14
Tabla 2. Características del móvil Samsung Galaxy S22.....	20
Tabla 3. Instrumentos y Tipo de dato recolectado.	23
Tabla 4. Comparativo de tiempo para la toma de datos.....	27
Tabla 5. Resumen de la toma de datos.	28
Tabla 6. Resumen de la calibración de la cámara con imágenes.	29
Tabla 7. Comparativa de tiempos.	54
Tabla 8. Resolución y densidad de puntos para el mallado de los modelos 3D.	54
Tabla 9. Comparativo de error de reproyección y Ground resolution entre la cámara y video.....	55
Tabla 9. Error residual en el proceso de referenciación del modelo – cámara.	57
Tabla 10. Error residual en el proceso de referenciación del modelo – Video.	58
Tabla 12. Factor de escala y RMS de los modelos PhotoMeDAS.	59
Tabla 13. Comparativa de distancia entre modelos.	60
Tabla 14. Comparativo del número de caras del mallado de los 4 modelos 3D	61
Tabla 15. Comparativa de puntos de referencia anatómica en la cabeza - Modelo R.	62
Tabla 16. Comparativa de puntos de referencia anatómica en la cabeza - Modelo J.	62
Tabla 17. Comparativa de puntos de referencia anatómica en la cabeza – Voluntario 1.....	63
Tabla 18. Comparativa de puntos de referencia anatómica en la cabeza – Voluntario 2.....	63
Tabla 19. Comparativa de puntos de referencia anatómica en la cabeza – Voluntario 3.....	64
Tabla 20. Comparativa de puntos de referencia anatómica en la cabeza – Voluntario 4.....	64
Tabla 21. Comparativa de puntos de referencia anatómica en la cabeza – Voluntario 5.....	65
Tabla 22. Comparativa de puntos de referencia anatómica en la cabeza – Voluntario 6.....	65
Tabla 23. Comparativo de parámetros estadísticos de puntos de referencia anatómica – Cámara.	66
Tabla 24. Comparativo de parámetros estadísticos de puntos de referencia anatómica – Video.....	66
Tabla 25. Comparativo de parámetros estadísticos de puntos de referencia anatómica –PhotoMeDAS.	67
Tabla 26. Resumen comparativo de distancia de puntos de referencia anatómicos.	68
Tabla 27. Resumen de evaluación de t-student de 2 colas para las diferentes metodologías.....	69
Tabla 28. Comparativa promedio de distancias de mallado.....	70

ÍNDICE GENERAL

1.	INTRODUCCIÓN	10
2.	PROBLEMA PLANTEADO	10
3.	OBJETIVOS	11
4.	JUSTIFICACIÓN	11
5.	MARCO TEÓRICO	12
5.1.	DEFORMIDAD DEL CRÁNEO	12
5.2.	MORFOMETRIA FACIAL	13
5.3.	MODELADO FOTOGRAMÉTRICO 3D	14
5.4.	PHOTOMEDAS	15
5.5.	MODELOS ESCANER 3D	16
6.	SOFTWARE Y MATERIALES	18
6.1.	SOFTWARE AGISOFT METASHAPE	18
6.2.	PHOTOMEDAS	18
6.3.	COMPUTADOR PARA PROCESAMIENTO FOTOGRAMÉTRICO	19
6.4.	MÓVIL ANDROID SAMSUNG S22 (FOTOGRAFÍAS Y VIDEO)	19
6.5.	ESCÁNER ACADEMIA 50	20
6.6.	CLOUDCOMPARE (VERSIÓN 2.12)	21
7.	METODOLOGÍA	22
7.1.	ESQUEMA DE LA METODOLOGÍA	22
7.2.	RECOLECCIÓN DE DATOS	23
7.2.1.	TOMA DE DATOS CON ESCANER ACADEMIA 50	23
7.2.2.	TOMA DE DATOS CON CÁMARA Y VIDEO DEL DISPOSITIVO MÓVIL	25
7.2.3.	TOMA DE DATOS CON PHOTOMEDAS	26
7.3.	RESUMEN DE TOMA DE DATOS	27
7.4.	CONSTRUCCIÓN DE LOS MODELOS 3D	27
7.5.	GENERACIÓN DE MODELOS CON AGISOFT METASHAPE	27
7.5.1.	PREPARACIÓN DE DATOS	27
7.5.2.	SELECCIÓN DE IMÁGENES PARA LA FOTOGRAMETRÍA	28
7.5.3.	COMPARATIVO DE IMÁGENES	28
7.5.4.	CALIBRACIÓN DE LA CÁMARA CON LAS IMÁGENES OBTENIDAS	29
7.5.5.	RESUMEN DE LA CALIBRACIÓN DE LA CÁMARA	29
7.5.6.	ORIENTACIÓN DE FOTOGRAFÍAS	30
7.5.7.	NUBE DE PUNTOS DENSA	30
7.5.8.	APLICACIÓN DE FILTRO DE ÍNDICE DE CONFIANZA	31
7.5.9.	ASIGNACIÓN DE LA NUBE DE PUNTOS CON MAYOR CONFIANZA A UN GRUPO	32
7.5.10.	CREACIÓN DEL MALLADO	32
7.5.11.	CREACIÓN DE LA TEXTURA	33
7.6.	PHOTOMEDAS	34

7.7. REFERENCIACIÓN DE MODELOS	35
7.8. COMPARATIVA VISUAL DEL MALLADO Y TEXTURIZADO	35
7.9. COMPARATIVA DE DISTANCIAS ENTRE MODELOS	39
7.10.HISTOGRAMAS DISTANCIAS ENTRE MODELOS	44
7.11.PUNTOS DE REFERENCIA ANATÓMICA EN LA CABEZA	52
7.12.COMPARATIVA DE PUNTOS DE REFERENCIA ANATÓMICA	52
8. RESULTADOS	54
8.1. COMPARATIVA DE TIEMPO	54
8.2. RESULTADO DE CONSTRUCCIÓN DE MODELO 3D CÁMARA Y VIDEO	54
8.2.1.MALLADO OBTENIDO CON CÁMARA Y VIDEO	54
8.3. RESPECTO AL TEXTURIZADO CON CÁMARA Y VIDEO	55
8.4. REFERENCIACIÓN FOTOGAMÉTRICO - CÁMARA	56
8.4.1.REFERENCIACIÓN FOTOGAMÉTRICO - CÁMARA	56
8.4.2.REFERENCIACIÓN FOTOGAMÉTRICO – VIDEO	57
8.4.3.COMPARATIVO DE REFERENCIACIÓN PHOTOMEDAS	58
8.5. COMPARATIVA DE DISTANCIA ENTRE MODELOS 3D	59
8.5.1.COMPARATIVA DE MODELOS EN CLOUDCOMPARE	59
8.5.2.COMPARATIVA DEL NÚMERO DE CARAS DE LOS MODELOS 3D	60
8.5.3.COMPARATIVA DE DISTANCIA DE PUNTOS DE REFERENCIA ANATOMICA EN LA CABEZA	61
8.6. CALCULO DE T STUDENT PARA LOS PUNTOS DE REFERENCIA ANATÓMICA	69
9. DISCUSIÓN	70
10. CONCLUSIONES	72
11. RECOMENDACIONES	72
12. REFERENCIAS	74

1. INTRODUCCIÓN

El presente Trabajo Fin de Máster (TFM) titulado "*Evaluación comparativa de modelos craneofaciales 3D utilizando dispositivos móviles y fotogrametría*" se presenta como para la obtención del título **en Ingeniería en Geomática y Geoinformación** por la Universitat Politècnica de València (UPV).

Asimismo, el TFM se ha desarrollado dentro de las actividades referentes a la BECA DE COLABORACIÓN TIPO B PARA ACTIVIDADES DE I+D+i DE LA UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA cuyo objetivo fue "Procesamiento y análisis de mediciones antropométricas en lactantes a partir de aplicaciones móviles", el cual se desarrolla en el **Grupo de Investigación en Fotogrametría y Láser Escáner (GIFLE)** que pertenece al Depto. Ing. Cartográfica, Geodesia y Fotogrametría (UPV).

Considerando la relevancia para los médicos pediatras y neurocirujanos de obtener con precisión la deformación craneal, GIFLE ha desarrollado una solución no invasiva y de bajo costo para monitorear la deformación craneal llamada PhotoMeDAS. Este sistema desarrollado ayuda a los expertos médicos a evaluar con precisión la deformación craneal y llegar a un diagnóstico.

La solución actual de **PhotoMeDAS** permite obtener un **modelo 3D** de la superficie craneal utilizando **una app en el dispositivo móvil, un gorro con marcas codificadas**, que cubre la superficie del cráneo. Es también requerido para el funcionamiento del sistema la colocación de 3 pegatinas codificadas ubicados al lado de las orejas y en entre las cejas. El resultado de este procedimiento es un **modelo 3D del área donde cubre el gorro**, de igual forma este sistema brinda un reporte con parámetros craneales, los cuales son de relevancia para el especialista médico y su historial clínico.

Ante la propuesta de mejora de PhotoMeDAS se plantea el uso de la fotogrametría y la videofotogrametría utilizando dispositivos móviles, para obtención modelos 3D de forma integral o complementaria a lo desarrollado en la versión de **PhotoMeDAS V1.7**, esto permitiría identificar *face landmarks* o puntos de referencia anatómica en la cabeza de toda la cabeza considerando la parte facial y la craneal integrada.

Si bien la propuesta de usar fotogrametría con dispositivos móviles es pertinente para su desarrollo, es necesario realizar **una evaluación comparativa de los modelos craneofaciales 3D obtenidos desde dispositivos móviles y fotogrametría** considerado comparar principalmente la distancia y resolución entre los modelos obtenidos.

La memoria que se desarrolla a continuación está dividida en dos partes: una **parte teórica**, sobre mediciones craneofacial, modelado 3D con móviles, PhotoMeDAS, escáner 3D y otra **parte práctica**, sobre los datos utilizados, así como la metodología seguida y los resultados obtenidos del trabajo realizado para la consecución de los objetivos del proyecto.

2. PROBLEMA PLANTEADO

La cuestión central abordada por este Trabajo de Fin de Máster radica en la comparación métrica de los modelos 3D generados a través de la técnica de fotogrametría móvil, empleando tanto la cámara como la grabación de video de dispositivos móviles inteligentes, junto con la tecnología PhotoMeDAS. Esta comparación se realizará en un grupo de participantes voluntarios, utilizando como punto de referencia los modelos 3D obtenidos a partir de un escáner 3D certificado. El escáner 3D certificado se asume que tiene una exactitud de al menos 0.25 mm, pero es esencial evaluar si las técnicas más accesibles como la fotogrametría móvil pueden acercarse a esta precisión.

3. OBJETIVOS

El objetivo general es evaluar comparativamente modelos 3D craneofaciales obtenidos a partir de dispositivos móviles y fotogrametría, en referencia al modelo escáner 3D.

Los objetivos específicos son:

- Obtener modelos 3D craneofaciales obtenidos a partir de dispositivos móviles (cámara y video) y técnicas fotogramétricas; así como el modelo craneal utilizando PhotoMeDAS.
- Referenciar los modelos craneofaciales 3D obtenidos con técnicas fotogramétricas.
- Comparar los modelos mallados cráneo faciales obtenidos a partir de la fotogrametría y el dispositivo móvil bajo diferentes configuraciones de cámara, así como la comparativa de puntos de referencia anatómico en la cabeza.

4. JUSTIFICACIÓN [JLL1][OCQE2]

La evaluación de los modelos craneofaciales 3D obtenidos utilizando dispositivos móviles y fotogrametría puede tener una relación directa o indirecta con varios Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) establecidos por las Naciones Unidas como parte de su Agenda 2030. Se mencionan la relación según lo siguiente:

ODS 3: Salud y bienestar: Los resultados de esta evaluación comparativa podrían tener implicaciones en la atención médica y el diagnóstico de afecciones craneofaciales. En caso de que se demuestra que los modelos obtenidos con dispositivos móviles y fotogrametría son precisos y confiables, podría facilitar el acceso a diagnósticos tempranos y tratamientos adecuados, mejorando así la salud y el bienestar de los pacientes.

ODS 4: Educación de calidad: Los modelos craneofaciales 3D pueden tener aplicaciones en la educación médica y la formación de profesionales de la salud. Si se establece que los dispositivos móviles y la fotogrametría son métodos efectivos para obtener estos modelos, podría facilitar la integración de esta tecnología en los programas de educación médica, mejorando así la calidad de la formación y la capacitación.

ODS 9: Industria, innovación e infraestructura: La evaluación comparativa de diferentes métodos para obtener modelos craneofaciales 3D implica la investigación y el desarrollo de tecnologías innovadoras. Si se encuentra que los dispositivos móviles y la fotogrametría son opciones viables, podría promover la adopción de estas tecnologías en la industria médica y estimular la innovación en la mejora de los procesos de atención médica y el diseño de dispositivos.

ODS 10: Reducción de las desigualdades: Si los resultados del estudio demuestran que los modelos craneofaciales 3D obtenidos con dispositivos móviles y fotogrametría son más accesibles y asequibles en comparación con otros métodos tradicionales, esto podría contribuir a reducir la brecha de acceso a servicios de salud de calidad y tecnologías médicas, especialmente en comunidades con recursos limitados.

La evaluación comparativa de modelos craneofaciales 3D utilizando dispositivos móviles y fotogrametría puede tener una relación directa o indirecta con varios Objetivos de Desarrollo Sostenible, como la salud y bienestar, la industria, innovación e infraestructura y la reducción de desigualdades. Esta evaluación puede contribuir a mejorar la calidad y sostenibilidad de los procedimientos clínicos y de investigación en el campo de la salud.

5. MARCO TEÓRICO

5.1. DEFORMIDAD DEL CRÁNEO

El cráneo es la estructura ósea que protege y encierra el cerebro, y está compuesto por varios huesos que se articulan entre sí para formar una estructura sólida. La deformidad del cráneo puede referirse a una variación anormal en la forma o estructura del cráneo, que puede ser congénita o adquirida debido a trauma, enfermedad o cirugía.

Las alteraciones de la forma del cráneo son un motivo frecuente de consulta, y suponen un reto para el clínico que las enfrenta. Es fundamental conocer los estudios iniciales que se deben realizar y cuál es el momento oportuno para derivar a los distintos especialistas (Luis Ibarra, 2022).

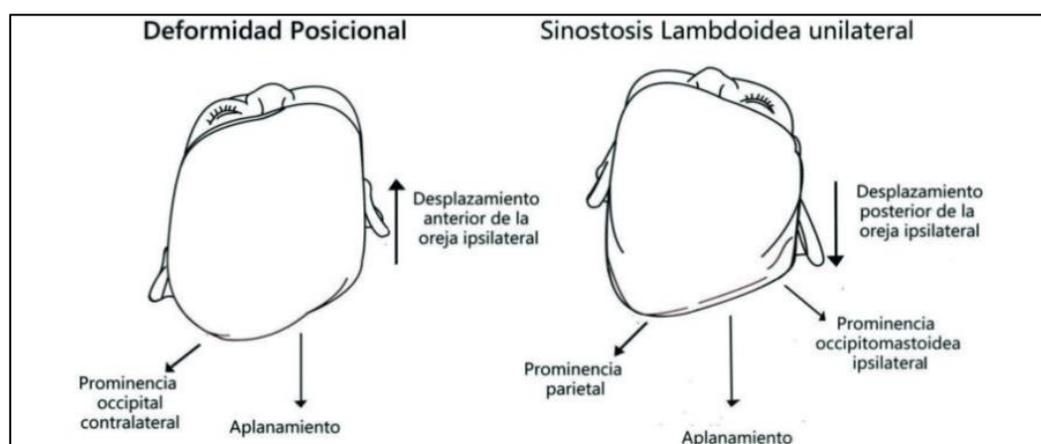


Figura 1. Esquemas de deformidad craneal (Luis Ibarra, 2022).

El cráneo de un bebé está formado por seis huesos craneales separados (el hueso frontal, el occipital, dos huesos parietales y dos huesos temporales). Estos huesos se mantienen unidos por tejidos elásticos, fibrosos y fuertes denominados suturas craneales. Durante el crecimiento estas suturas se fusionan hasta cerrarse por completo entre los 12 y 18 meses. Si las suturas y fontanelas se fusionan antes de tiempo, el cráneo no permitiría el crecimiento del cerebro provocando lesiones graves del sistema nervioso central. Las craneosinostosis pueden ser simples, cuando comprometen una sola sutura y múltiples; las primeras pueden clasificarse como (García-Tornel Florensa & Verde Sánchez, 2011):

- Escafocefalia: originada por cierre de la sutura sagital, es la forma más común correspondiendo al 60% de las sinostosis.
- Plagiocefalia anterior/posterior: generada por cierre unilateral de la sutura coronal (anterior, bregmática o frontal parietal) o de la sutura lambdoidea (posterior u occipito parietal).
- Trigonocefalia: ocasionada por compromiso de sutura metópica (entre los dos huesos frontales)

Las craneosinostosis múltiples se clasifican en:

- Braquicefalia: originada por cierre bilateral de las suturas coronales (figura 1d). Las braquicefalías posteriores leves pueden ser posicionales, pero si son severas son debidas a una sinostosis verdadera.
- Oxicefalia: generada por compromiso de las suturas coronal y sagital simultáneamente.

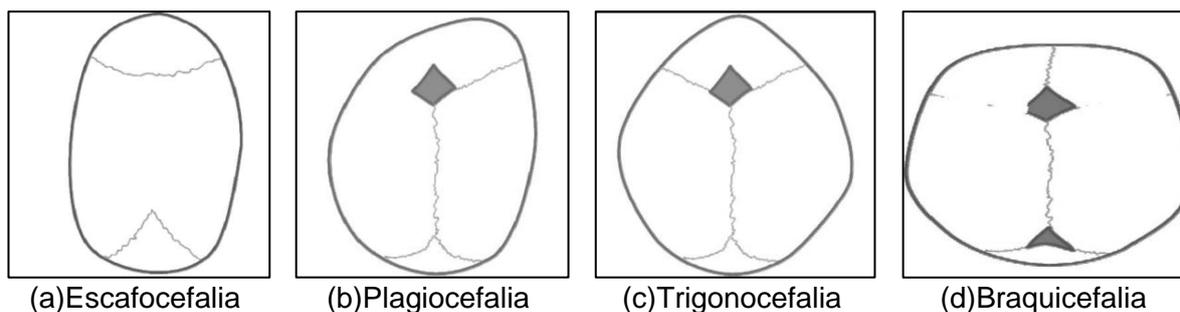


Figura 2. Clasificación de deformaciones craneales (García-Tornel Florensa & Verde Sánchez, 2011).

5.2. MORFOMETRIA FACIAL

Las características clínicas de la cara en el recién nacido son importantes en la detección de alteraciones en el crecimiento. En la exploración física del recién nacido el pediatra examina de forma metódica la cara para detectar cualquier alteración debida a trauma obstétrico y/o dismorfias faciales. En este contexto y con el objeto de contar con patrones de referencia para el diagnóstico de las características faciales de neonatos sanos, diferentes autores han estado interesados en describirlas (María Díaz-Romero et al., 2003).

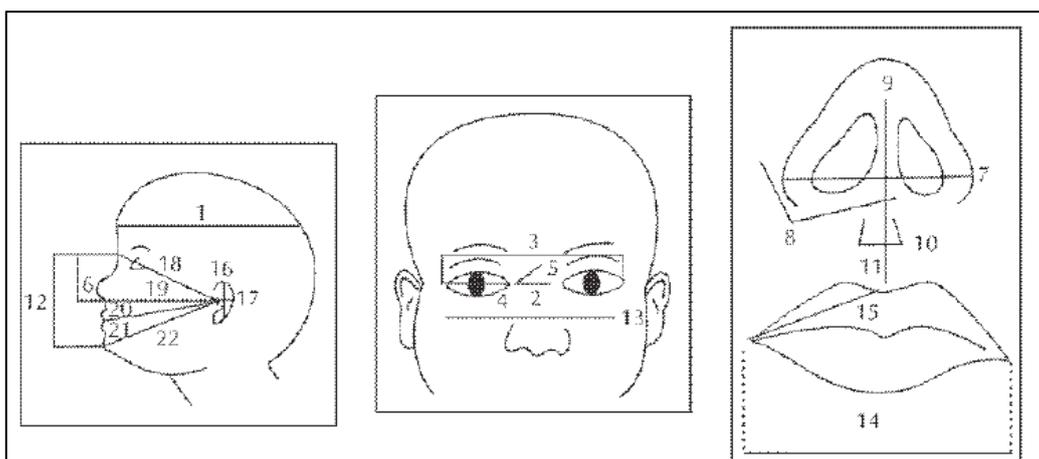


Figura 3. Dimensiones antropométricas (María Díaz-Romero, 2003)

- | | |
|----------------------------------|-------------------------------|
| 1. Perimetro cefálico | 12. Nasion mentón |
| 2. Distancia intercantal interna | 13. Distancia bicigomática |
| 3. Distancia intercantal externa | 14. Intercomisural |
| 4. Hendidura palpebral | 15. Línea media comisura oral |
| 5. Nasion canto interno | 16. Largo pabellón auricular |
| 6. Nasion base de la nariz | 17. Ancho pabellón auricular |
| 7. Ancho de la nariz | 18. Nasion trago |
| 8. Nasion ala de la nariz | 19. Canto externo trago |
| 9. Altura de la columnela | 20. Nasion -base de nariz |
| 10. Ancho del filtro | 21. Comisura oral trago |
| 11. Alto del filtro | 22. Mentón-trago |

Se propone un procedimiento que clasifica a un rostro en un rango de edad determinado. Para dicha propuesta se analizan teorías de crecimiento craneofacial y antropometría facial, derivando en una selección de parámetros antropométricos que representan características discriminantes para la distinción de rostros a diferentes edades (Enrique Colmenares-Guillén et al., 2018).

N.º Dist.	Descripción	Notación
1	Ancho intercantal	en-en
2	Ancho entre pupilas	p-p
3	Ancho de la frente	ft-ft
4	Ancho binocular	ex - ex
5	Ancho del rostro	zy-zy
6	Ancho de la mandíbula	go-go
7	Altura del rostro	tr-gn
8	Altura rostro	n-gn
9	Altura tercio superior del rostro	tr-n
10	Altura gnathion-endocathion	gn-en
11	Altura gnathion-exocanthion	gn-ex
12	Altura gnathion-palpebrale	gn-pi

Tabla 1. Parámetros antropométricos. Extraído de (Enrique Colmenares-Guillén, 2018)

5.3. MODELADO FOTOGRAMÉTRICO 3D

Desde los primeros días de la fotogrametría, ha habido fotogrametristas que han dirigido el esfuerzo de investigación hacia la medición médica. Aunque no siempre se ha revelado la motivación específica de estos estudios, probablemente se deba a los diversos beneficios que la fotogrametría puede ofrecer a la humanidad como un medio indoloro y no invasivo de proporcionar a los médicos mediciones espaciales relacionadas con el cuerpo humano (Mitchell & Newton, 2002).

El estudio "Comparación de mediciones antropométricas directa y con sistema de Figura 3D, en adultos jóvenes" se realizó un estudio descriptivo transversal en 81 voluntarios y se compararon las mediciones obtenidas con ambos métodos. Se encontró que no existió diferencia estadísticamente significativa entre los métodos utilizados, lo que sugiere que la antropometría facial indirecta medida en imágenes 3D es equivalente a la antropometría facial directa (Villanueva-Bonilla et al., 2018).

El modelado 3D con móviles desde imágenes se refiere a la técnica de crear una representación 3D de un objeto a partir de fotografías tomadas con un teléfono móvil u otro dispositivo similar. Esta técnica se basa en la fotogrametría, que es el proceso de medir y reconstruir objetos tridimensionales a partir de imágenes 2D.

Existen varias aplicaciones y herramientas que permiten el modelado 3D con móviles desde imágenes. Una de las más populares es Agisoft Metashape, que utiliza tecnología de fotogrametría y visión por computador para crear modelos 3D precisos y detallados a partir de fotos tomadas con móvil, las cuales deben estar correctamente distribuidos como se muestra en la Figura 4.

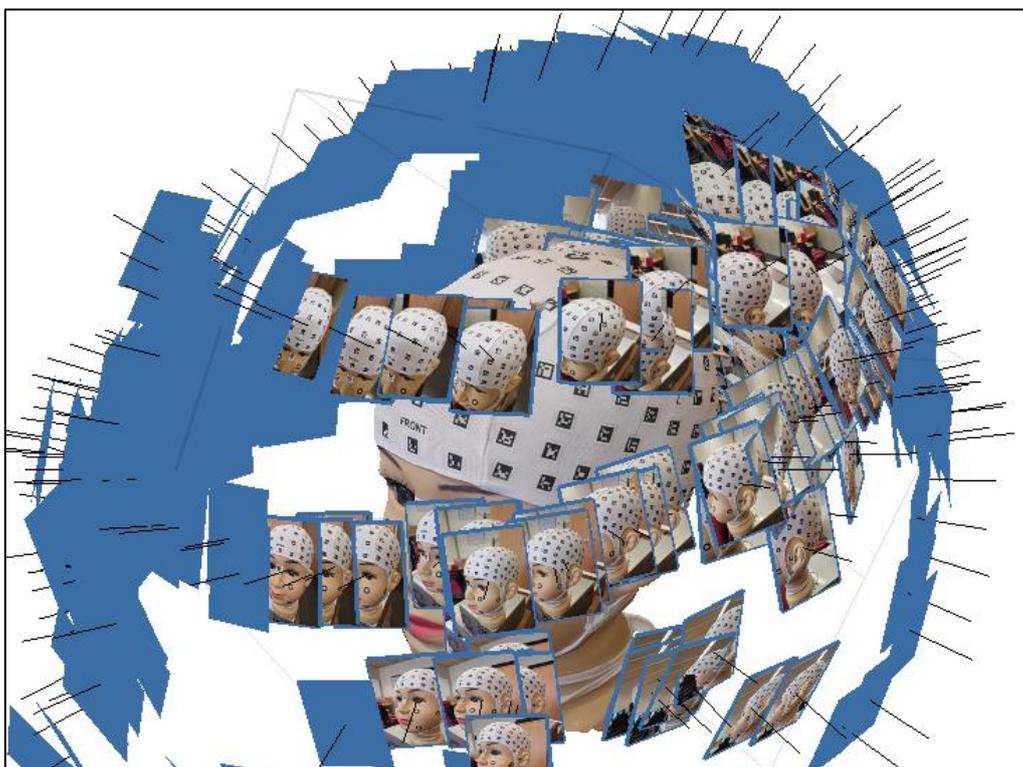


Figura 4. Distribución de posicionamiento de toma de imágenes.

5.4. PHOTOMEDAS

La aplicación de PhotoMeDAS (versión 1.7) junto con un gorro codificado permite obtener modelos 3D de la cabeza de lactantes de una forma fácil y económica usando un teléfono móvil y el procesado de los datos en un servidor, tratándose de una prueba no invasiva (Barbero-García, 2018).

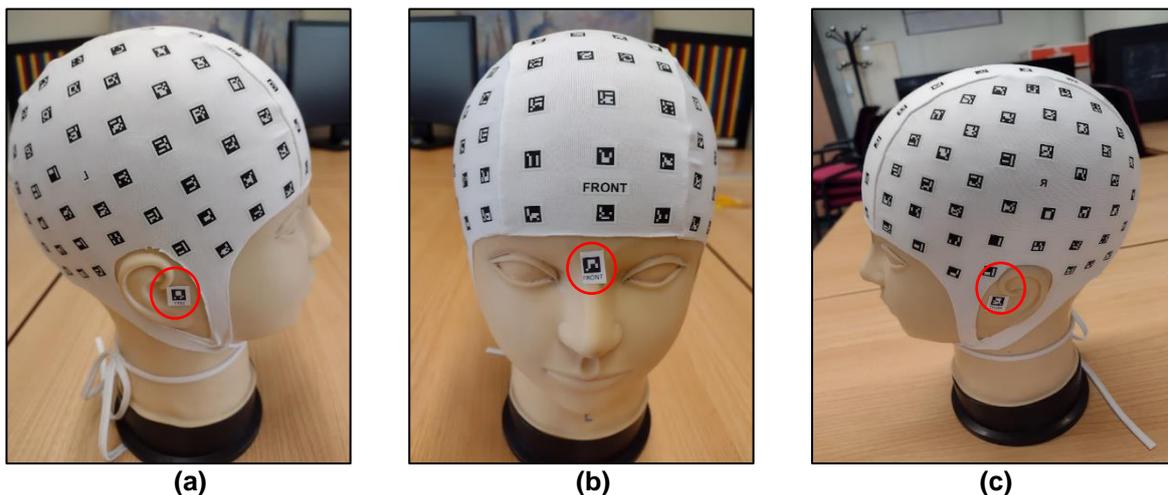


Figura 5. Cabeza con gorro PhotoMeDAS y 3 pegatinas: (a) Vista derecha; (b) Vista frontal; (c) Vista izquierda.

Es necesario para el uso de PhotoMeDAS colocar la gorra sobre la cabeza y las pegatinas según la Figura 5. Con el acceso y autorización obtenido en <https://photomedas.eu/>, se puede visualizar los productos (ver Figura 6) y el modelo 3D (ver Figura 7) obtenido de la superficie craneal con el procedimiento de PhotoMeDAS.

"Evaluación comparativa de modelos craneofaciales 3D utilizando dispositivos móviles y fotogrametría"

File	Action 1	Action 2
Results: PDF file with cranial deformation results and 3D model views	Download	Show PDF
Extended results: PDF file with more detailed cranial deformation results and 3D model views	Download	Show PDF
Resultados: Fichero PDF con los resultados de deformación craneal y vistas del modelo 3D	Descargar	Mostrar PDF
Informe extendido: Fichero PDF con resultados de deformación craneal más detallados y vistas del modelo 3D	Descargar	Mostrar PDF
3D model with ellipsoid distances: 3D model of the head with colours representing distances to an ideal ellipsoid (.PLY)	Download	Show model
Final 3D model of the head (.STL):	Download	

Figura 6. Productos obtenidos con PhotoMeDAS.

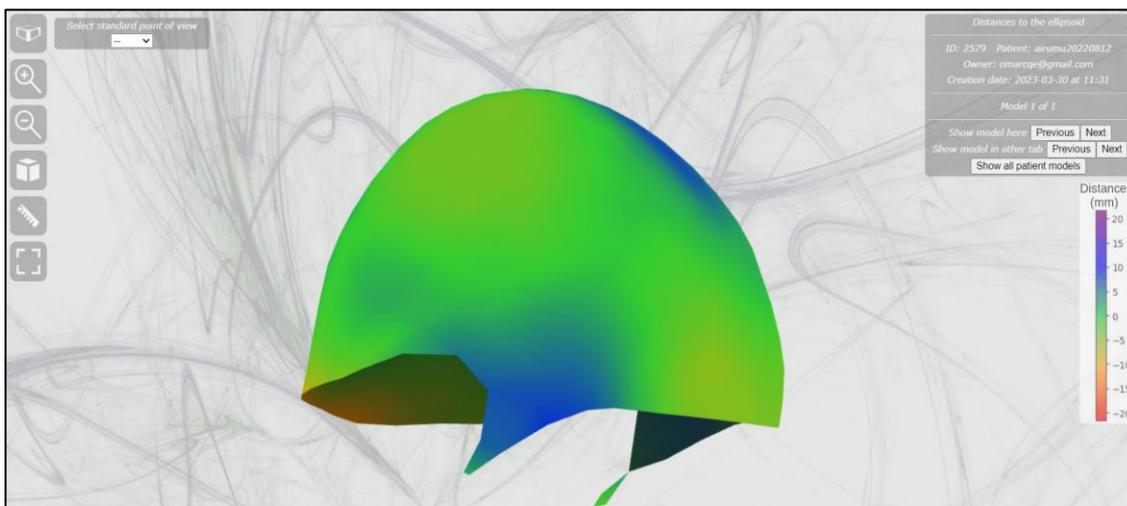


Figura 7. Visualización del modelo 3D generado por PhotoMeDAS.

5.5. MODELOS ESCANER 3D

En el estudio de (Nahles et al., 2018) participaron 44 niños (21 niñas, 23 niños) con una edad media de 8,8 meses, y se compararon los resultados de mediciones antropométricas convencionales y mediante escaneo 3D de la cabeza. No se encontraron diferencias significativas en el perímetro cefálico, pero sí en otros parámetros, y el método de escaneo fue más lento. Se concluyó que la cefalometría 3D no ofrece ventajas significativas en comparación con el método antropométrico convencional, y presenta desventajas en términos de costos técnicos y de adquisición.

El proceso de modelado 3D con láser escáner de ACADEMIA 50 generalmente comienza con el escaneo láser de un objeto físico utilizando un láser escáner de alta precisión. El escáner láser emite pulsos de luz que rebotan en la superficie del objeto y se registran en una computadora, creando una nube de puntos tridimensional que representa la superficie del objeto.

Luego, se utiliza un software especializado para procesar la nube de puntos y crear una representación 3D precisa del objeto escaneado. La representación 3D puede ser manipulada y visualizada en diferentes ángulos y planos, lo que puede ser útil para la identificación de anomalías o patologías.

Los modelos 3D escáner como el ACADEMIA 50 se utilizan en una variedad de aplicaciones en diferentes campos. Por ejemplo, un arquitecto puede utilizar el escaneo láser y el modelado 3D para crear modelos precisos de edificios u objetos existentes, lo que le permite visualizar mejor el espacio y diseñar modificaciones o mejoras. Un ingeniero puede utilizar la

"Evaluación comparativa de modelos craneofaciales 3D utilizando dispositivos móviles y fotogrametría"

técnica de escaneo láser y modelado 3D para crear modelos precisos de piezas de maquinaria, lo que puede ser útil en la fabricación y mantenimiento de maquinaria, así como la mejora o acondicionamiento de piezas como se muestra en la Figura 8.



Figura 8. Uso de escáner 3D ACADEMIA50.

6. SOFTWARE Y MATERIALES

6.1. Software Agisoft Metashape

Es un software de procesamiento de imágenes y fotogrametría que permite crear modelos 3D, mosaicos de ortofotos y mapas a partir de imágenes aéreas o terrestres. La versión 1.7 es una de las versiones más recientes del software, lanzada en octubre de 2021, esta versión incluye mejoras en el rendimiento y la estabilidad, así como nuevas características, como la posibilidad de ajustar la calidad de los modelos y la capacidad de procesar imágenes con iluminación desigual.

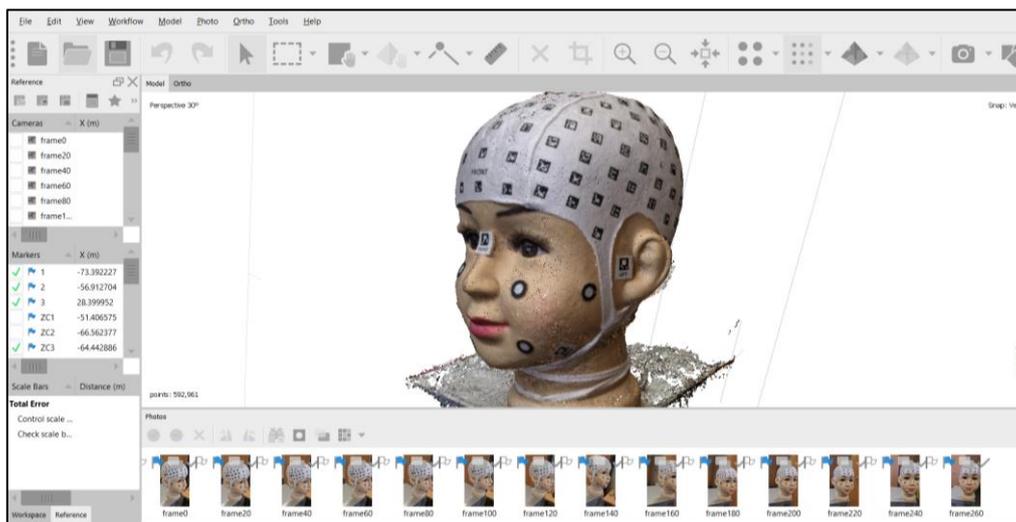


Figura 9. Visualización de nube de puntos densa utilizando Agisoft Metashape.

6.2. PhotoMeDAS

PhotoMeDAS (Versión 1.7) es una herramienta fotogramétrica que se utiliza para analizar la deformación craneal en lactantes. Fue desarrollada por el Grupo de Investigación de Fotogrametría y Escaneo Láser (GIFLE) del Departamento de Ingeniería Cartográfica, Geodesia y Fotogrametría de la Universitat Politècnica de València (UPV). Previa autorización del administrador del servidor se puede descargar el aplicativo (Figura 10).

- **Plataforma web de PhotoMeDAS**

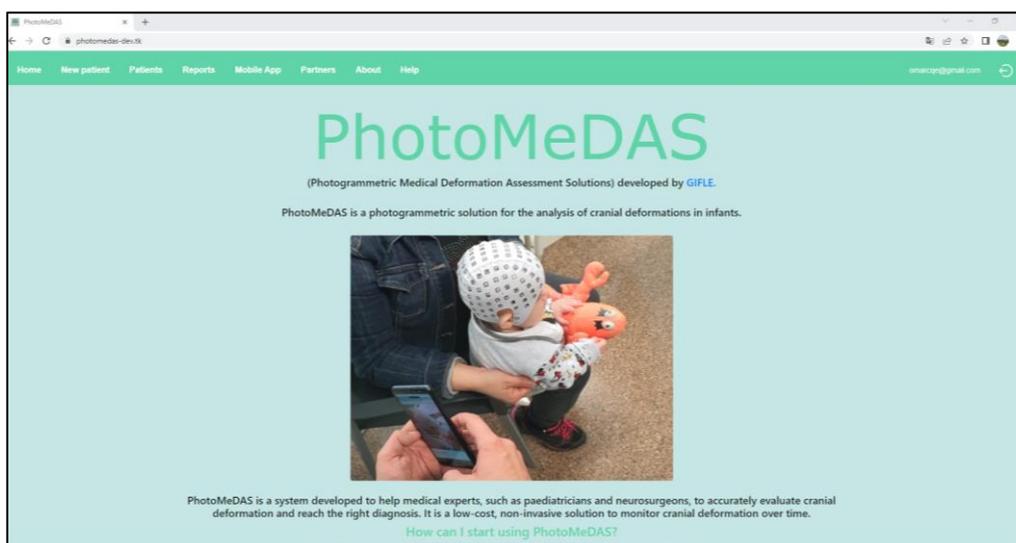


Figura 10. Plataforma de acceso y descarga de aplicativo PhotoMeDAS

- **Gorro con ArUcos y pegatinas**

Se refiere a una gorra de tela elástica que incluye 131 marcadores hechos de un material no elástico con el fin de prevenir deformaciones, ya que se utilizan para escalar el modelo generado.

Al paciente se le colocarán tres etiquetas, una en la parte superior de la nariz a la altura de los ojos, y las otras dos en los puntos preauriculares derecho e izquierdo, que se utilizan para registrar el modelo 3D en el sistema de coordenadas local. En este sistema, el eje Y se alinea con los puntos preauriculares y el eje X con el punto frontal y el centro de los preauriculares. Ver Figura 11.



Figura 11. Capelina con ArUcos y sticker.

6.3. Computador para procesamiento fotogramétrico

Para el procesamiento fotogramétrico se utilizó un procesador con 32 GB de memoria RAM, una tarjeta gráfica, un disco duro sólido, un monitor de alta resolución y un software especializado en fotogrametría (Figura 12). Debe ser capaz de manejar grandes cantidades de datos de imagen y realizar cálculos complejos de manera eficiente.

Las características del computador utilizado son:

System	
Software name	Agisoft Metashape Professional
Software version	1.7.4 build 12584
OS	Windows 64 bit
RAM	31.92 GB
CPU	Intel(R) Core(TM) i5-6600K CPU @ 3.50GHz
GPU(s)	NVIDIA GeForce GTX 1060 6GB

Figura 12. Característica general del equipo para el procesamiento fotogramétrico.

6.4. Móvil Android Samsung S22 (fotografías y video)

El móvil Android Samsung S22 describe las capacidades de la cámara de alta calidad del dispositivo para capturar imágenes y videos de alta resolución, junto con varias características avanzadas, como enfoque automático, estabilización de imagen y grabación en cámara lenta. Además, se menciona que el dispositivo cuenta con un sistema de edición integrado y la capacidad de compartir imágenes y videos directamente desde el dispositivo. Las características generales se muestran en la Tabla 2.

Característica	Descripción
Sistema	Sistema Operativo Android 12, Procesador Exynos 2200 Octa-Core , Seguridad Sensor de huella dactilar, Otros One UI 4.0
Conectividad	Red Móvil 5G , WIFI 802.11 a/b/g/n/ac , Bluetooth v 5.0 , NFC Sí
Pantalla	Tamaño 6.1" , Resolución 2340 x 1080px
Cámara	Frontal 10 MP, Trasera 50 MP, Extras Triple cámara trasera (50 + 12 + 10MP)
Memoria	Interna 128 GB, RAM 8 GB
Batería	Capacidad 3700 mAh
Medidas	Peso 167 gr , Alto 146 mm , Ancho 70.6 mm ,Grosor 7.6 mm

Tabla 2. Características del móvil Samsung Galaxy S22.

6.5. Escáner ACADEMIA 50

El escáner ACADEMIA 50 de luz estructurada es un dispositivo (Figura 13) de captura de datos 3D que utiliza la tecnología de luz estructurada para crear modelos 3D precisos y detallados de objetos físicos. El escáner está diseñado para ser utilizado en una variedad de aplicaciones, incluyendo la ingeniería inversa, el control de calidad, la inspección de piezas y la documentación de objetos patrimoniales. Las características generales se indican en la Figura 14.



Figura 13. Escáner 3D Academia 50.

Dimensiones	96x140x258 mm
Velocidad de medición	550 000 mediciones/s
Área de escaneado	380x380 mm
Fuente de luz	Luz blanca (LED)
Resolución	0,500 mm/m
Precisión	Hasta 0,250 mm
Distancia de seguridad	400 mm
Profundidad de campo	250 mm
Tamaño de las piezas (recomendado)	0,3 - 3 m
Software	VXModel + VXInspect
Rango de temperaturas de funcionamiento	15 - 40 °C
Rango de humedad de funcionamiento (sin condensación)	10 - 90 %
Escaneado en color	24 bits / De 50 a 150 DPI

Figura 14. Características del escáner 3D Academia 50.

6.6. CloudCompare (Versión 2.12)

CloudCompare es un software de código abierto para la visualización, edición y procesamiento de datos 3D. A continuación, se presentan algunas de las características del software CloudCompare:

- Visualización: permite la visualización de datos 3D desde múltiples fuentes, incluyendo nubes de puntos, mallas, modelos y mapas de altura.
- Procesamiento: El software tiene una amplia gama de herramientas de procesamiento de datos 3D, como la fusión de nubes de puntos, el filtrado de datos, la simplificación de mallas, la segmentación y la medición.
- Análisis: incluye herramientas de análisis y medición para evaluar la calidad de los datos, como la distancia de Hausdorff, la distancia de Morfología y la comparación de modelos.
- Edición: permite la edición de datos 3D, incluyendo la creación de superficies y la eliminación de partes no deseadas de una nube de puntos o modelo.
- Automatización: incluye herramientas de automatización para realizar tareas repetitivas de procesamiento de datos 3D, como el registro de nubes de puntos y la creación de mallas.
- Integración: se integra con otros software y librerías 3D, como PCL (Point Cloud Library) y VTK (Visualization Toolkit), lo que permite una mayor flexibilidad en el procesamiento y visualización de datos 3D.
- Multiplataforma: es compatible con varios sistemas operativos, incluyendo Windows, macOS y Linux.

Con este software he podido realizar la referenciación y comparación de los modelos 3D, calcular las distancias medias y las desviaciones estándar entre el modelo obtenido con Academia 50 (Figura 15), y modelos obtenidos desde fotografías, modelos obtenidos desde videofotografías y PhotoMeDAS.

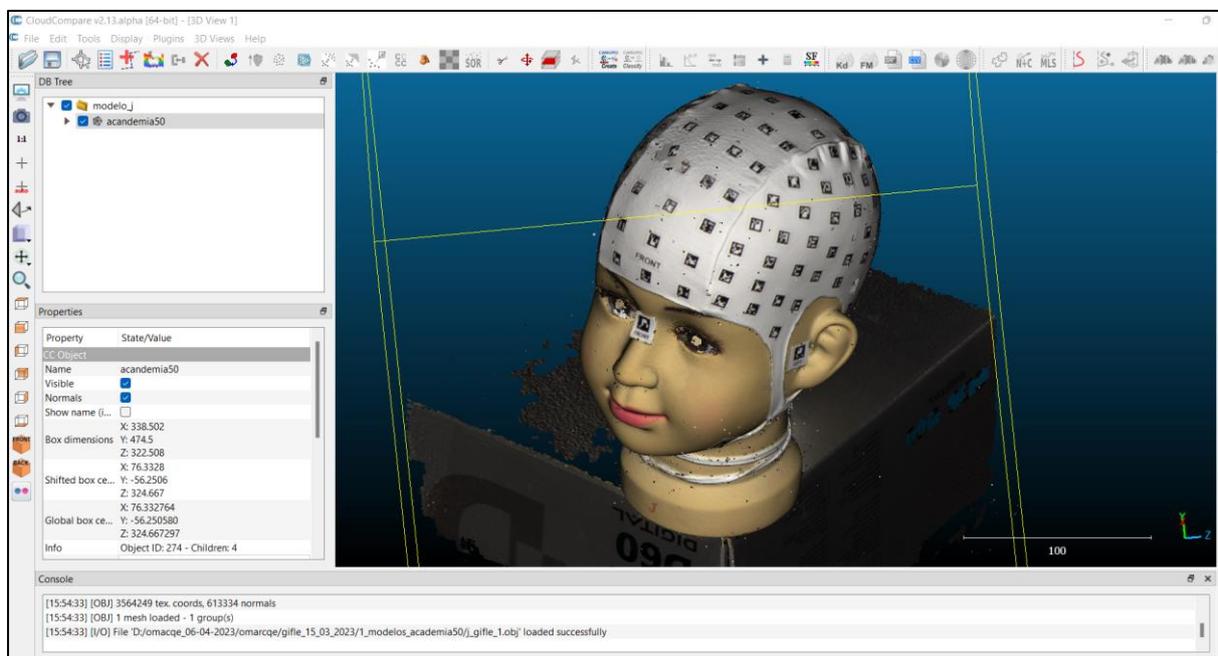


Figura 15. Modelo 3D obtenido con escáner ACADÉMIA 50, importado en CloudCompare.

7. METODOLOGÍA

7.1. ESQUEMA DE LA METODOLOGÍA [JLL3][OCQE4]

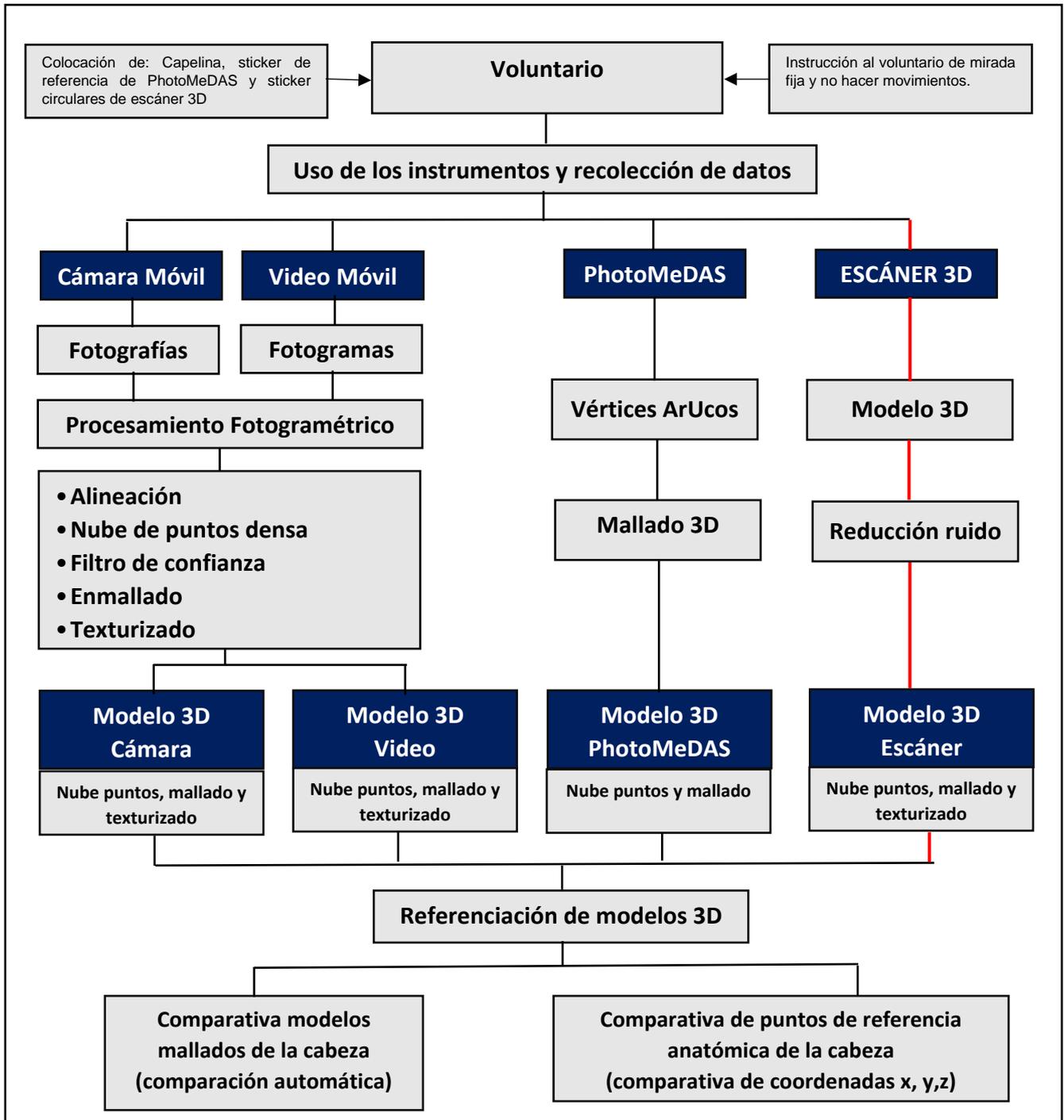


Figura 16. Esquema metodológico del desarrollo de la investigación.

En la Figura 16 se presenta el procedimiento metodológico desarrollado en este estudio. Se realiza una evaluación comparativa de modelos craneofaciales 3D utilizando dispositivos móviles y fotogrametría, el cual se aplicó en 6 cabezas humanas y 2 maniqués de cabeza. Para realizar el procedimiento se utilizó el smartphone Galaxy S22, la aplicación PhotoMeDAS, escáner 3D Academia 50. Luego para el procesamiento fotogramétrico se

utilizó el software Agisoft Metashape, teniendo el modelo de referencia obtenido con el escáner se realizó el proceso de referenciado y escalado de los modelos y finalmente se realizó la comparativa de modelos se utilizó el software Cloud compare para evaluar la distancias entre modelos, así como el software IBM SPSS statistics para los análisis estadísticos comparativos de puntos identificables alrededor de la cabeza.

7.2. RECOLECCIÓN DE DATOS

En virtud de la presencia de 4 modalidades de obtención de datos, se implementó un protocolo para la captura de datos en 4 fases distintas, a fin de recopilar información sobre los 8 modelos de cabezas (Tabla 3).

Modalidad	Tipo de dato	Actividad
Escáner ACADEMIA 50	Modelo craneofacial 3D	Referencia
Cámara Móvil Samsung Galaxy S22	Fotografía	Comparar
Video Móvil Samsung Galaxy S22	Fotograma	Comparar
Aplicativo móvil PhotoMeDAS	Modelo cráneo 3D	Comparar

Tabla 3. Instrumentos y Tipo de dato recolectado.

Antes de iniciar el proceso de escaneo y captura de fotografías, se brindó una instrucción detallada a los voluntarios sobre el procedimiento general, así como el manejo del software PhotoMeDAS. Posteriormente, se procedió a colocar la capelina de PhotoMeDAS y los sticker y escaneo 3D. Es importante mencionar que los sticker debían ser colocados con precisión en los puntos indicados y en la frente del voluntario (Figura 16).

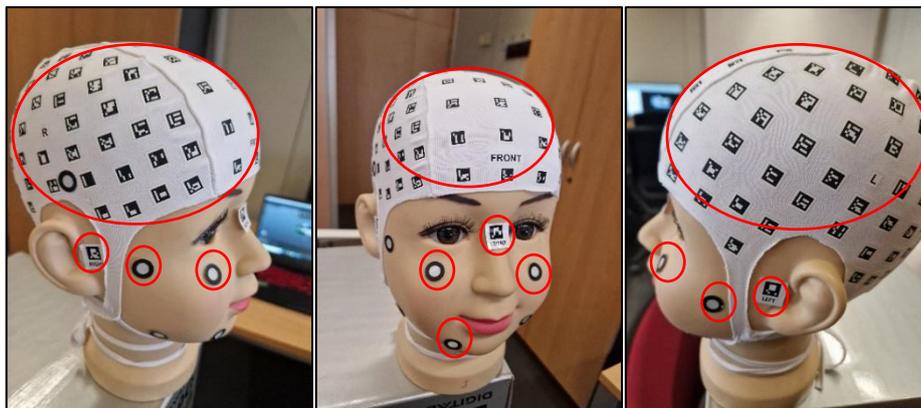


Figura 17. Capelina con ArUcos para PhotoMeDAS y sticker circulares para el escáner 3D.

7.2.1. TOMA DE DATOS CON ESCÁNER ACADEMIA 50

Se llevó a cabo la calibración del escáner 3D utilizando un tablero con patrones circulares (Figura 17). Posteriormente, se procedió a configurar el escáner 3D utilizando el software VXelement, en el cual se establecieron parámetros como la resolución, el relleno de objetivos y la precisión de la optimización de contornos (Figura 18). Los principales parámetros de escaneo incluyeron la aplicación de textura con una resolución de 0,5 mm, el relleno de objetivos y la precisión en la optimización de contornos.

"Evaluación comparativa de modelos craneofaciales 3D utilizando dispositivos móviles y fotogrametría"

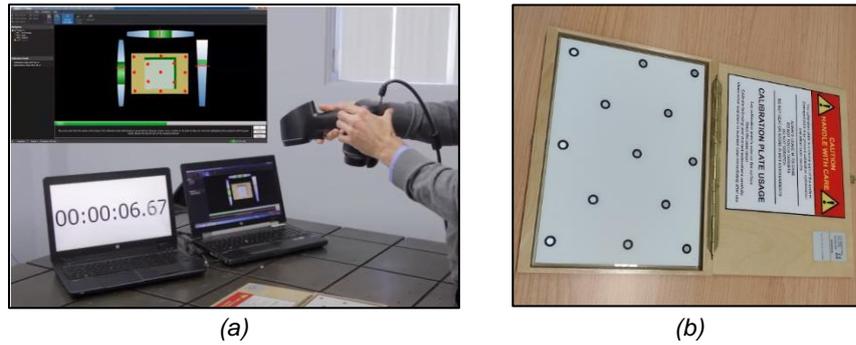


Figura 18. Proceso de calibración software VXelement: (a)Calibración ; (b)Patrón de calibración .

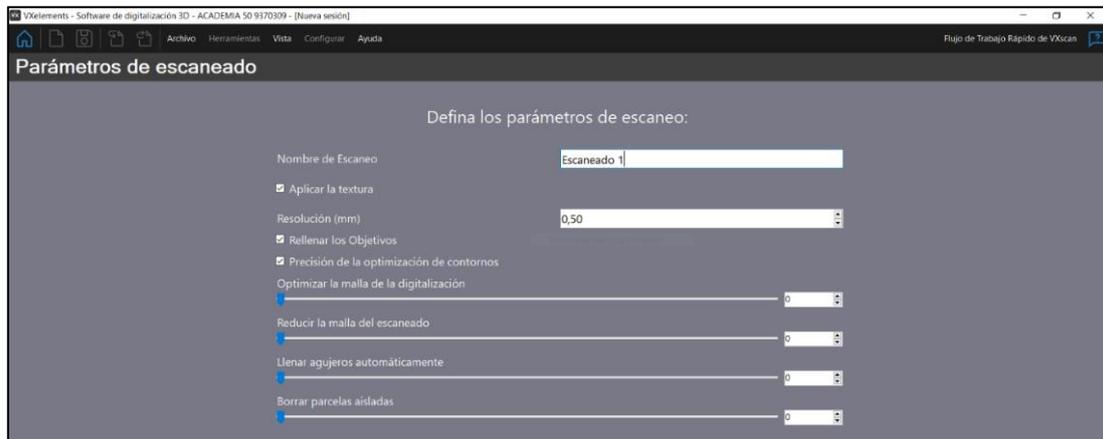


Figura 19. Configuración del Laser Escáner.

Con el fin de obtener el modelo 3D de la cabeza de los voluntarios, se procedió a configurar los parámetros de posicionamiento en "Objetivos/Geometría/Textura", y se indicó el uso del obturador automático y la captura de la textura como parámetros del escáner (Figura 19).

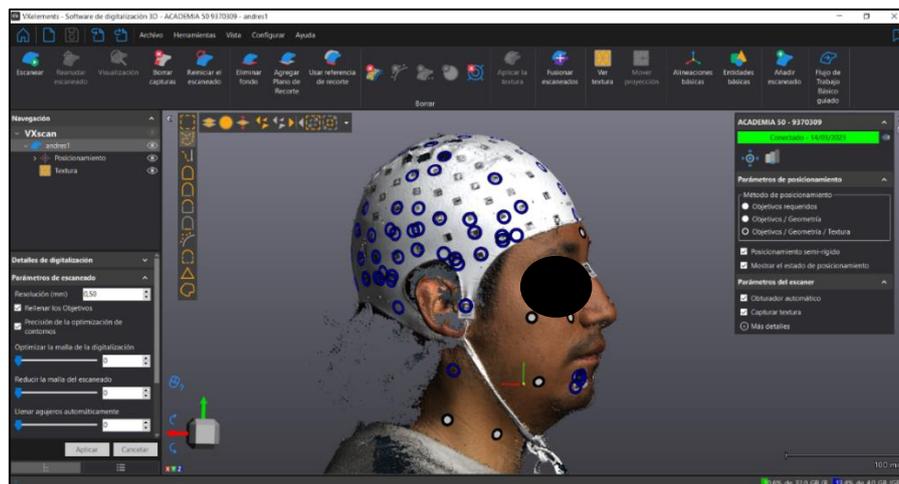


Figura 20. Desarrollo del escaneado 3D.

Para la toma de datos, se movió el escáner alrededor de la cabeza, asegurándose de cubrir todos los ángulos y de no perder de vista el objeto a escanear. Una vez finalizado el proceso de escaneo con el escáner 3D, se verificó que la captura de datos fuera correcta, tal y cual se puede visualizar en la figura 20. En caso contrario, se llevó a cabo un nuevo proceso de escaneo del mismo modelo. Una vez obtenido el modelo, se exportó y almacenó para poder ser importado posteriormente en otro software para el proceso de referenciación.

7.2.2. TOMA DE DATOS CON CÁMARA Y VIDEO DEL DISPOSITIVO MÓVIL

Se le solicitó al voluntario que permaneciera sentado en una posición estable sin generar movimientos, y se sugirió que mirara un punto fijo en la pared. Se estableció una buena iluminación, sin obstrucciones entre el modelo y la cámara móvil. En cuanto a la toma de fotografías (en formato ".jpg"), se utilizó la configuración automática de enfoque que viene por defecto en la configuración del móvil. Se colocó la cabeza en el centro del encuadre y se aseguró que estuviera enfocado en todo momento (Figuras 21 y 22).

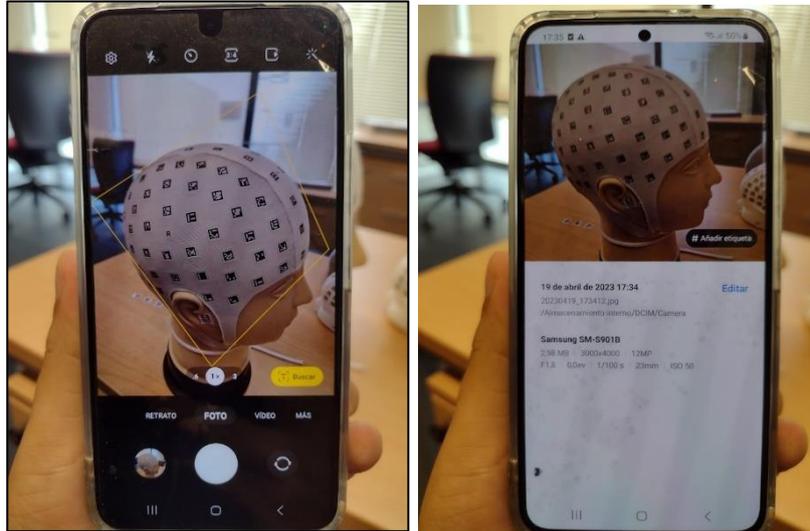


Figura 21. Características de fotografía. Izquierda, toma de la fotografía. Derecha, metadato de la fotografía.



Figura 22. Características del video. Izquierda, toma del video. Derecha, metadato del video.

Se llevó a cabo la toma de fotografías de la cabeza del voluntario desde múltiples ángulos. Se procuró mantener el celular en un ángulo constante y asegurarse de no perder de vista la cabeza del voluntario en ningún momento. La toma de fotografías se realizó a una distancia constante de aproximadamente 20 a 25 cm de la cabeza del móvil, con un intervalo de tiempo de aproximadamente 1 segundo entre cada toma. Se realizaron 2 anillos completos alrededor de la cabeza y otro parcial para cubrir la barbilla, así como uno perpendicular [JLL8] [OCQE9] (Figura 23).

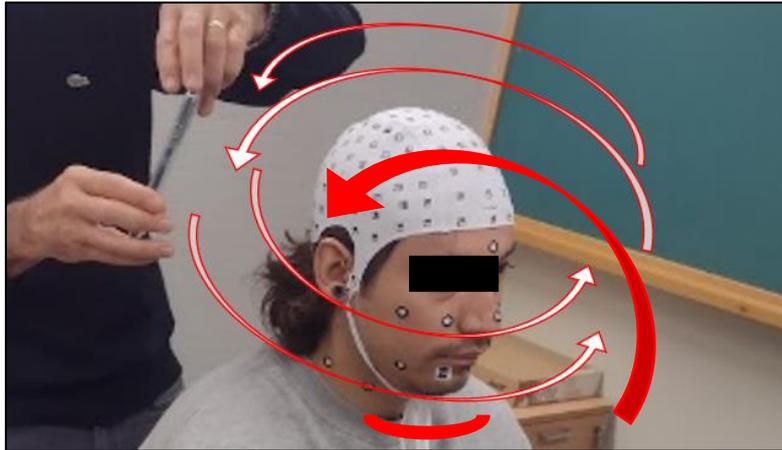


Figura 23. Desplazamiento del móvil para la toma de datos.

En el caso del video, se siguieron las mismas condiciones que para la toma de fotografías, pero se utilizó la configuración de video por defecto en el móvil. La configuración se mantuvo en automático durante todo el proceso de captura de datos.

7.2.3. TOMA DE DATOS CON PHOTOMEDAS

Para medir hay que tener centrado en la pantalla toda la superficie visible del gorro. Para ayudar en el proceso de medición, en la pantalla hay un círculo donde se debe visualizar el máximo número de códigos posibles. También hay que tener en cuenta que las tomas estén aproximadamente hechas desde la misma distancia a la cabeza del bebé, para facilitar un correcto escalado. Para medir se empieza por la parte frontal para captar en primer lugar las tres pegatinas que hemos colocado y que se usan para referenciar el modelo (Figura 24).

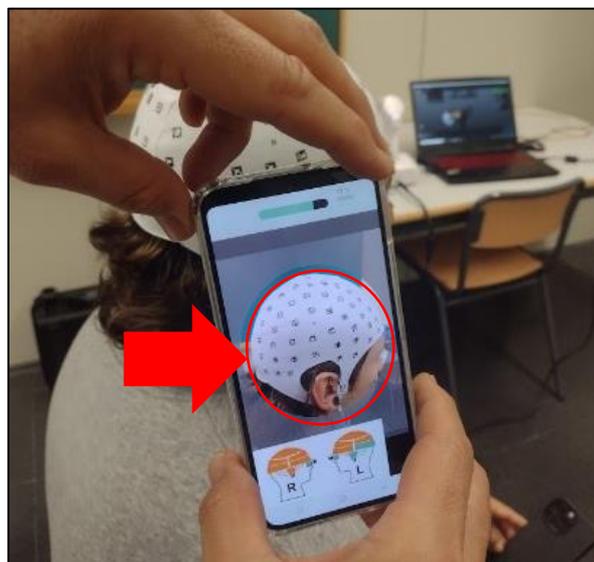


Figura 24. Toma de datos con PhotoMeDAS.

Cuando la aplicación tenga registrados suficientes datos se enviarán al servidor para empezar a procesarlos. Una vez procesados el software nos facilitara los diferentes informes y modelos 3D resultantes en la página web de PhotoMeDAS.eu.

Una vez obtenido un resultado con la aplicación móvil se imprimen los informes. En ocasiones debido al movimiento del bebé había que realizar varias tomas para obtener resultados ya que la aplicación está programada para realizar la toma en un tiempo determinado.

7.3. RESUMEN DE TOMA DE DATOS

La Tabla 4 contiene información detallada sobre el tiempo que se tardó en escanear las dos maquetas y los seis voluntarios utilizando un escáner 3D, la cámara y video móvil Samsung S22 ,y la aplicación PhotoMeDAS. Además, se proporciona una estimación de la edad de las maquetas escaneadas.

Modelo	Escáner 3D	Cámara	Video	PhotoMeDAS	Edad
Maqueta GIFLE R (M R)	3min 58seg	2min 13 seg	1min 18 seg	4min	1 año
Maqueta GIFLE J (M J)	4min 20 seg	2 min 01 seg	1min 30seg	4min	2 años
Voluntario 1 (V 1)	1min 55 seg	1min 12 seg	1min 10 seg	5min	3 años
Voluntario 2 (V 2)	2min 3 seg	1min 50 seg	1min 30 seg	5min	6 años
Voluntario 3 (V 3)	2min 36 seg	1min 50 seg	1min 07 seg	5min	14 años
Voluntario 4 (V 4)	5min 00 seg	2min 30 seg	1min 39 seg	5min	25 años
Voluntario 5 (V 5)	2min 57seg	2min 02 seg	1min 20 seg	5min	27 años
Voluntario 6 (V 6)	3min 40 seg	2min 59 seg	2min 09 seg	5min	28 años

Tabla 4. Comparativo de tiempo para la toma de datos.

7.4. CONSTRUCCIÓN DE LOS MODELOS 3D

Se procesaron las imágenes y videos recopilados utilizando el software Agisoft Metashape Versión 1.7 para el procesamiento de imágenes y la reconstrucción 3D. El proceso de modelado 3D siguió el procesamiento habitual en el software fotogramétrico Structure-from-Motion (SfM), que consiste en: (i) alineación de imágenes, (ii) densificación de nubes, (iv) mallado y (v) texturizado de la malla (opcional, solo para fines de visualización). La estructura a partir del movimiento (SfM) es el proceso de estimar la estructura 3D de una escena a partir de un conjunto de imágenes 2D.

7.5. GENERACIÓN DE MODELOS CON AGISOFT METASHAPE

7.5.1. Preparación de datos

Para garantizar la calidad de los datos obtenidos con la cámara móvil, se realizó una verificación visual de las fotografías para descartar aquellas que pudieran estar movidas o tener objetos que obstruyan la visualización adecuada de la cabeza del voluntario.

En cuanto al video, se utilizó un script en Python para fragmentar el video en fotogramas cada 20 segundos como se muestra en la figura 25, lo que permite un procesamiento más fácil y eficiente. Para ello, se importó el módulo "cv2" que hace referencia a la biblioteca OpenCV, la cual es ampliamente utilizada en el campo de la visión por computador y permite trabajar con imágenes y videos de manera sencilla y eficiente.

```

1
2 import cv2
3
4 # Open the video
5 video = cv2.VideoCapture("voluntario1.mp4")
6
7 # Get the total number of frames
8 total_frames = int(video.get(cv2.CAP_PROP_FRAME_COUNT))
9
10 # Loop through every 20th frame
11 for i in range(0, total_frames, 20):
12     # Set the position of the video to the current frame
13     video.set(cv2.CAP_PROP_POS_FRAMES, i)
14
15     # Read the current frame
16     success, frame = video.read()
17
18     # Save the frame as an image
19     cv2.imwrite("frame%d.jpg" % i, frame)
20
21 # Release the video
22 video.release()
23
24 print("proceso terminado")

```

Figura 25. Código para la conversión de video a frame.

7.5.2. Selección de imágenes para la fotogrametría

En este proyecto se utilizó el número total de fotografías que se indican en la Tabla 5. Para procesar estas fotografías, se evaluó la calidad de cada una de ellas, teniendo en cuenta información como la fecha, hora, tipo de cámara, distancia focal, ISO y velocidad de captura, entre otros. Cada fotografía se caracterizó en términos de su calidad, y se tuvieron en cuenta los formatos de las imágenes: las fotografías tomadas con la cámara móvil tenían un formato de 4000x3000, mientras que los fotogramas obtenidos del video presentaban un formato de 1080x1920.

Modelo	Fotografía (Cámara)	Fotograma (Video)
M R	189	139
M J	283	118
V 1	261	66
V 2	220	102
V 3	212	108
V 4	225	138
V 5	261	108
V 6	155	175

Tabla 5. Resumen de la toma de datos.

7.5.3. Comparativo de Imágenes

En términos generales, las fotografías obtenidas con la cámara (4000x3000) tienen una resolución mucho más alta que los fotogramas obtenidos del video (1080x1920). Esto significa que las fotografías tienen más detalles y son más nítidas que los fotogramas del video. Sin embargo, los fotogramas del video tienen una ventaja importante: pueden capturar el movimiento y la acción. Esto es especialmente útil en situaciones en las que se quiere capturar la dinámica de un objeto o una persona en movimiento. Figura 26.

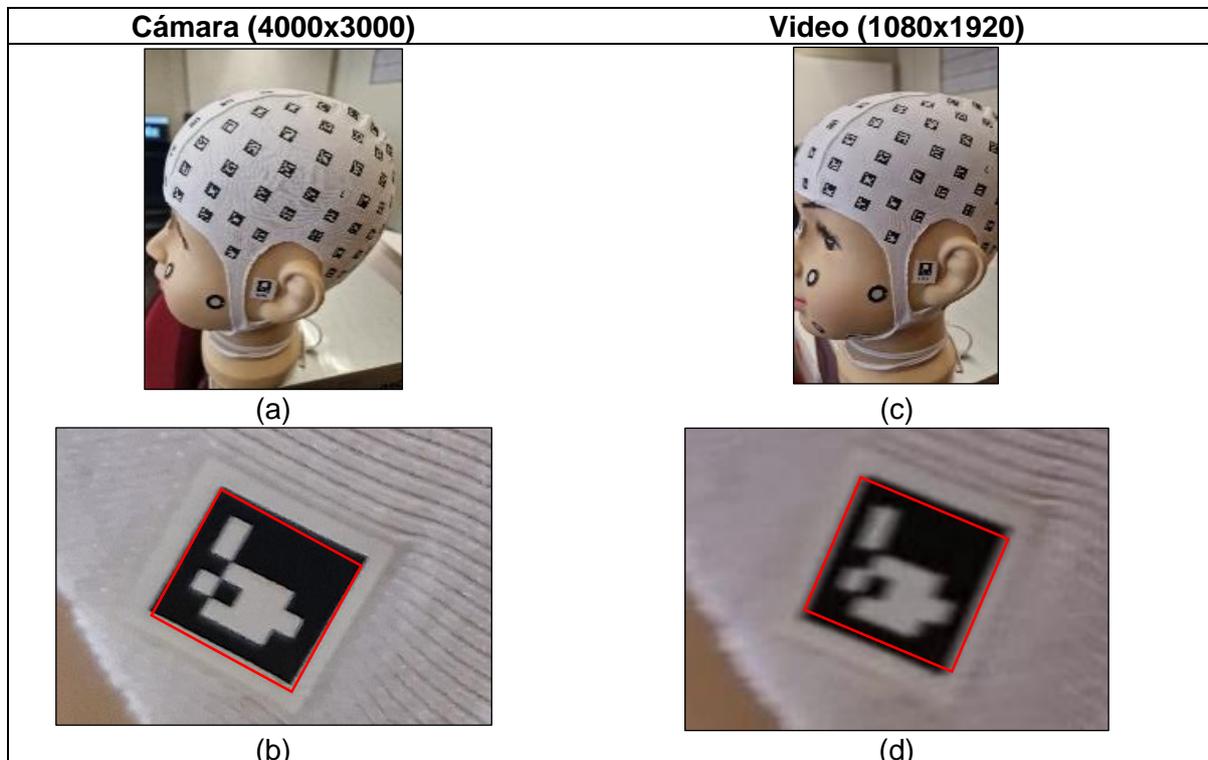


Figura 26. Comparativo de visualización de imágenes: (a) Imagen obtenida con la cámara móvil; (b) Visualización de arUco con cámara; (c) Imagen obtenida con la video móvil; (d) Visualización de arUco con video.

7.5.4. Calibración de la cámara con las imágenes obtenidas

En el proceso de fotogrametría y videofotogrametría, es importante realizar la calibración del móvil para asegurar la precisión y la exactitud de los datos capturados. En la Figura 27 se muestra el proceso de calibración utilizado. Una vez calibrado el equipo, se procede al alineamiento de las imágenes o fotogramas capturados. La densificación de la nube de puntos se realiza posterior al alineamiento y se aplica un filtro para seleccionar únicamente los puntos de mayor confianza. Estos puntos seleccionados serán utilizados para la generación del modelo 3D y el texturizado final del modelo.

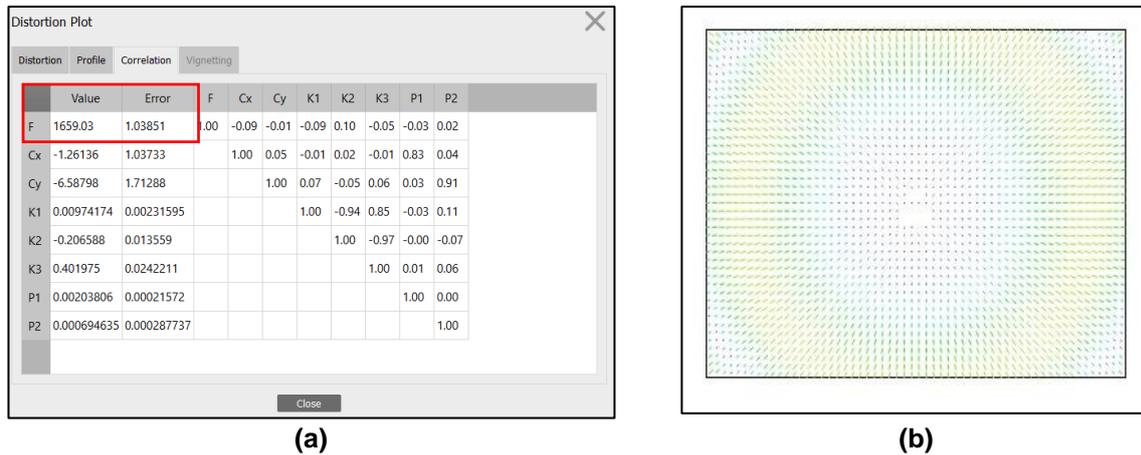


Figura 27. Calibración de cámara: (a) Ejemplo de calibración de la cámara en Metashape; (b) Distorsión radial.

7.5.5. Resumen de la calibración de la cámara

En el marco de la calibración de cámaras, el valor "F" representa la distancia principal. En la Tabla 6 se puede observar un resumen de los procesos de calibración realizados en este estudio.

Modelo	Fotografía - Cámara		Fotograma - Video	
	Valor F	Error F	Valor F	Error F
M R	2869.17	1.050	1664.25	0.996
M J	2826.81	0.602	1659.03	1.039
V 1	2772.51	0.612	1627.11	1.572
V 2	2785.94	0.648	1677.03	0.701
V 3	2760.31	0.642	1648.90	0.971
V 4	2657.94	0.524	1656.99	0.434
V 5	2763.16	0.285	1642.00	0.395
V 6	2748.16	0.324	1636.93	0.307

Tabla 6. Resumen de la calibración de la cámara con imágenes.

[JLL10][OCQE11]

7.5.6. Orientación de fotografías

Durante esta fase de procesamiento en Agisoft Metashape, se utiliza la técnica de "Generic Preselection" para encontrar la posición y orientación de cada fotografía y generar un modelo de la nube de puntos. Se utiliza una configuración de precisión media y se establece una cantidad máxima de puntos clave por foto y puntos de paso por fotografía de 1 millón. La Figura 27 muestra un ejemplo de este proceso.

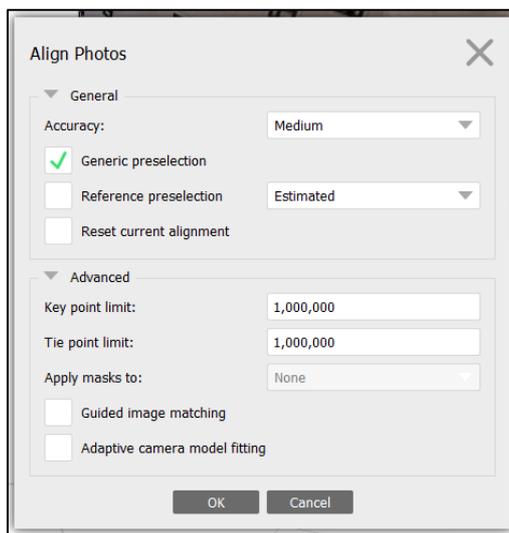


Figura 28. Configuración del procedimiento alineación de las imágenes.

7.5.7. Nube de puntos densa

En Agisoft Metashape, es posible generar y visualizar un modelo de nube de puntos densa utilizando las posiciones estimadas de la cámara para calcular la información de profundidad para cada una de ellas. Esto se logra a través de un proceso que combina múltiples puntos de enturbiamiento en una sola nube de puntos densa, lo que permite obtener una representación tridimensional detallada del objeto o escena capturada en las fotografías o en el video. En la Figura 29 se puede apreciar un ejemplo de este proceso.

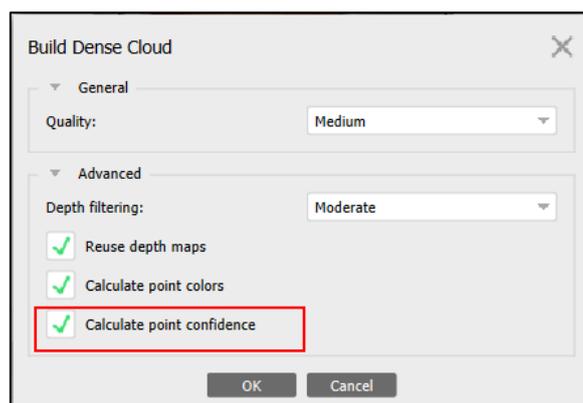


Figura 29. Configuración de la construcción de nube puntos densa.

En la creación de modelos 3D mediante la técnica de nube de puntos densa, es fundamental tener en cuenta la calidad de los datos obtenidos. Por lo tanto, es esencial estimar el nivel de confianza de los puntos para asegurar la precisión y la fiabilidad del modelo resultante. Esto implica eliminar los puntos con una baja confianza y mantener sólo aquellos que se consideran adecuados para la construcción del modelo. En la Figura 30 se puede apreciar un ejemplo de generación de nube de puntos densa con característica de nivel de confianza.

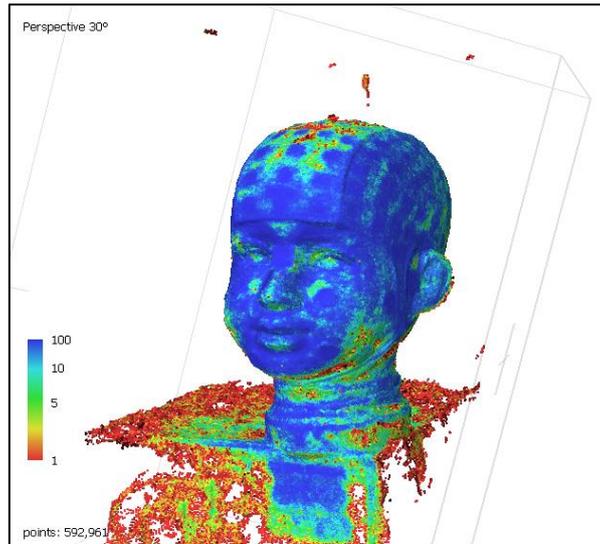


Figura 30. Nube de puntos densa sin filtrar. Visualización del índice de confianza.

En la figura 30 también se puede visualizar que la nube de puntos requiere realizar limpieza y filtrado, debido a que esta nube de puntos será utilizada para los siguientes procesos de mallado y texturizado, si la nube de puntos es errónea o presenta irregularidades entonces los productos finales también presentará irregularidades.

7.5.8. Aplicación de filtro de índice de confianza

El índice de confianza es una medida que se utiliza en Agisoft Metashape para evaluar la calidad de los puntos y las mediciones de la cámara. Este índice indica la probabilidad de que un punto o una medida sea correcta, y se expresa como un número entre 0 y 100, donde 100 indica una alta confianza y 0 indica una baja confianza (Figura 31).

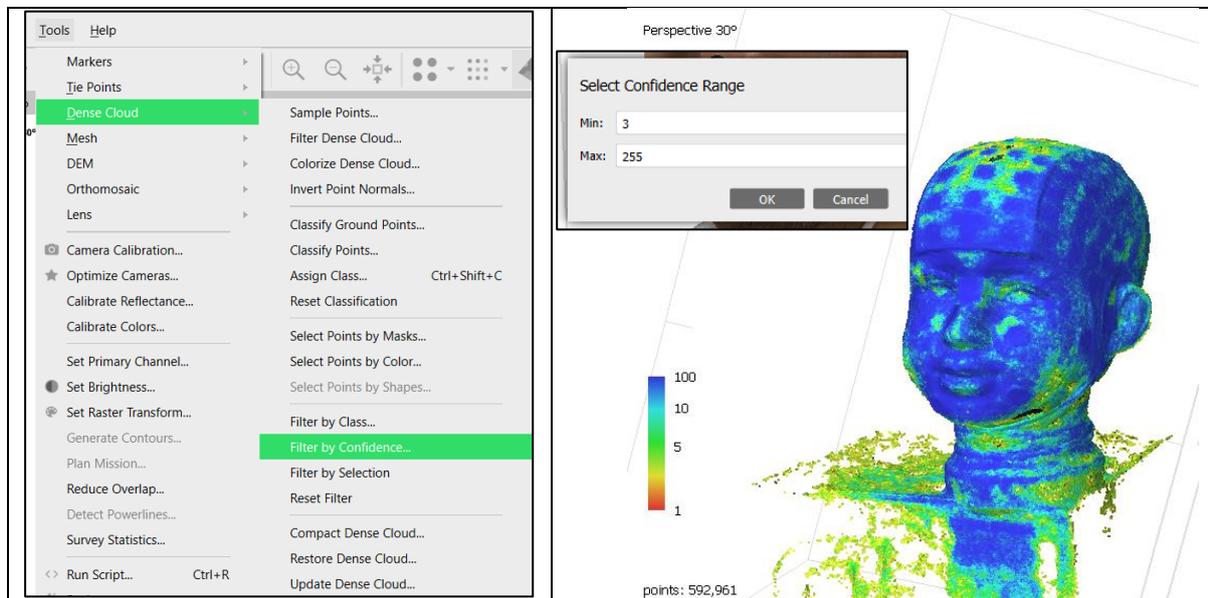


Figura 31. Aplicación del filtro de confianza mayor a 3.

7.5.9. Asignación de la nube de puntos con mayor confianza a un grupo

Es importante tener en cuenta que la asignación de los puntos a un grupo debe realizarse cuidadosamente para evitar errores que puedan afectar la calidad del modelo final. Además, se realizó una verificación adicional de los puntos asignados y de la calidad del modelo resultante considerando el filtro de la nube de puntos por el nivel de confianza asignado (Figura 32).

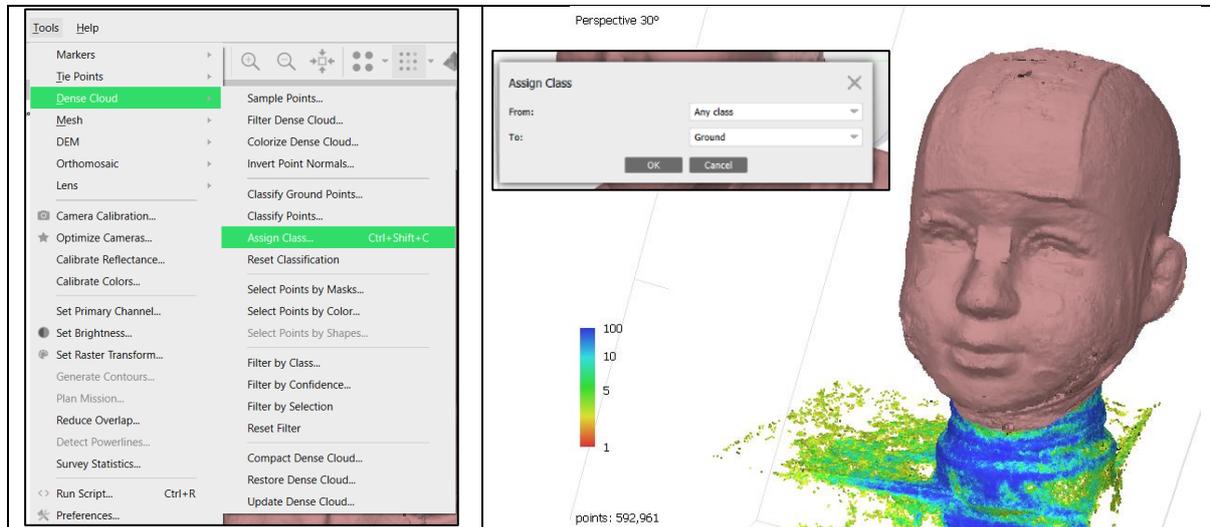


Figura 32. Asignación de la nube de puntos seleccionado a tipo Ground.

7.5.10. Creación del mallado

Basándose en la información de la nube de puntos “Ground” (asignado previo filtro de confianza), Agisoft Metashape construyó un modelo poligonal – malla, el cual se puede visualizar en la figura 33.

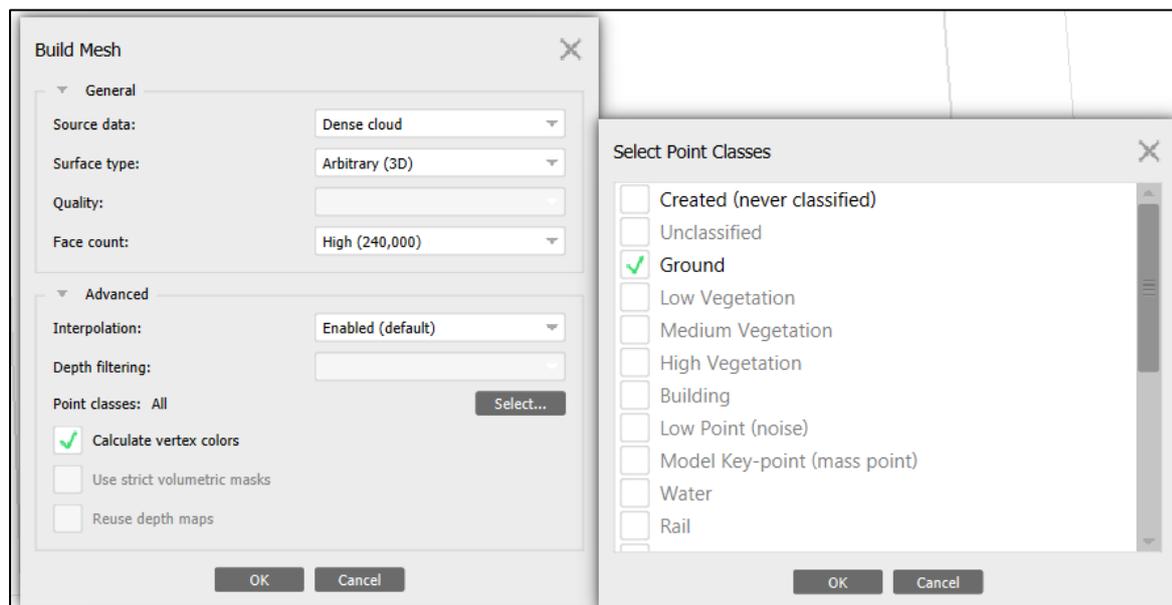


Figura 33. Configuración de parámetros del mallado

7.5.11. Creación de la textura

En el proceso de modelado 3D, una vez que se ha creado la malla, se puede proceder a la creación de la textura que se aplicará a la superficie del modelo. Para hacer esto, se debe seleccionar la opción correspondiente en el menú del flujo de trabajo. Antes de ejecutar el proceso de creación de textura (Figura 34), se puede visualizar cómo la herramienta de texturizado. Posteriormente, se puede visualizar en la figura 35 el modelo final texturizado con la textura aplicada. La calidad de la textura dependerá de la calidad de la malla subyacente y de la resolución de las imágenes utilizadas en la creación del modelo.

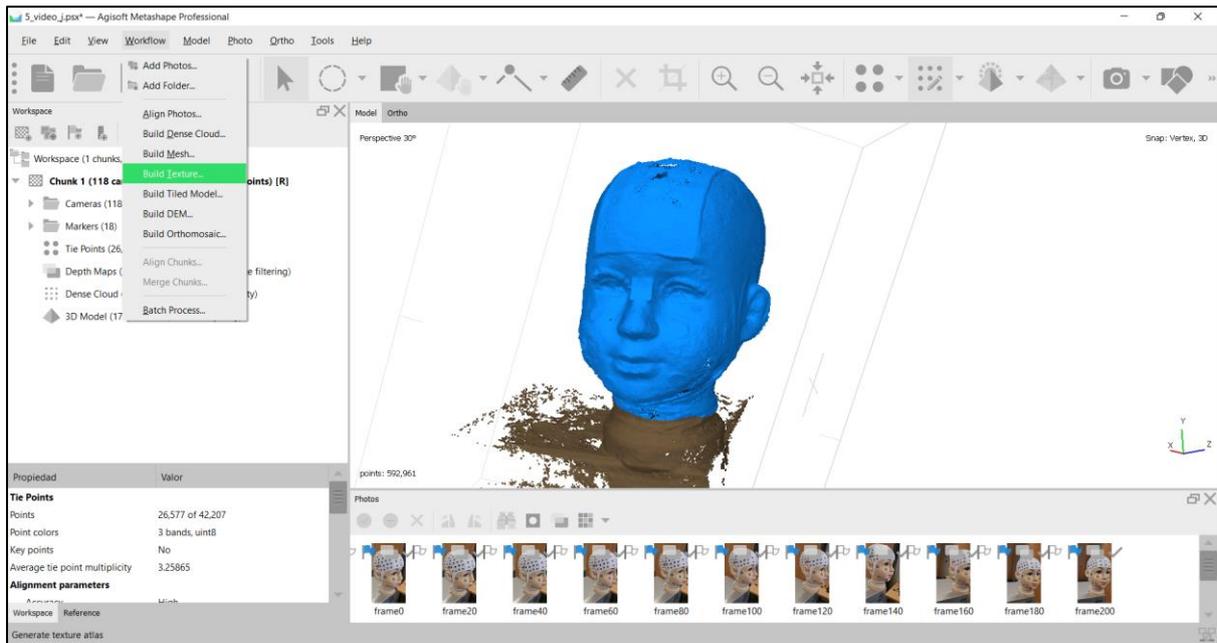


Figura 34. Proceso de construcción del modelo texturizado.

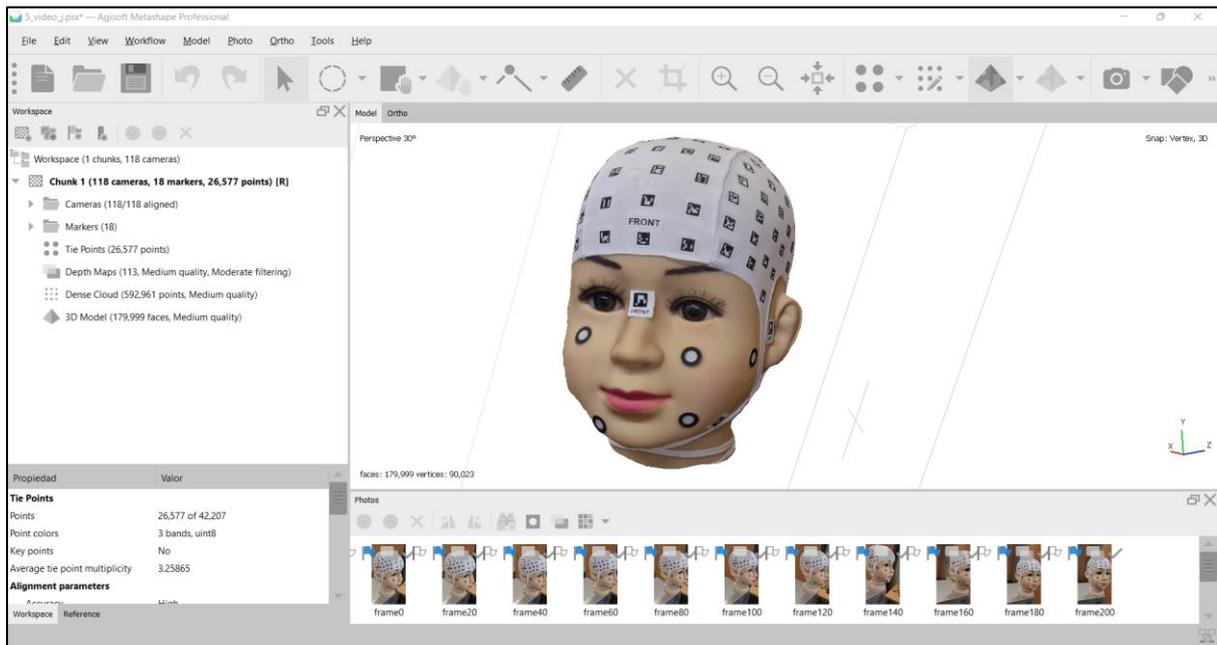


Figura 35. Resultado del proceso de texturizado.

7.6. PHOTOMEDAS

De cada medida con PhotoMeDAS se ha obtenido un informe simplificado que se facilita a las familias, un informe avanzado que usan los doctores para analizar los datos y corroborar sus diagnósticos y el modelo 3D en formatos ". ply" (Figura 36).

La aplicación de PhotoMeDAS permitió obtener los modelos 3D del cráneo, así como las coordenadas de los vértices del sticker de cada pegatina.

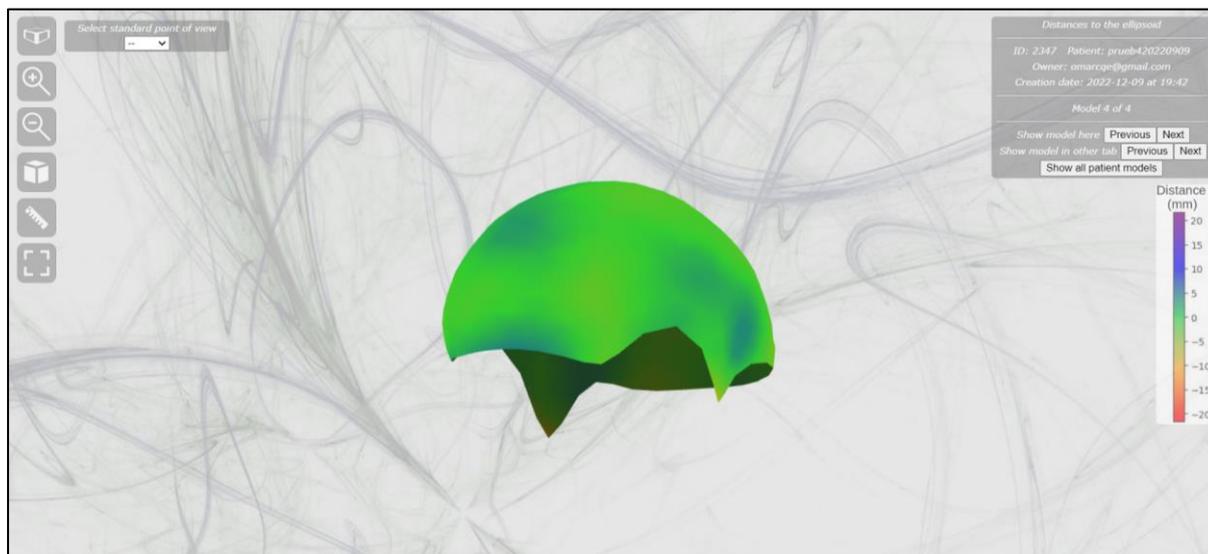


Figura 36. Visualización del modelo 3D generado por PhotoMeDAS.

7.7. REFERENCIACIÓN DE MODELOS

En este proyecto de investigación, se empleó un sistema de coordenadas de referencia para el modelo 3D obtenido a través de Academia 50. Para ello, se identificaron puntos de referencia anatómica en la cabeza, como los vértices de las pegatinas señaladas en la Figura 37 y se utilizaron como referencia en el software Agisoft Metashape para referenciar los modelos 3D. De esta manera, se establece un marco de referencia común que permite una comparación precisa y coherente de los diferentes modelos 3D obtenidos durante el proyecto.

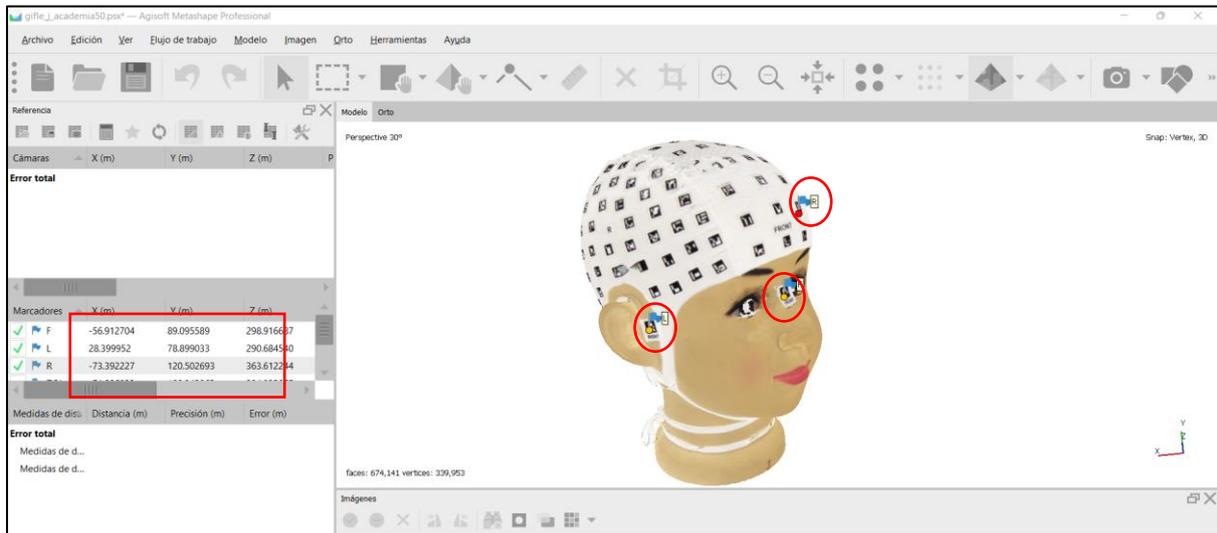
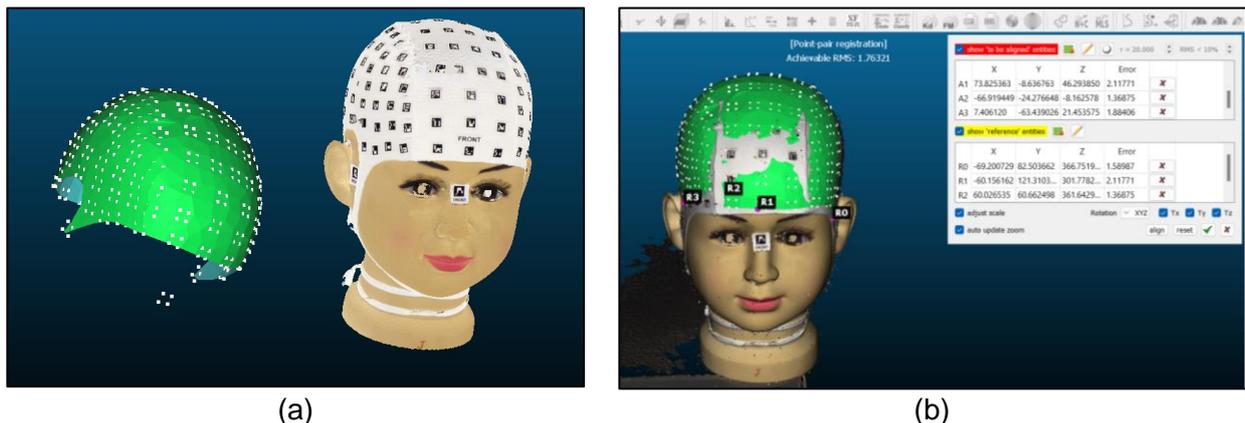


Figura 37. Extracción de las coordenadas de referencia XYZ

Con tres puntos de referencia en cada modelo se realizó la rotación y escalado de los modelos obtenidos con fotogrametría y videofotogrametría. Estos puntos de referencia fueron distribuidos cerca a cada oído y al frente del modelo 3D. Para el caso de la referenciación del modelo obtenido con PhotoMeDAS, se optó a realizarlo en CloudCompare como se visualiza en la figura 38.



[JLL12][OCQE13]Figura 38. Referenciación del modelo PhotoMeDAS: (a) modelo de PhotoMeDAS antes de referenciar;(b) modelo referenciado.

7.8. [JLL14]COMPARATIVA VISUAL DEL MALLADO Y TEXTURIZADO

Técnicas de visualización para la comparativa de resultados del proceso de mallado y texturizado de la cabeza del "MODELO J": Análisis desde Diferentes perspectivas mediante la representación gráfica. Las figuras corresponden a la Vista Frontal (Figura 39), Vista Lateral Izquierda (Figura 40), Vista Posterior (Figura 41), Vista Lateral Derecha (Figura 42), Vista Superior (Figura 43) y Vista en Perspectiva (Figura 44).

Vista frontal

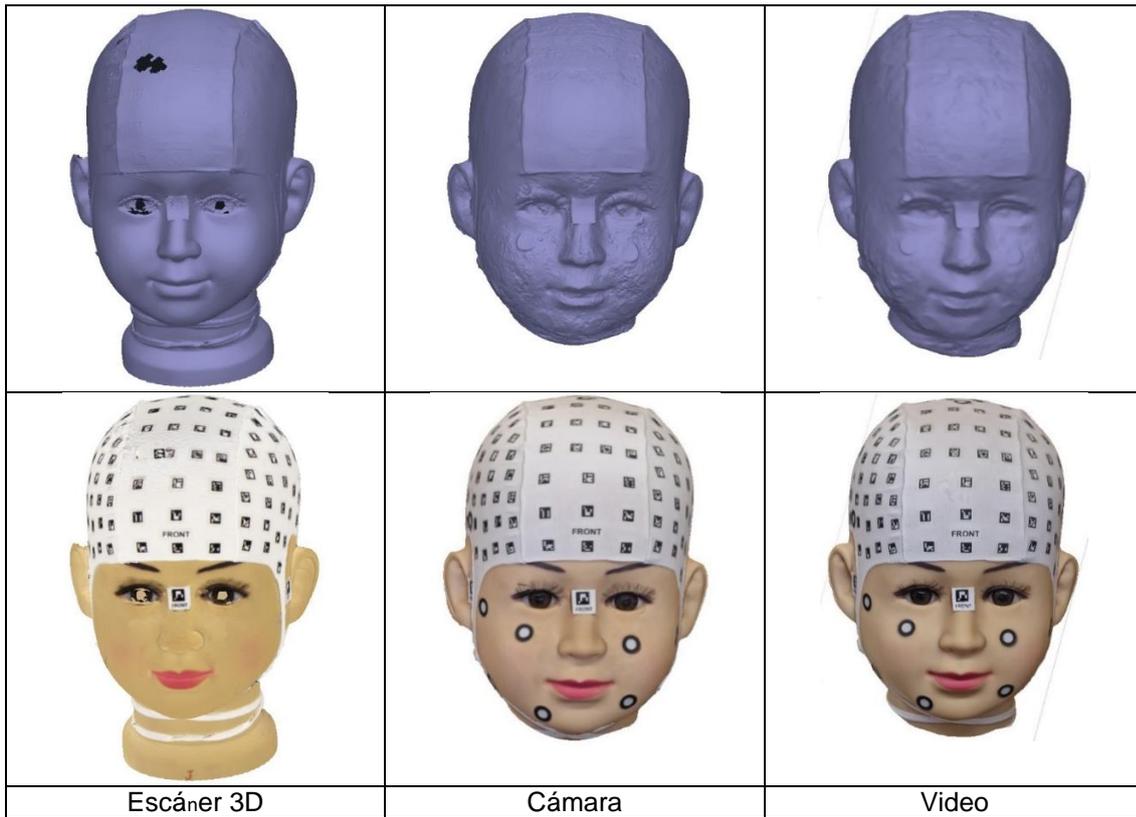


Figura 39. Comparativo del mallado y del texturizado en la vista frontal.

Vista lateral izquierda

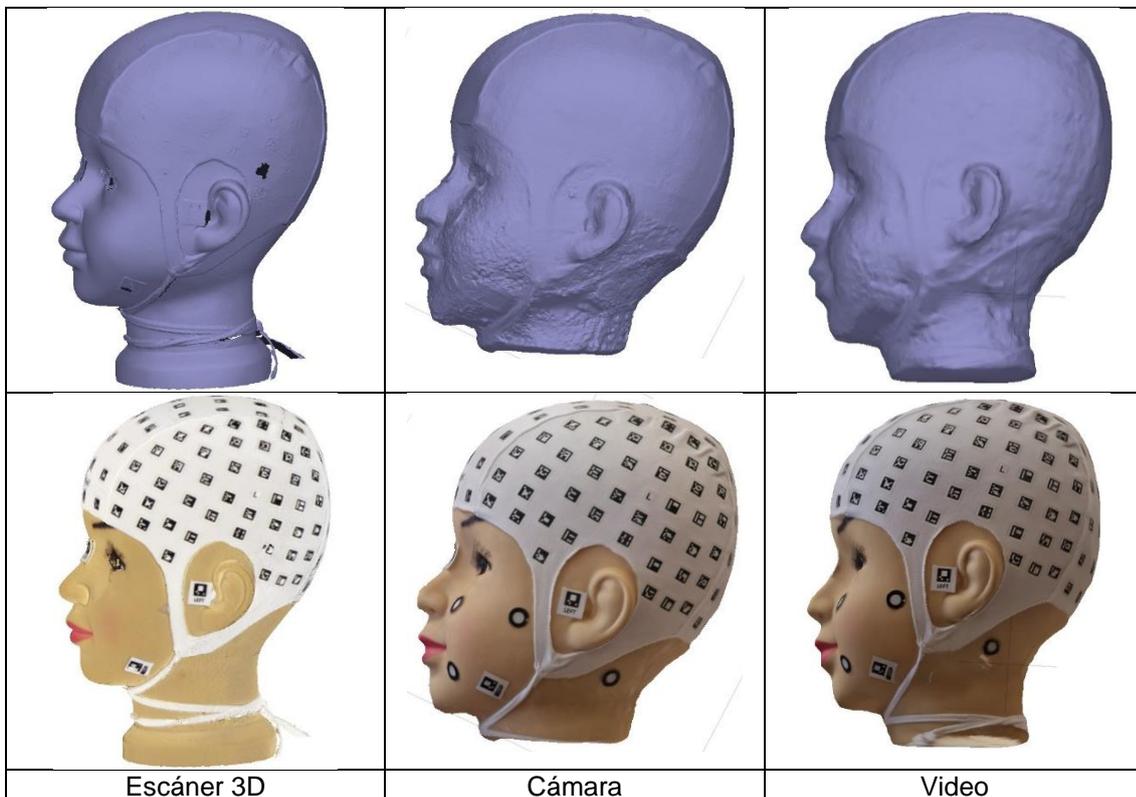


Figura 40. Comparativo del mallado y del texturizado en la vista lateral izquierda.

Vista lateral posterior

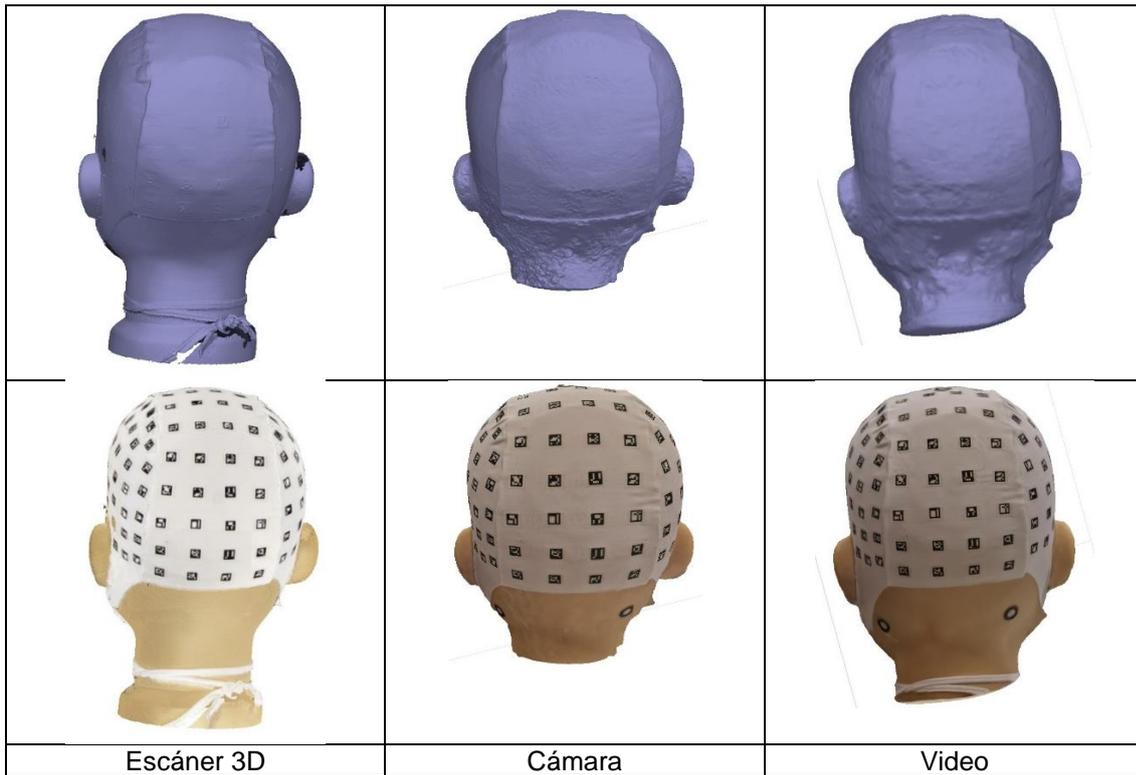


Figura 41. Comparativo del mallado y texturizado en la vista posterior.

Vista lateral derecha

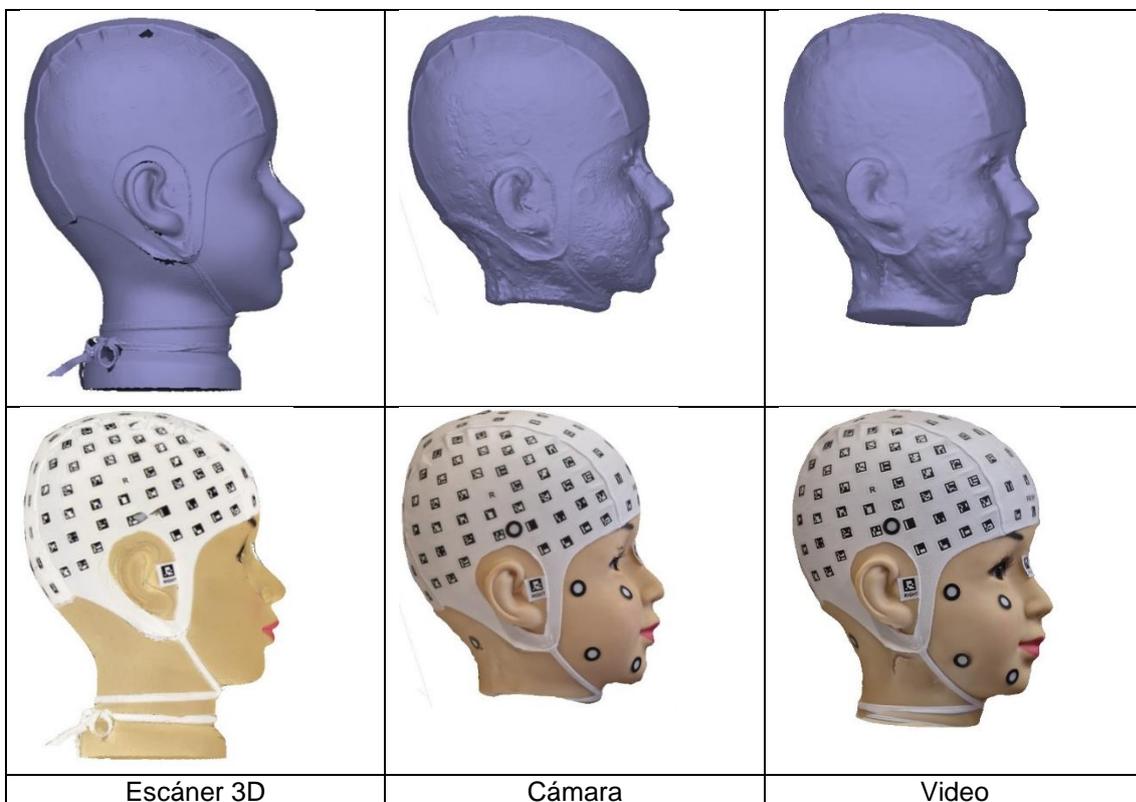


Figura 42. Comparativo del mallado y texturizado en la vista lateral derecha.

Vista superior

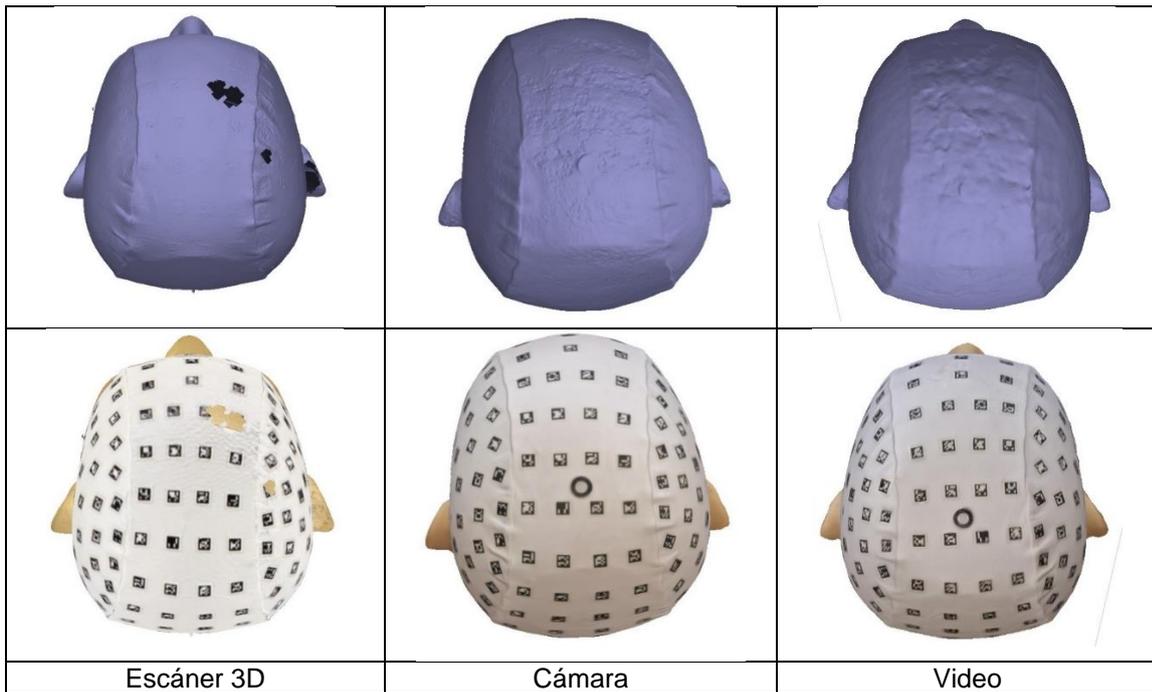


Figura 43. Comparativo del mallado y texturizado en la vista superior.

Vista en perspectiva

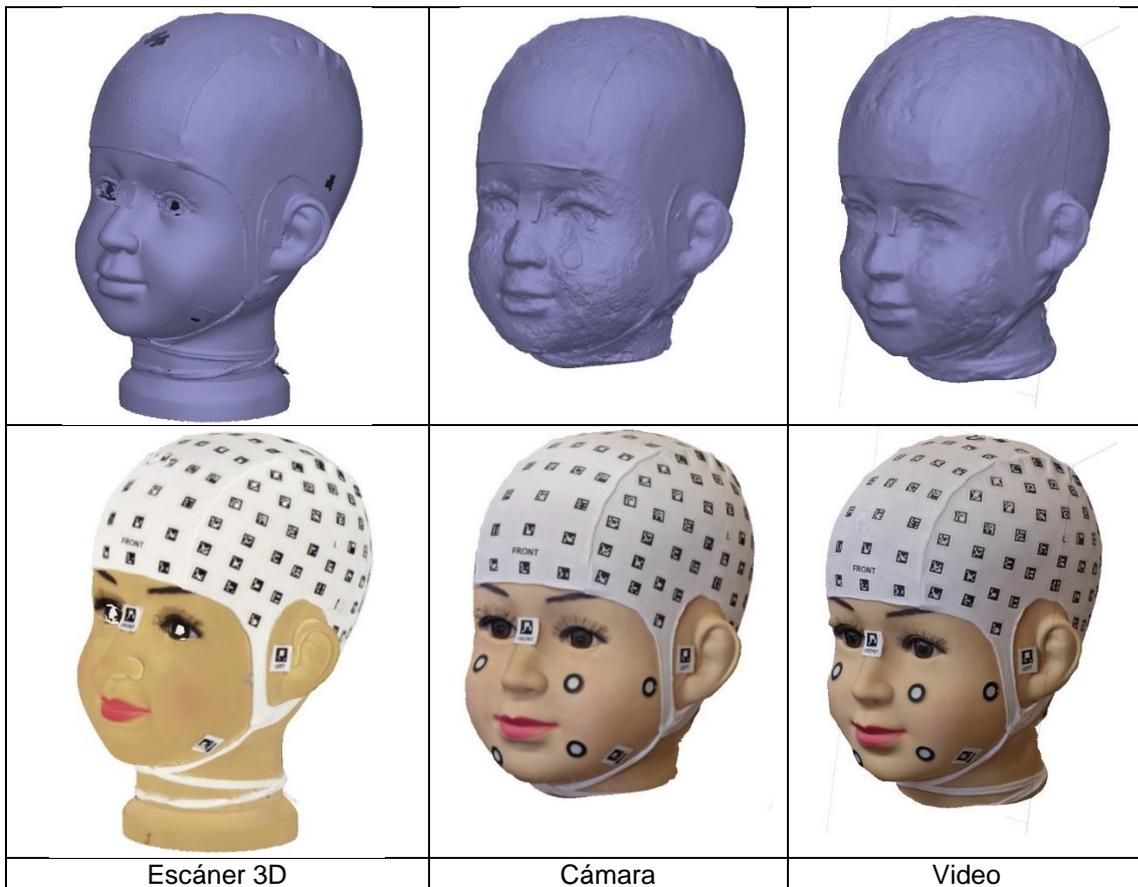


Figura 44. Comparativo del mallado y texturizado en la vista perspectiva

Se llevó a cabo una comparación visual entre los mallados obtenidos en el proceso de construcción del modelo 3D. Se pudo observar que el modelo obtenido con el escáner 3D es

altamente preciso, permitiendo apreciar las variaciones mínimas, como la piel, las juntas de tela presente en la gorra, los límites de los sticker de las marcas entre otros detalles irregulares en la cabeza. Por otro lado, el modelo obtenido con la cámara presenta un relieve similar al del escáner, pero con la presencia de ruido y algunas irregularidades, principalmente en la zona de la cabeza donde no estaba cubierto por la gorra. En cuanto al modelo obtenido a partir del video, se encontró que es similar al de la cámara, pero con una menor resolución y aparentemente más suavizado.

En cuanto al texturizado de los modelos obtenidos, se pudo capturar con suficiente detalle la textura de la cabeza pudiendo identificar rápidamente las marcas con unidades mínimas de 1 mm.

7.9. COMPARATIVA DE DISTANCIAS ENTRE MODELOS

Se procedió a realizar una comparación numérica entre los cuatro modelos obtenidos, tomando como referencia el modelo generado por el escáner 3D. Con este fin, se utilizarán las herramientas de CloudCompare, que permiten comparar las distancias entre nubes de puntos y/o malla. De esta manera, se podrán obtener medidas precisas sobre las diferencias existentes entre los modelos, lo que contribuirá a evaluar la calidad y la exactitud de los diferentes métodos de captura utilizados.

Cuando se realizó esta comparación los puntos de la nube se colorearán según la distancia a la malla y visualizando la escala de color conocemos los valores de la distancia a los que se encuentra cada punto de la malla (Figuras 45-52).

"Evaluación comparativa de modelos craneofaciales 3D utilizando dispositivos móviles y fotogrametría"

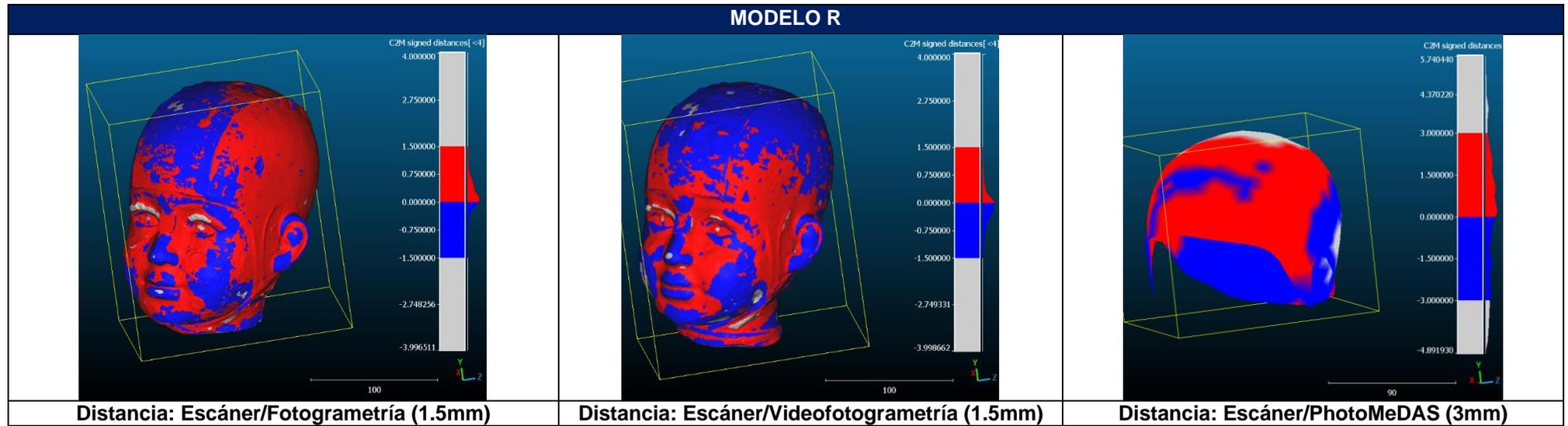


Figura 45. Comparativo de distancia entre modelos 3D – Modelo 3R.

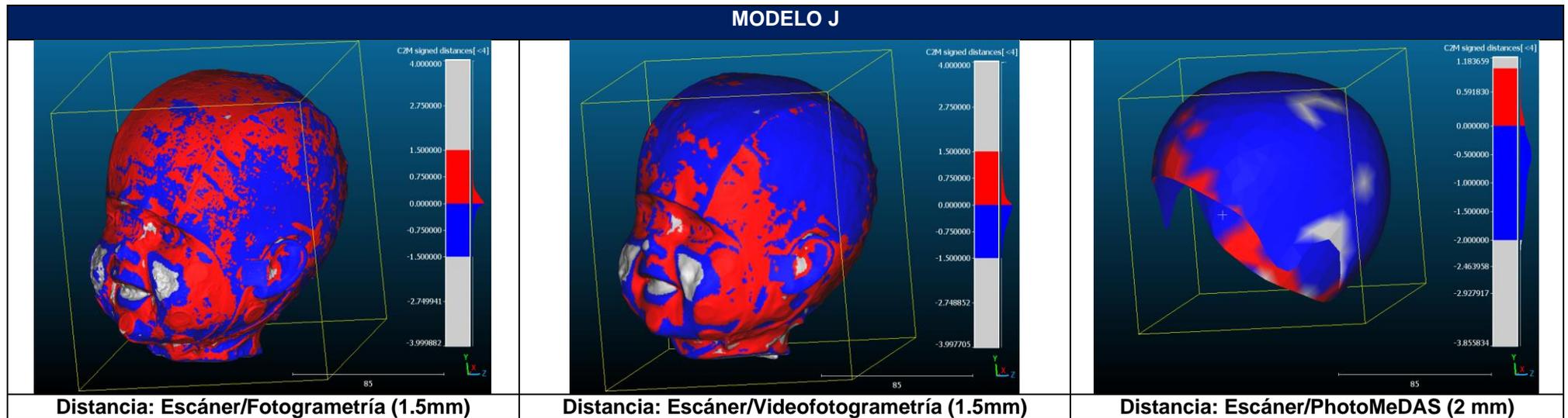


Figura 46. Comparativo de distancia entre modelos 3D – Modelo 3R.

"Evaluación comparativa de modelos craneofaciales 3D utilizando dispositivos móviles y fotogrametría"

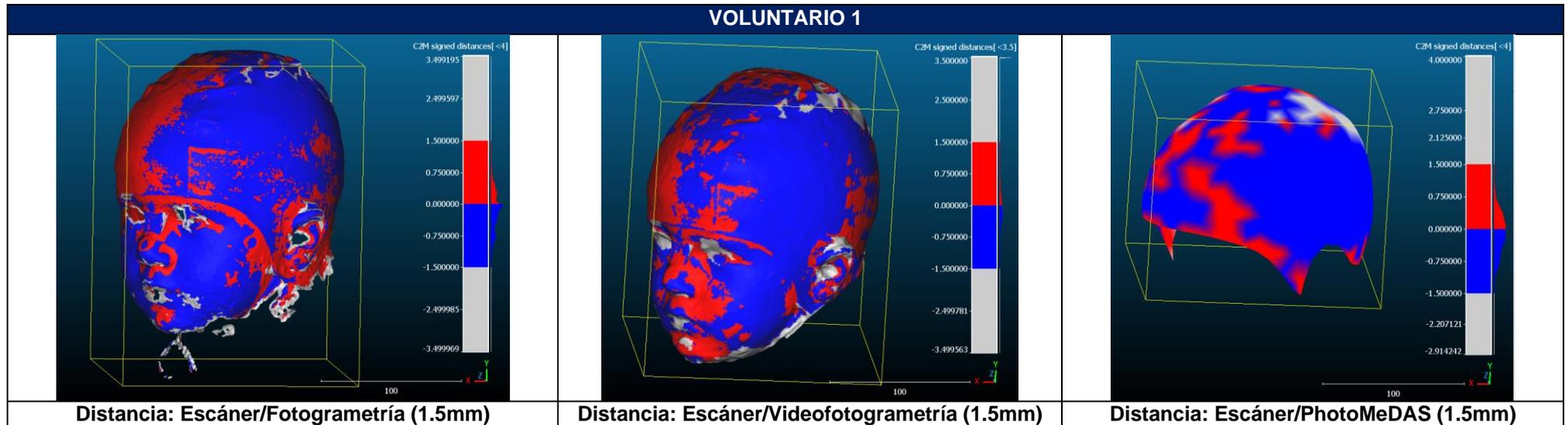


Figura 47. Comparativo de distancia entre modelos 3D – Voluntario 1.

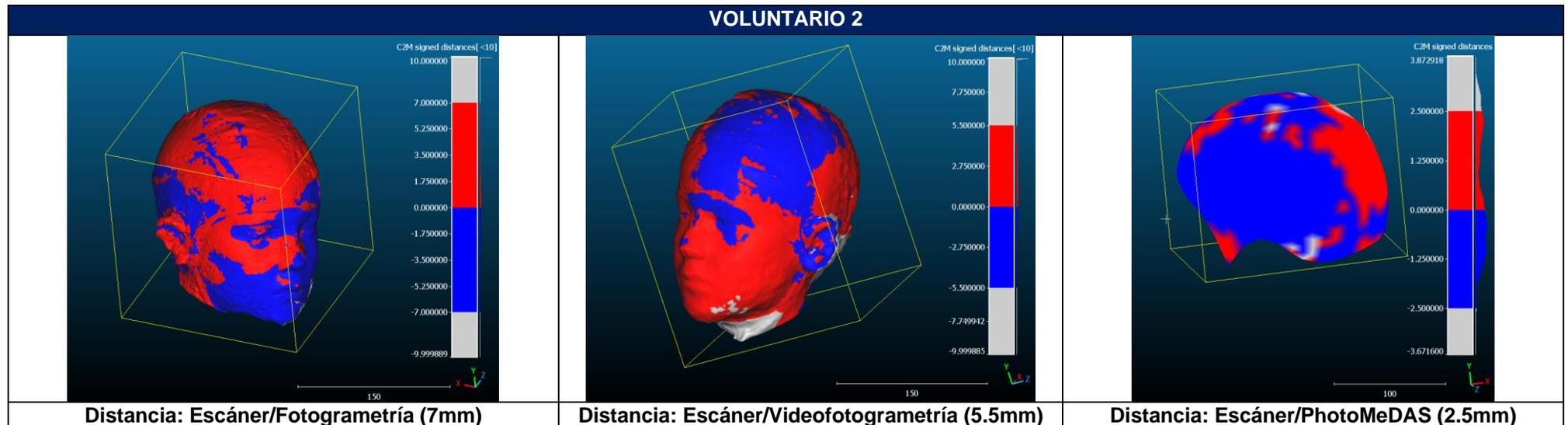


Figura 48. Comparativo de distancia entre modelos 3D – Voluntario 2.

"Evaluación comparativa de modelos craneofaciales 3D utilizando dispositivos móviles y fotogrametría"

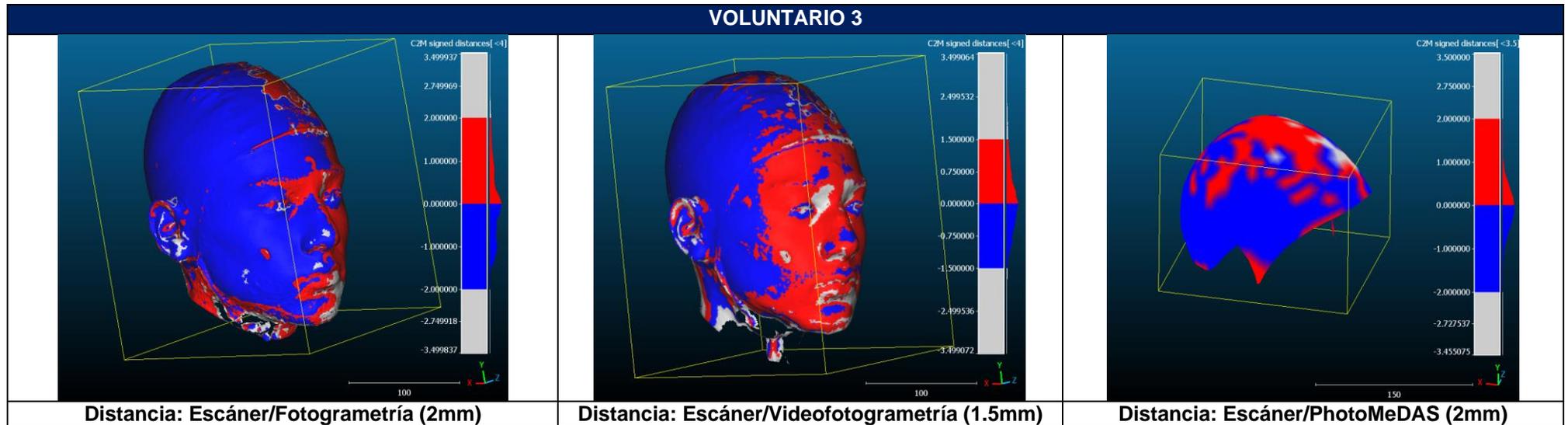


Figura 49. Comparativo de distancia entre modelos 3D – Voluntario 3.

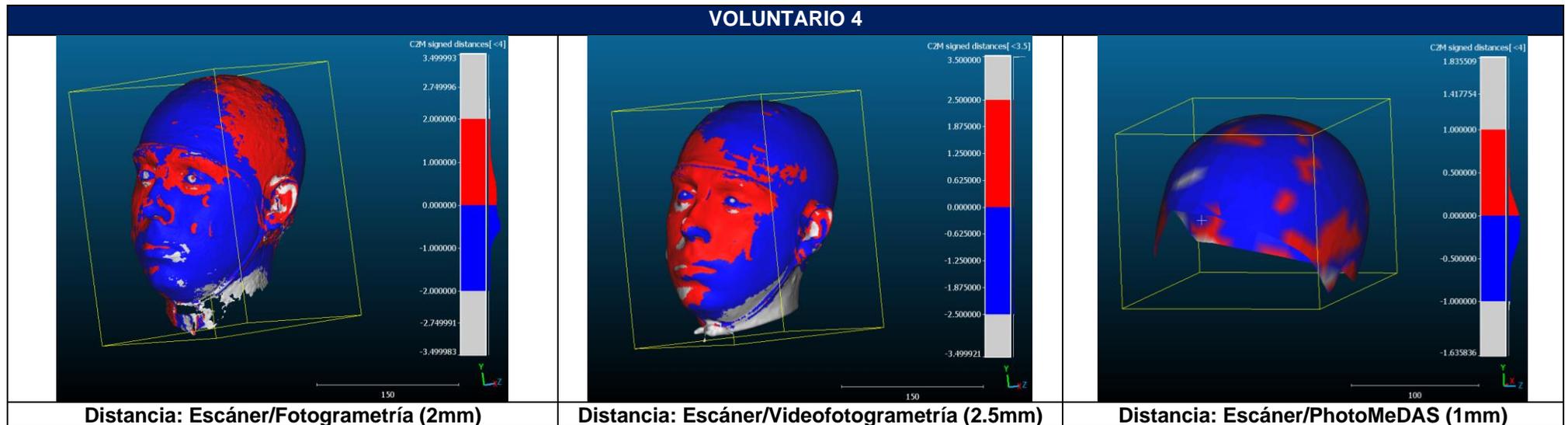


Figura 50. Comparativo de distancia entre modelos 3D – Voluntario 4.

"Evaluación comparativa de modelos craneofaciales 3D utilizando dispositivos móviles y fotogrametría"

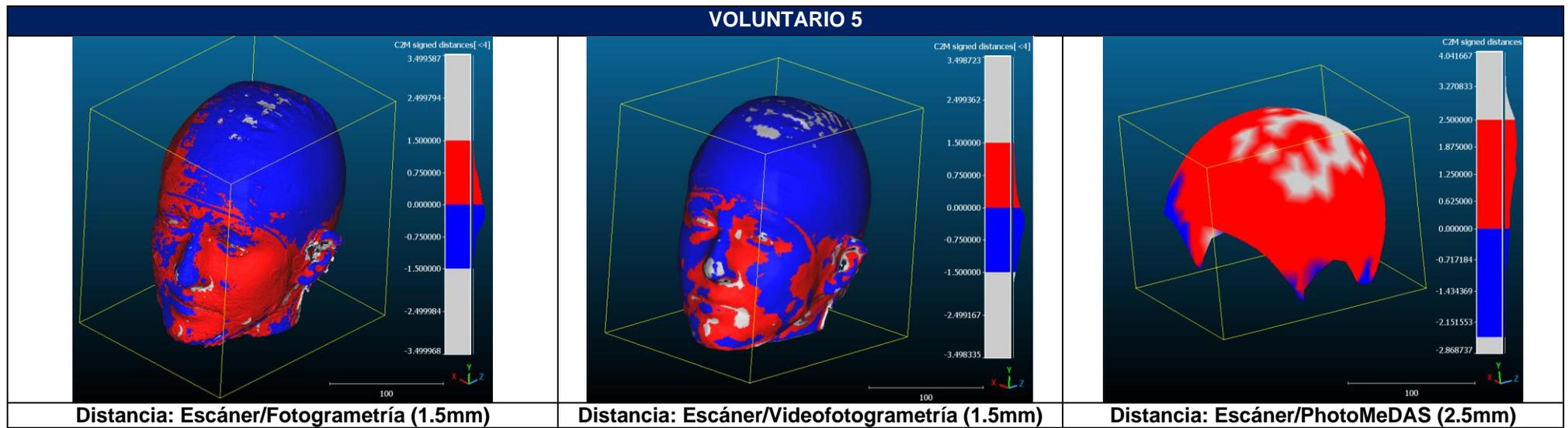


Figura 51. Comparativo de distancia entre modelos 3D – Voluntario 5.

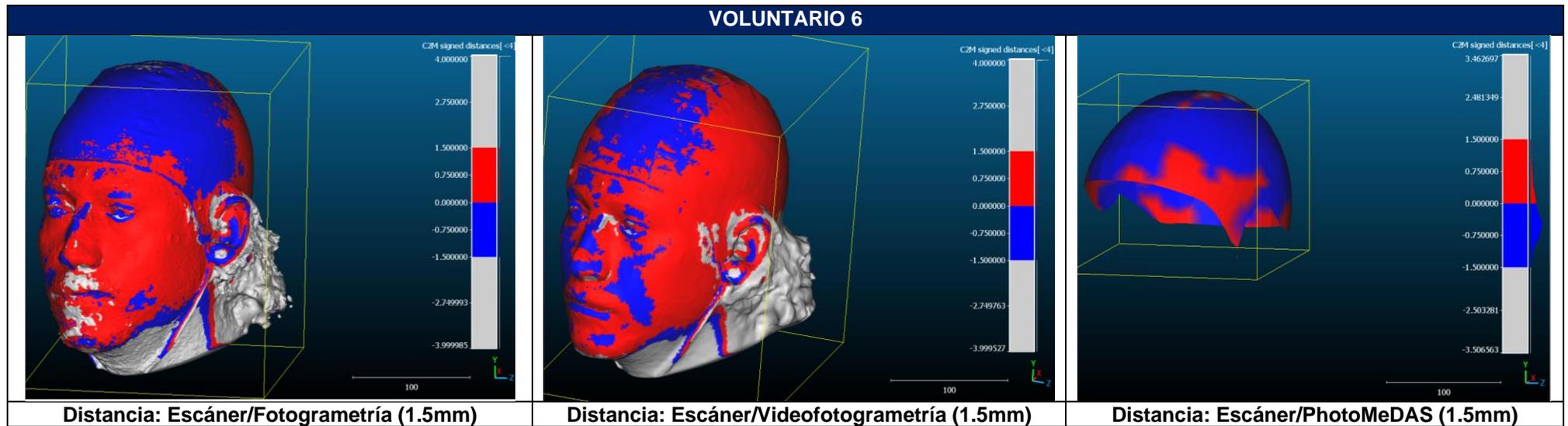


Figura 52. Comparativo de distancia entre modelos 3D – Voluntario 6.

7.10. HISTOGRAMAS DISTANCIAS ENTRE MODELOS

Se utilizó la herramienta de CloudCompare para visualizar el histograma, que muestra la distribución de las distancias entre los tres modelos y el modelo de referencia. Las Figuras 53 a 60 muestran los resultados de estas herramientas, permitiendo evaluar la calidad de los modelos de la cámara, video y Photomedas, y detectar posibles desviaciones y errores en los modelos obtenidos.

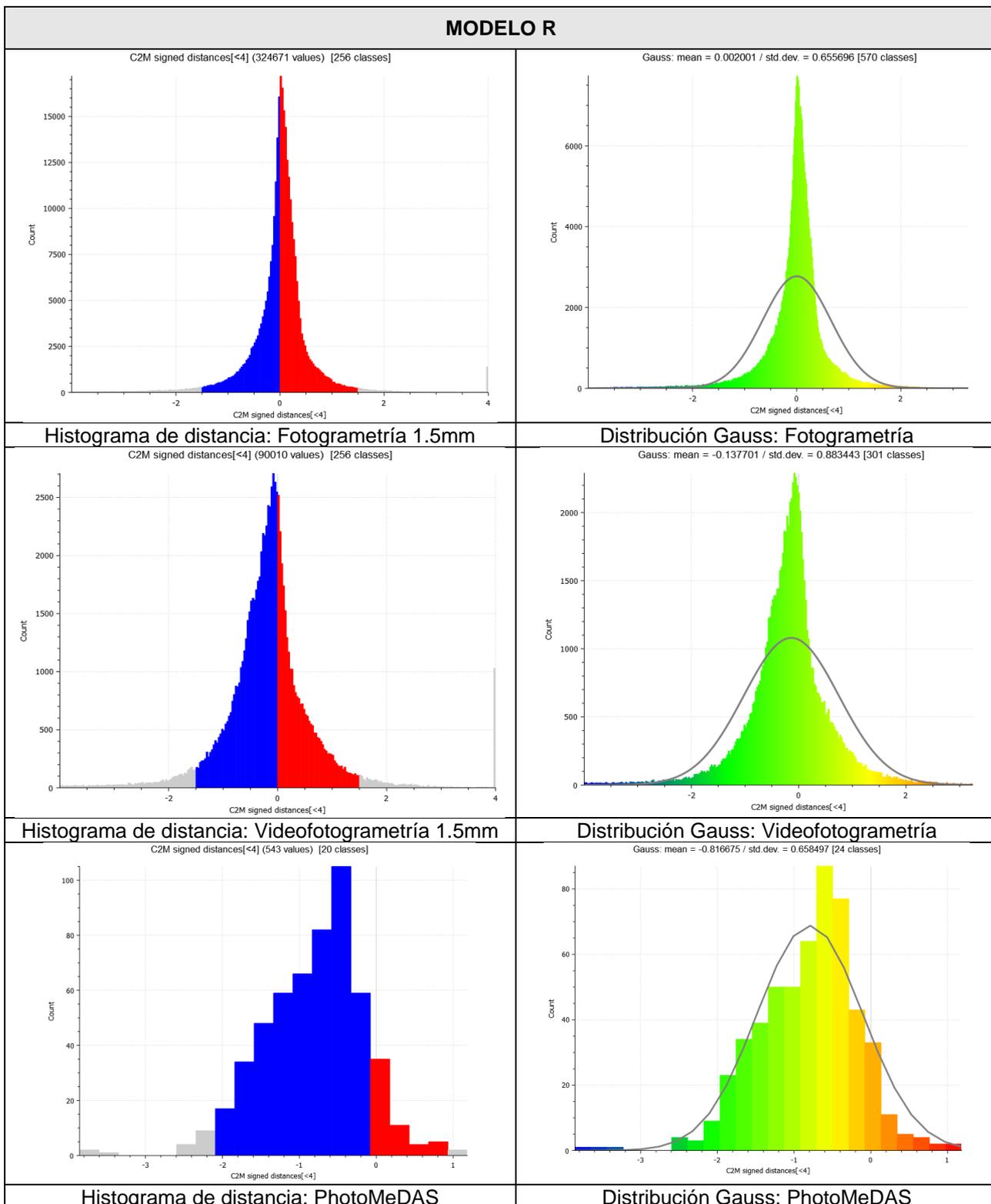


Figura 53. Histograma y distribución Gauss - Modelo R.

"Evaluación comparativa de modelos craneofaciales 3D utilizando dispositivos móviles y fotogrametría"

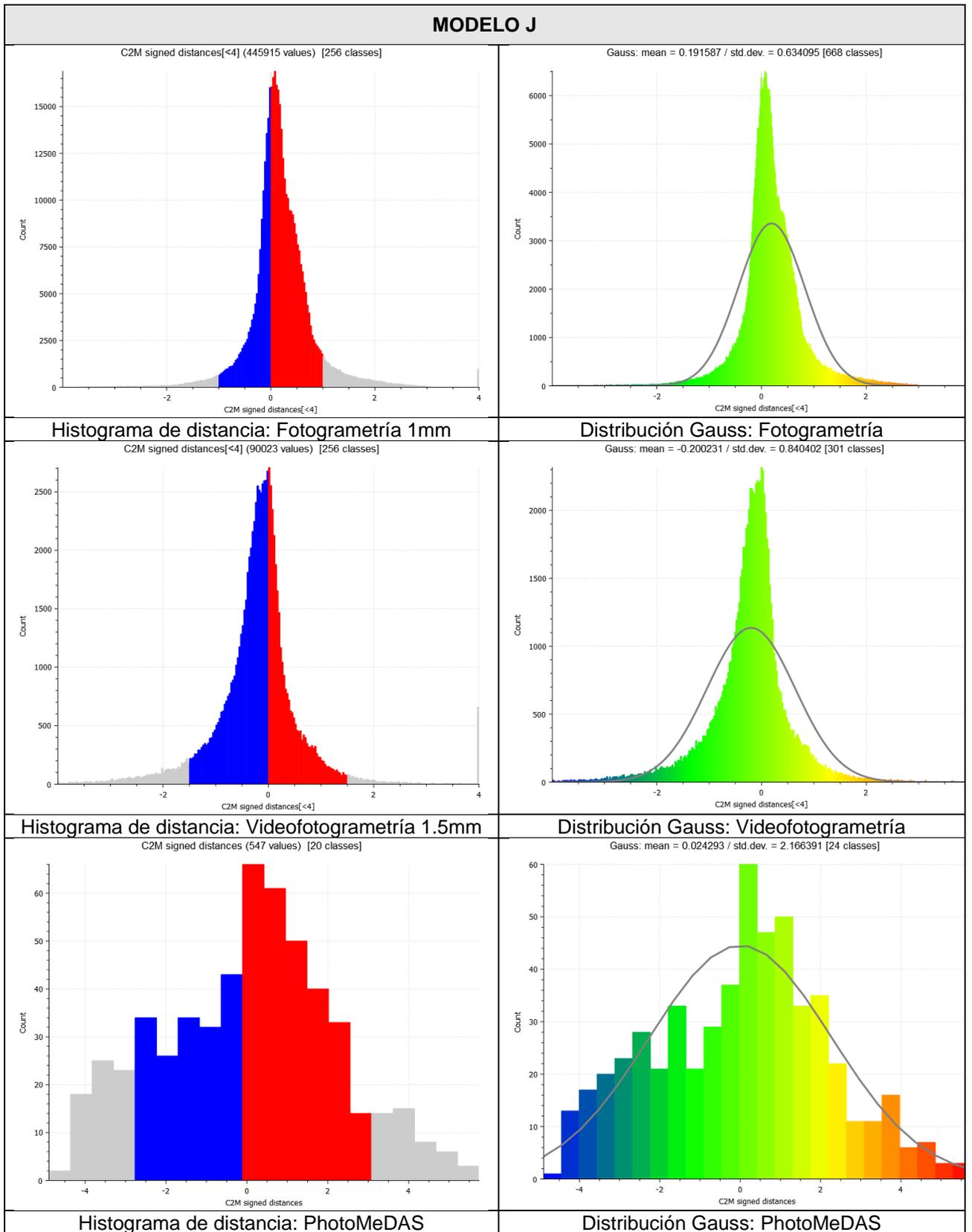


Figura 54. Histograma y distribución Gauss - Modelo J.

"Evaluación comparativa de modelos craneofaciales 3D utilizando dispositivos móviles y fotogrametría"

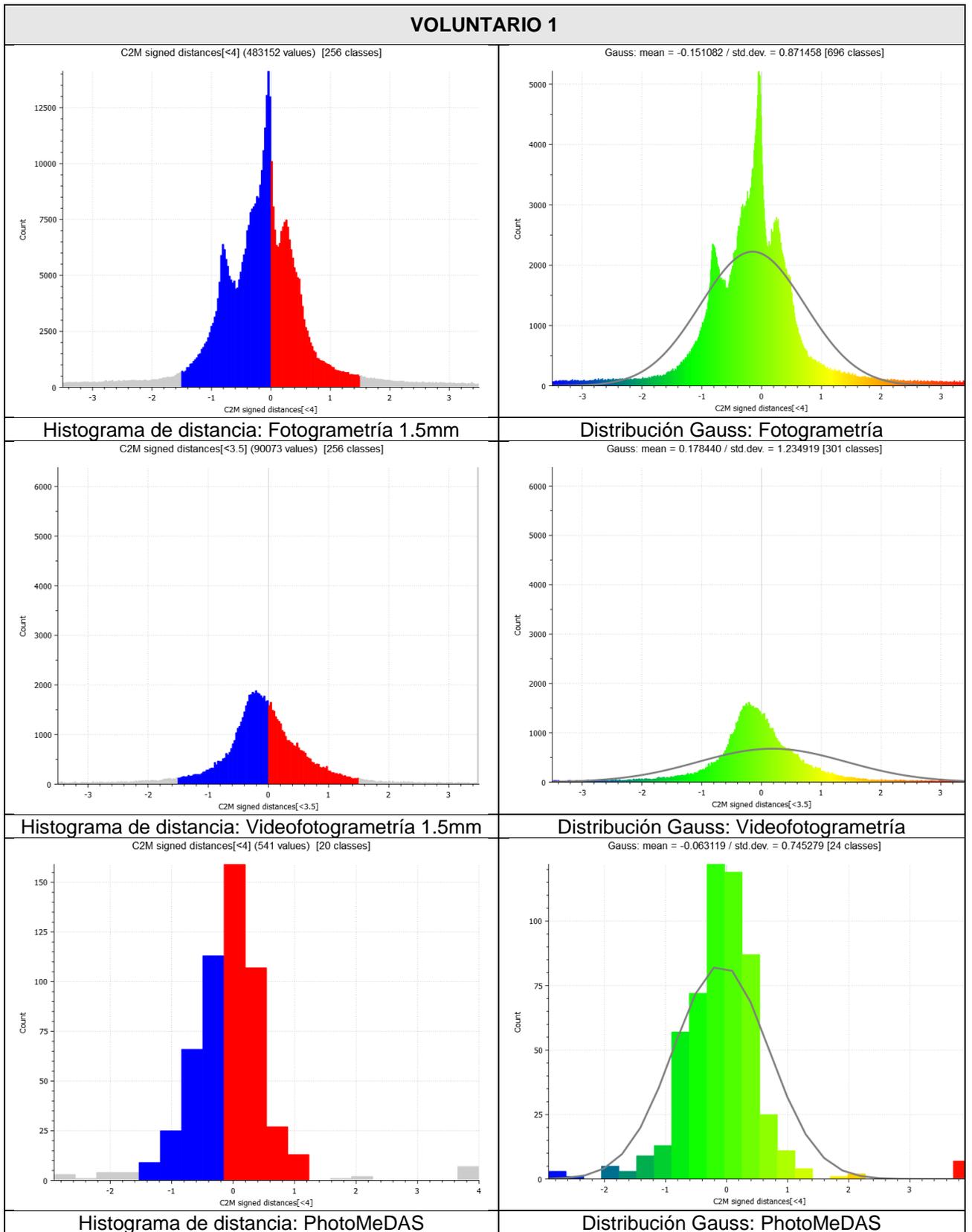


Figura 55. Histograma y distribución Gauss – Voluntario 1.

"Evaluación comparativa de modelos craneofaciales 3D utilizando dispositivos móviles y fotogrametría"

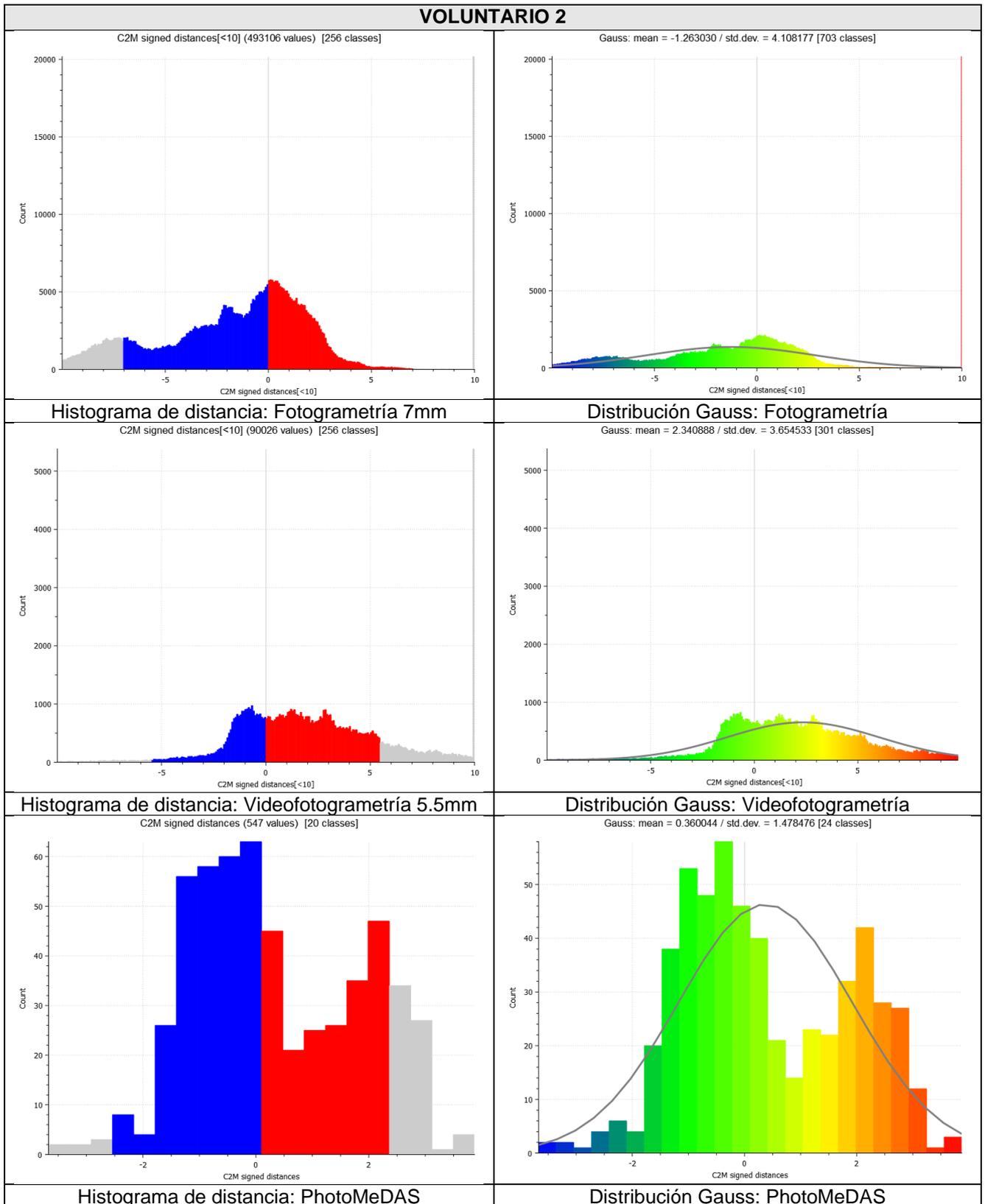


Figura 56. Histograma y distribución Gauss – Voluntario 2.

"Evaluación comparativa de modelos craneofaciales 3D utilizando dispositivos móviles y fotogrametría"

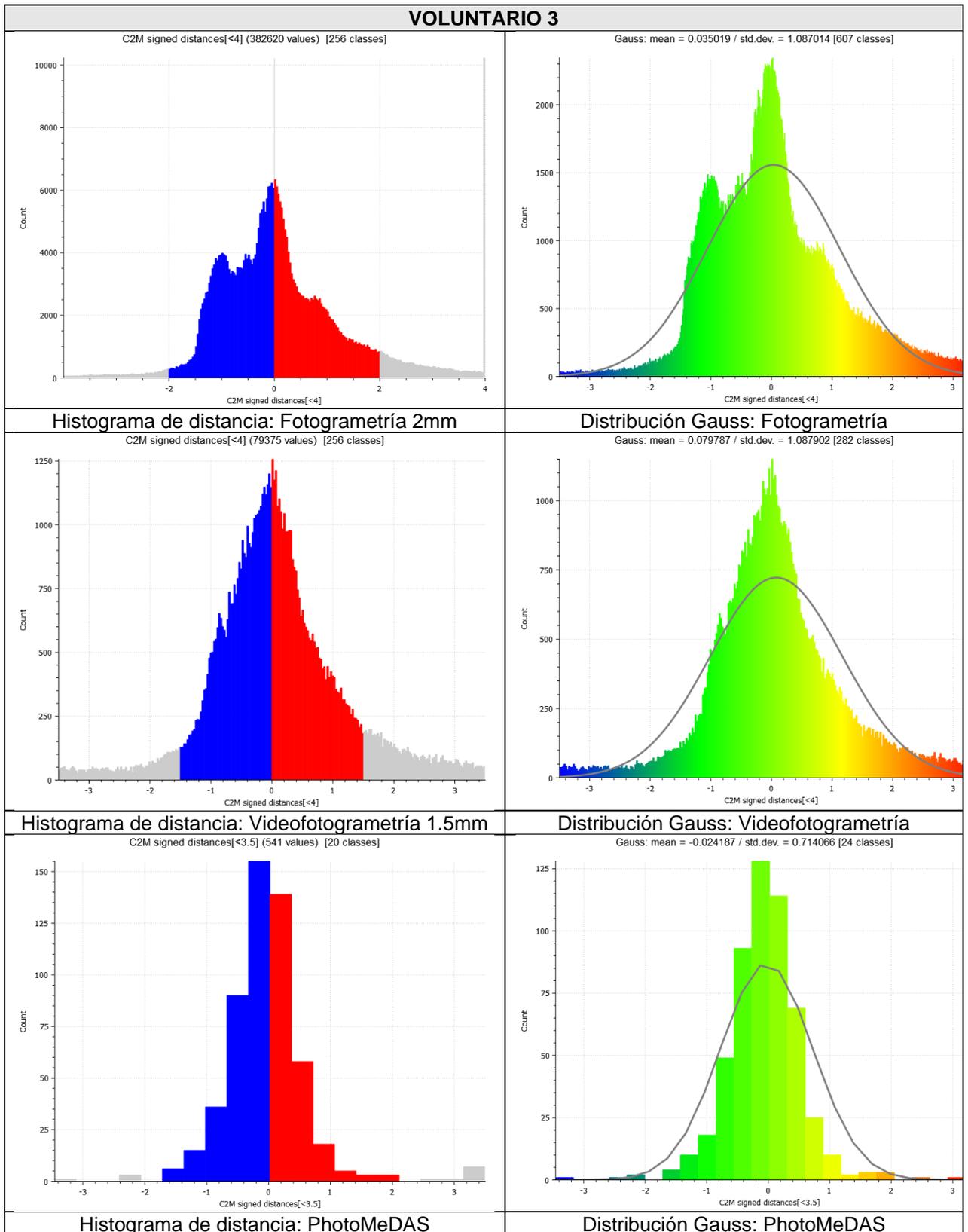


Figura 57. Histograma y distribución Gauss – Voluntario 3.

"Evaluación comparativa de modelos craneofaciales 3D utilizando dispositivos móviles y fotogrametría"

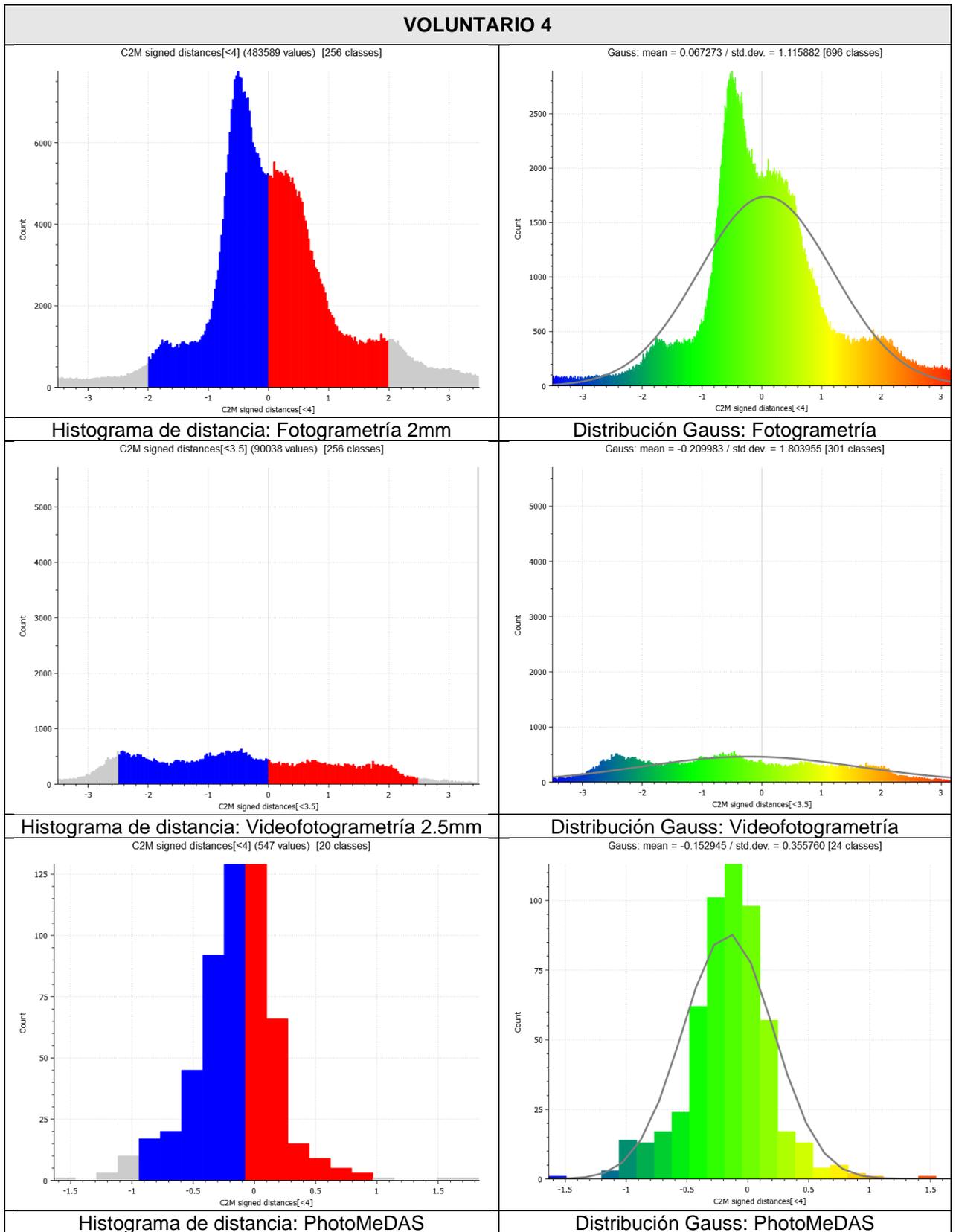


Figura 58. Histograma y distribución Gauss – Voluntario 4.

"Evaluación comparativa de modelos craneofaciales 3D utilizando dispositivos móviles y fotogrametría"

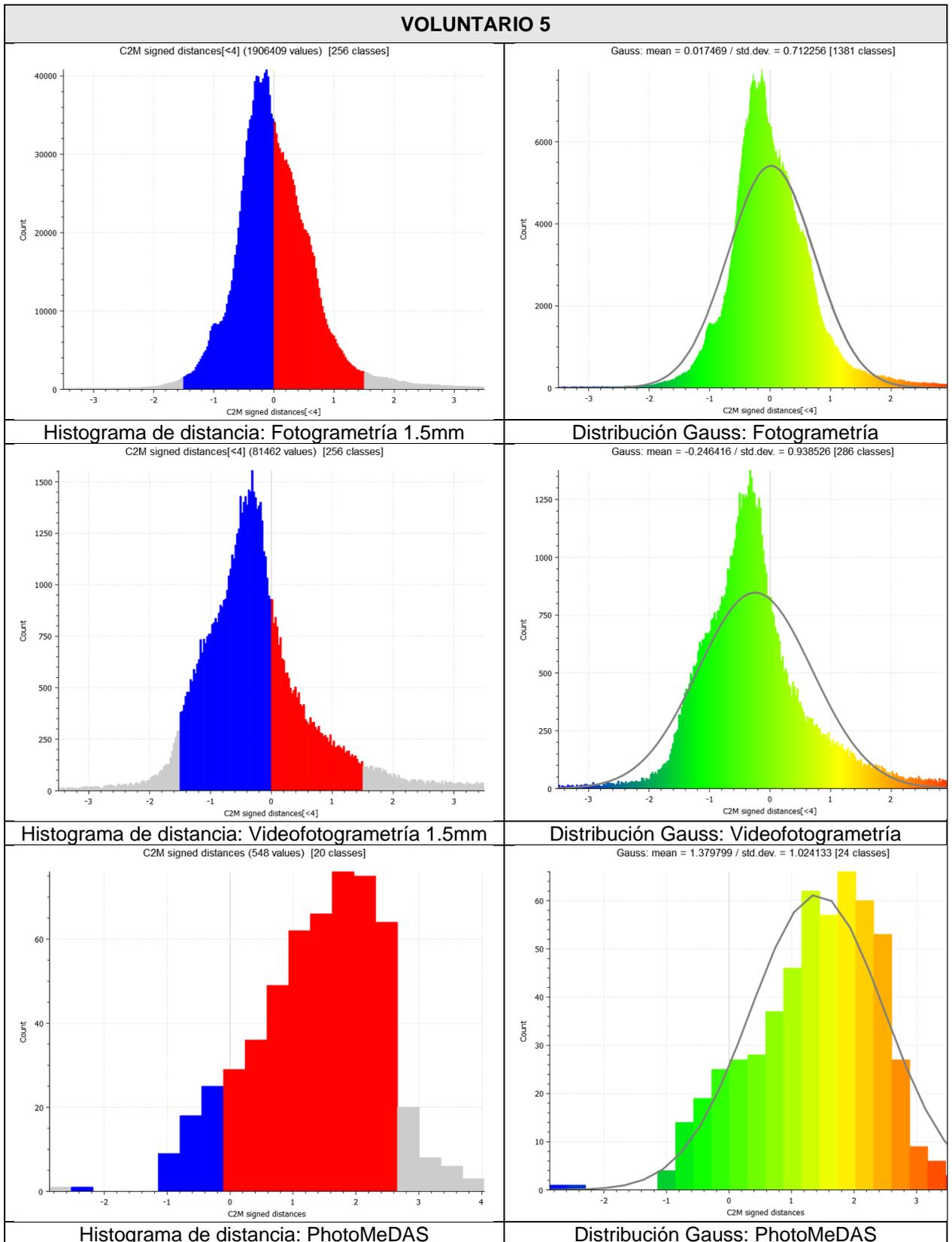


Figura 59. Histograma y distribución Gauss – Voluntario 5.

"Evaluación comparativa de modelos craneofaciales 3D utilizando dispositivos móviles y fotogrametría"

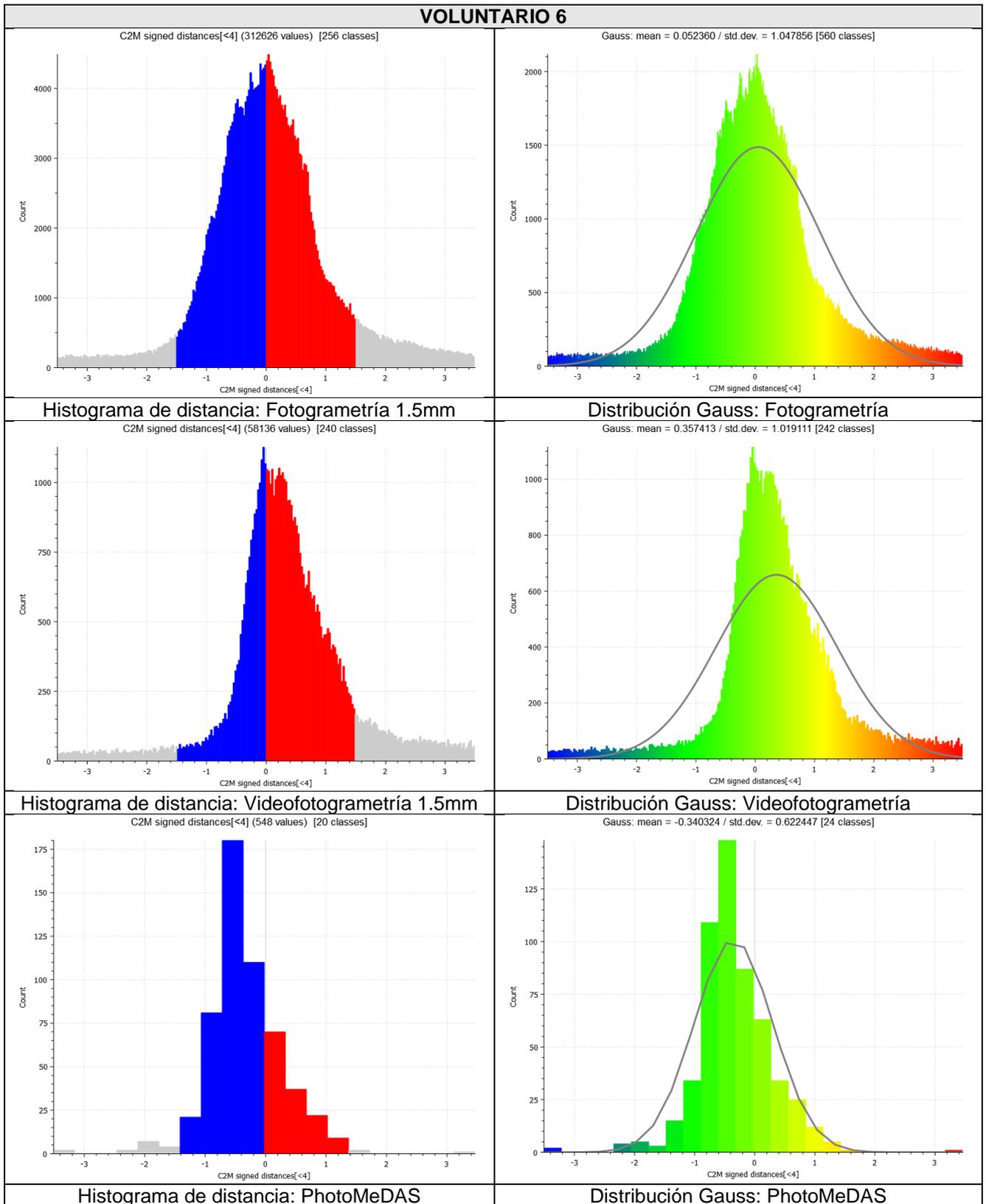


Figura 60. Histograma y distribución Gauss – Voluntario 6.

7.11. PUNTOS DE REFERENCIA ANATÓMICA EN LA CABEZA

En el marco de este trabajo de investigación, se definió qué los puntos de referencia craneofacial o puntos de referencia anatómica en la cabeza. Para identificar los puntos de referencia anatómico en la cabeza, se han utilizado los vértices aruco, marcas en la piel, lunares, *face landmarks*, entre otros puntos fácilmente identificables en el modelo texturizado. Esto permite comparar coordenadas x,y,z de los puntos 3D obtenidos con diferentes métodos.

7.12. COMPARATIVA DE PUNTOS DE REFERENCIA ANATÓMICA

En esta parte del estudio, para disponer una mejor organización se dividió la cabeza en cinco zonas (Figura 61). La identificación de puntos fue utilizando como apoyo el modelo 3D y su texturizado de los distintos procedimientos (escáner, fotogrametría y videofotogrametría) y para el caso de PhotoMeDAS la identificación es por la posición del modelo referenciado.

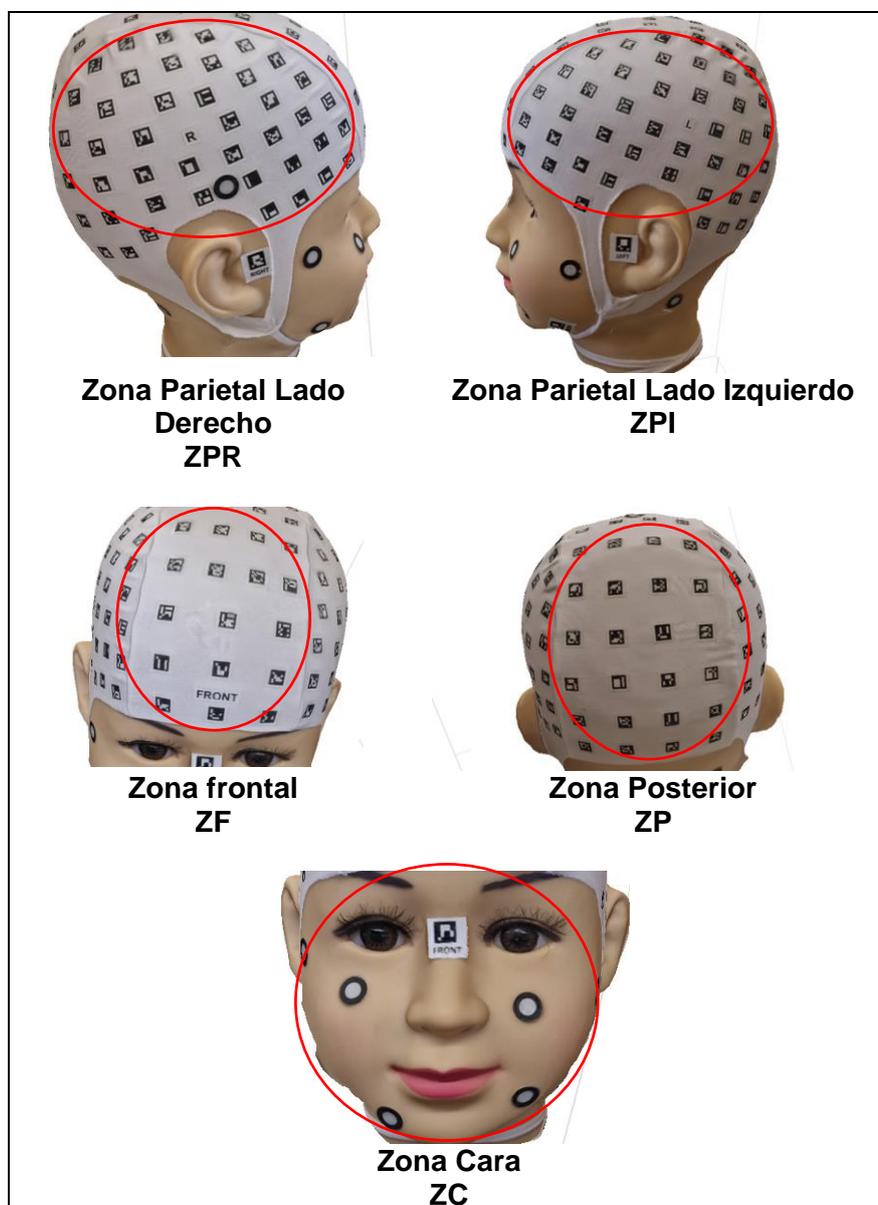


Figura 61. Zonificación de la cabeza. Elaboración propia.

"Evaluación comparativa de modelos craneofaciales 3D utilizando dispositivos móviles y fotogrametría"

Previa referenciación e identificación de los puntos de referencia anatómica de interés, se obtuvo coordenadas tridimensionales X, Y, Z para cada zona evaluada. Para lograr este objetivo se utilizó el software Agisoft Metashape (ver figura 62), ya que los modelos 3D estaban correctamente referenciados. Se consideraron 3 puntos por cada zona representada, utilizando los vértices de las marcas para algunas zonas y los face landmarks para otras, específicamente para la zona del gorro y la zona del rostro. De esta manera se logró obtener coordenadas precisas y detalladas para cada zona evaluada en los diferentes modelos 3D.

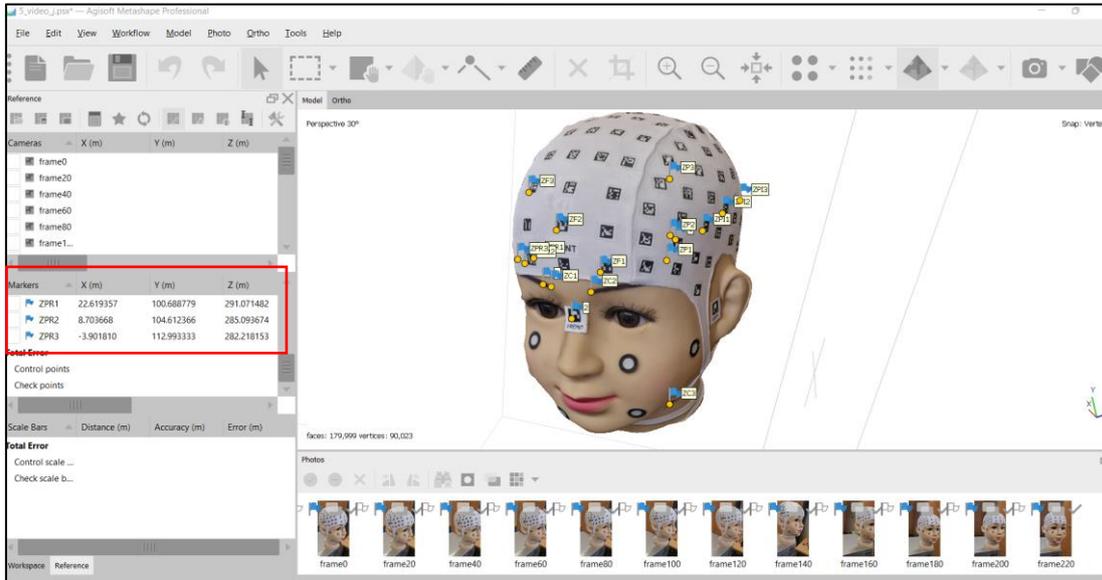


Figura 62. Obtención de coordenadas de los modelos referenciados para cámara y video.

Para el caso de la obtención de coordenadas del modelo obtenido con PhotoMeDAS se utilizó la identificación de los vértices de las marcas y sus valores en el software CloudCompare.

8. RESULTADOS [JLL15][OCQE16][OQ17][JLL18][OCQE19]

Se lograron obtener modelos 3D craneofaciales a partir de dispositivos móviles y técnicas fotogramétricas, y se compararon con el modelo craneal obtenido con escáner 3D. Se evaluó la calidad de los modelos en relación con la precisión y nivel de detalle de las estructuras anatómicas representadas.

8.1. COMPARATIVA DE TIEMPO

Se realiza un comparativo de tiempo (Tabla 7) considerando desde la instalación hasta la obtención del modelo 3D, el cual consiste la instalación del equipo, calibración, instrucción a los voluntarios, recolección de data, procesamiento, limpieza de ruido y exportación del modelo 3D.

MODELO	PhotoMeDAS	FOTOGRAMETRIA	VIDEOFOTOGRAMETRIA	ESCANER 3D
M R	3.5 min	76.9 min	11.4 min	30min -40 min
M J	3 min	71.25 min	10.2 min	30min -40 min
V 1	8.2 min	64.9 min	16.2 min	30min -40 min
V 2	12.2 min	97.6 min	9.2 min	30min -40 min
V 3	11.1 min	75.3 min	8.1 min	30min -40 min
V 4	3.3 min	115.1 min	13.6 min	30min -40 min
V 5	7.2 min	235.9 min	10 min	30min -40 min
V 6	4.8 min	86.18 min	17.3 min	30min -40 min

Tabla 7. Comparativa de tiempos por cada procedimiento.

8.2. RESULTADO DE CONSTRUCCIÓN DE MODELO 3D CÁMARA Y VIDEO

8.2.1. MALLADO OBTENIDO CON CÁMARA Y VIDEO

Los modelos obtenidos a partir de la cámara presentan una mayor resolución y densidad de puntos que los modelos obtenidos con el video como se puede visualizar en la Tabla 8. El modelo obtenido con la cámara presenta una resolución mínima de 0.2 mm/pix y una densidad mínima de puntos de 9 points/mm, mientras que el modelo obtenido con el video presenta una resolución de mínima de 0.5 mm/pix y una densidad de puntos mínima de 1.5 points/mm.

MODELO	CAMARA		VIDEO	
	Resolución	Densidad de puntos.	Resolución	Densidad de puntos
M R	0.2 mm/pix	27.5 points/mm	0.5 mm/pix	3.8 points/mm
M J	0.2 mm/pix	20.9 points/mm	0.5 mm/pix	3.4 points/mm
V 1	0.3 mm/pix	14.1 points/mm	0.6 mm/pix	2.4 points/mm
V 2	0.3 mm/pix	11.0 points/mm	0.8 mm/pix	1.5 points/mm
V 3	0.3 mm/pix	10.8 points/mm	0.7 mm/pix	2.2 points/mm
V 4	0.3 mm/pix	10.9 points/mm	0.7 mm/pix	2.1 points/mm
V 5	0.2 mm/pix	11.2 points/mm	0.8 mm/pix	1.7 points/mm
V 6	0.3 mm/pix	9.0 points/mm	0.8 mm/pix	1.6 points/mm

Tabla 8. Resolución y densidad de puntos para el mallado de los modelos 3D.

En general, se puede observar que los modelos obtenidos con la cámara presentan una mayor calidad que los modelos obtenidos con el video en cuanto a resolución (Figura 62) y densidad de puntos (Figura 63).

"Evaluación comparativa de modelos craneofaciales 3D utilizando dispositivos móviles y fotogrametría"

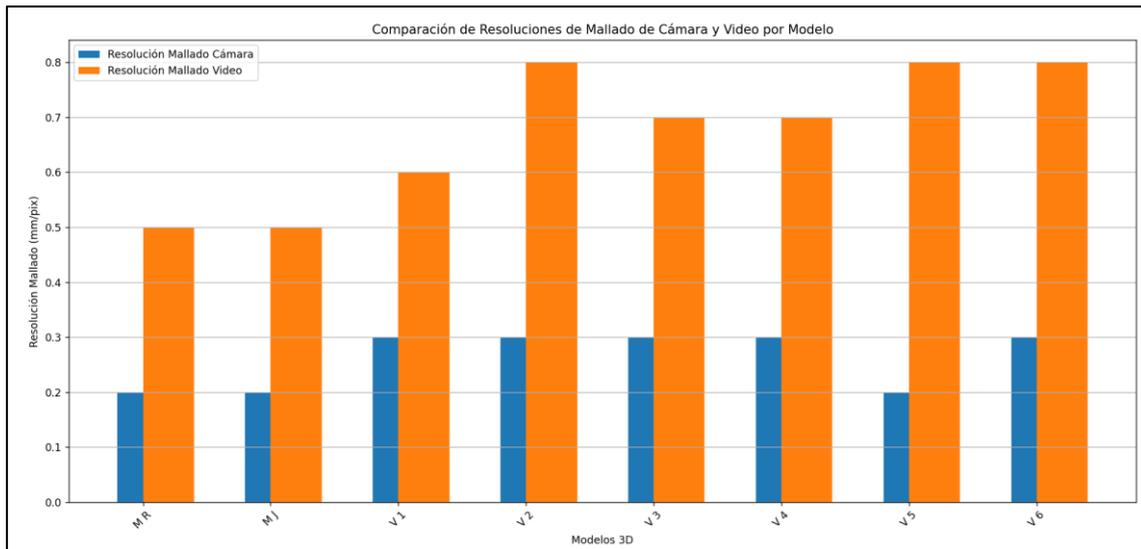


Figura 63. Comparativo de resolución de enmallado cámara y video.

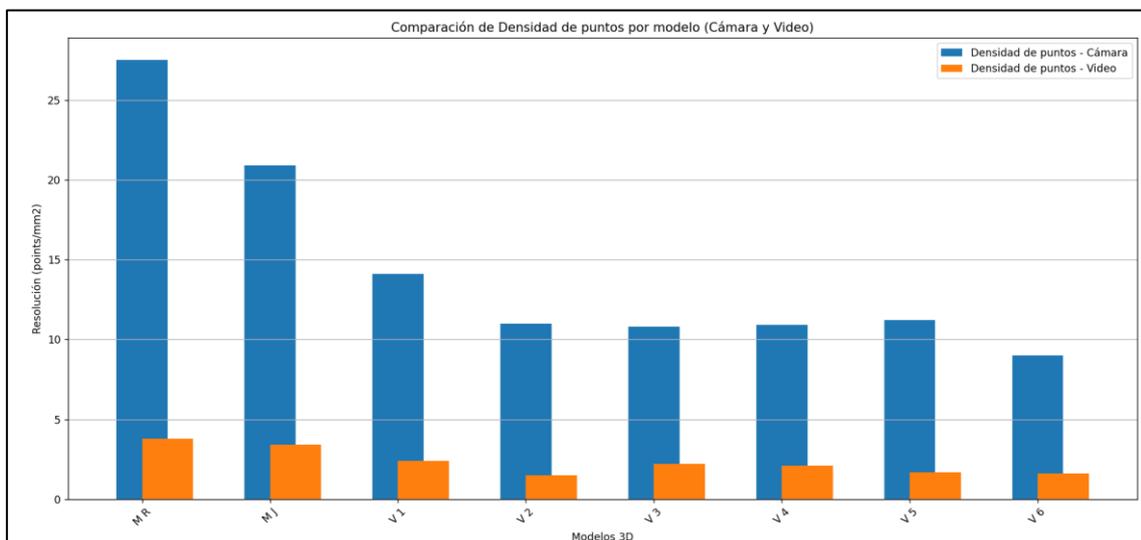


Figura 64. Comparativo de densidad de puntos cámara y video

8.3. RESPECTO AL TEXTURIZADO CON CÁMARA Y VIDEO

En la Tabla 8 se presenta un comparativo del error de reproyección y la resolución del modelo texturizado de los modelos 3D craneofaciales obtenidos con cámara y video. En general, se puede observar que los modelos obtenidos con cámara presentan una mayor resolución del modelo que los obtenidos con video.

MODELO	CÁMARA		VIDEO	
	Reprojections error	Ground resolution	Reprojections error	Ground resolution
M R	3.33 pix	0.05 mm/pix	2.06 pix	0.13 mm/pix
M J	2.90 pix	0.05 mm/pix	2.05 pix	0.14 mm/pix
V 1	3.03 pix	0.07 mm/pix	1.91 pix	0.16 mm/pix
V 2	4.57 pix	0.08 mm/pix	2.06 pix	0.21 mm/pix
V 3	3.42 pix	0.08 mm/pix	1.79 pix	0.17 mm/pix
V 4	2.92 pix	0.08 mm/pix	1.58 pix	0.17 mm/pix
V 5	2.37 pix	0.08 mm/pix	1.15 pix	0.20 mm/pix
V 6	2.94 pix	0.08 mm/pix	1.64 pix	0.20 mm/pix

Tabla 9. Comparativo de error de reproyección y Ground resolution entre la cámara y video.

Estos resultados sugieren que el uso de cámaras para la captura y texturizado de modelos 3D craneofaciales puede producir resultados de mayor calidad que el uso de videos, en torno a 2 veces (2x). [JLL20][OCQ E21]

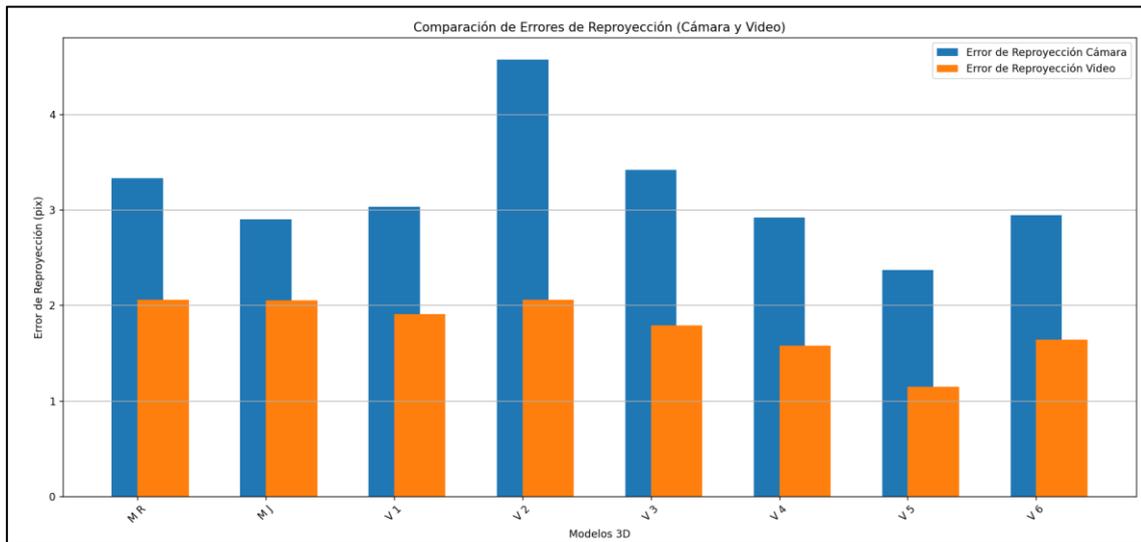


Figura 65. Comparativo de error de reproyección de textura cámara y video.

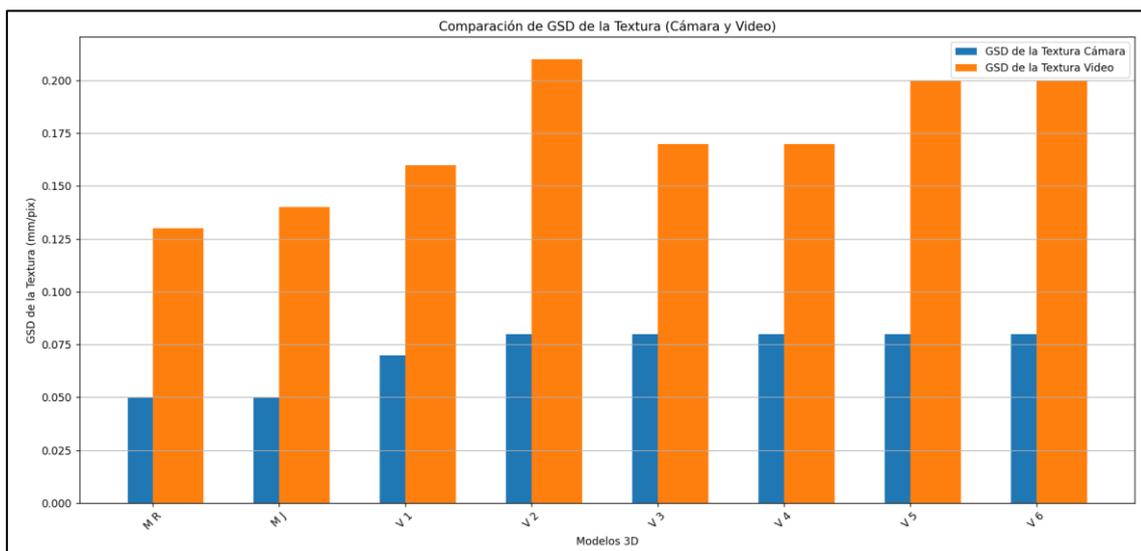


Figura 66. Comparativo de GSD cámara y video

8.4. REFERENCIACIÓN FOTOGRAMÉTRICO - CÁMARA

8.4.1. REFERENCIACIÓN FOTOGRAMÉTRICO - CÁMARA

Los resultados de la Tabla 9 indican los errores residuales en el proceso de referenciación del modelo obtenido a través de la cámara. Los valores de error son presentados en milímetros para las coordenadas x, y, z, mientras que el error en la coordenada y se presenta en milímetros también. El total de error se presenta en milímetros.

Se puede observar que los modelos M R y M J presentan errores menores en comparación con los modelos obtenidos a través de video (V1, V2, V3, V4, V5 y V6). Los modelos V2 y V4 presentan errores más altos que los demás modelos obtenidos a través de video.

Es importante destacar que estos valores de error son muy pequeños y que los modelos generados a través de la cámara y la fotogrametría presentan una alta precisión en la referenciación espacial.

MODELO	x error	y error	z error	xy error	Total	Imagen(pixel)
M R	0.02 mm	0.01 mm	0.01 mm	0.02 mm	0.02 mm	0.24 pix
M J	0.01 mm	0.01 mm	0.01 mm	0.01 mm	0.01 mm	0.15 pix
V 1	0.01 mm	0.00 mm	0.01 mm	0.01 mm	0.02 mm	0.29 pix
V 2	0.21 mm	0.20 mm	0.25 mm	0.29 mm	0.38 mm	6.82 pix
V 3	0.10 mm	0.10 mm	0.07 mm	0.14 mm	0.15 mm	2.87 pix
V 4	0.09 mm	0.03 mm	0.16 mm	0.10 mm	0.19 mm	3.00 pix
V 5	0.04 mm	0.03 mm	0.05 mm	0.06 mm	0.08 mm	1.55 pix
V 6	0.03 mm	0.01 mm	0.02 mm	0.03 mm	0.03 mm	1.05 pix

Tabla 10. Error residual en el proceso de referenciación del modelo – cámara.

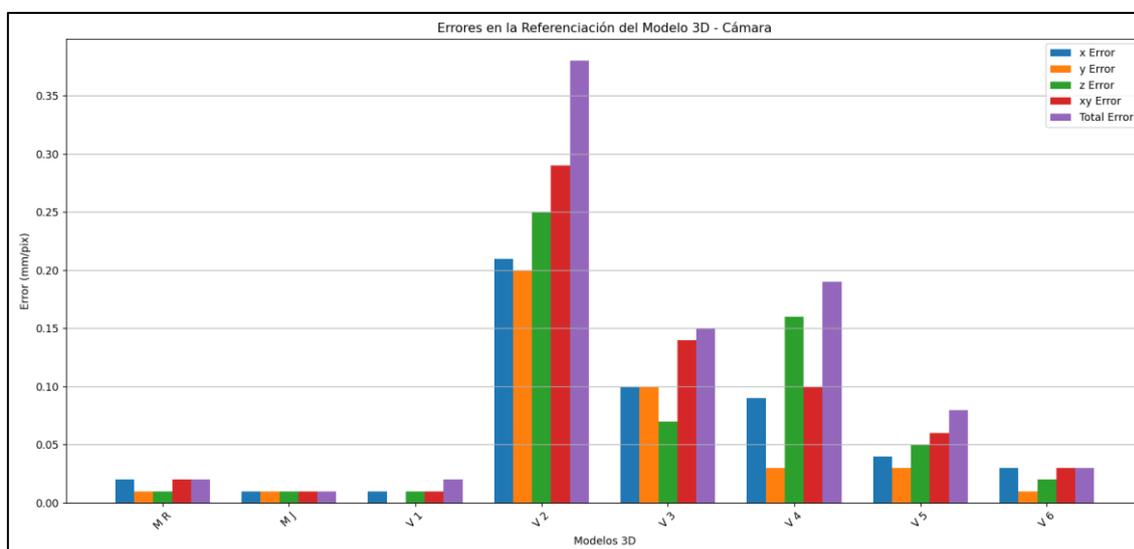


Figura 67. Resumen de error de referenciación entre modelos - Cámara

8.4.2. REFERENCIACIÓN FOTOGRAMÉTRICO – VIDEO

En general, se observa que el error residual en la referenciación fotogramétrica es menor para la cámara que para el video. Además, en la cámara se observa que el error en la altura (z) es menor que en el video, mientras que en el video se observa que el error en la posición horizontal (xy) es mayor que en la cámara.

En particular, se observa que el modelo V2 presenta un error de referenciación fotogramétrica bastante alto en ambas técnicas (cámara y video), con un total de 6.82 pixeles en la cámara y 4.13 pixeles en el video. En contraste, el modelo V5 presenta el menor error en la cámara, con un total de 0.08 mm, y el modelo V1 presenta el menor error en el video, con un total de 0.01 mm.

Es importante tener en cuenta que la precisión y exactitud en la referenciación fotogramétrica puede estar influenciada por varios factores, como la calidad de las imágenes, la calidad del equipo utilizado, la calidad de los puntos de control utilizados, entre otros. Por lo tanto, estos resultados pueden variar en diferentes situaciones y deben ser interpretados con precaución.

MODELO	x error	y error	z error	xy error	total	Imagen(pixel)
M R	0.01 mm	0.00 mm	0.01 mm	0.01 mm	0.01 mm	0.50 pix
M J	0.04 mm	0.03 mm	0.05 mm	0.05 mm	0.07 mm	0.44 pix
V 1	0.00 mm	0.00 mm	0.01 mm	0.01 mm	0.01 mm	0.22 pix
V 2	0.01 mm	0.03 mm	0.01 mm	0.03 mm	0.04 mm	4.13 pix
V 3	0.01 mm	0.01 mm	0.01 mm	0.02 mm	0.02 mm	2.46 pix
V 4	0.01 mm	0.00 mm	0.01 mm	0.01 mm	0.01 mm	2.01 pix
V 5	0.02 mm	0.01 mm	0.02 mm	0.02 mm	0.03 mm	0.53 pix
V 6	0.02 mm	0.01 mm	0.03 mm	0.02 mm	0.04 mm	1.32 pix

Tabla 11. Error residual en el proceso de referenciación del modelo – Video.

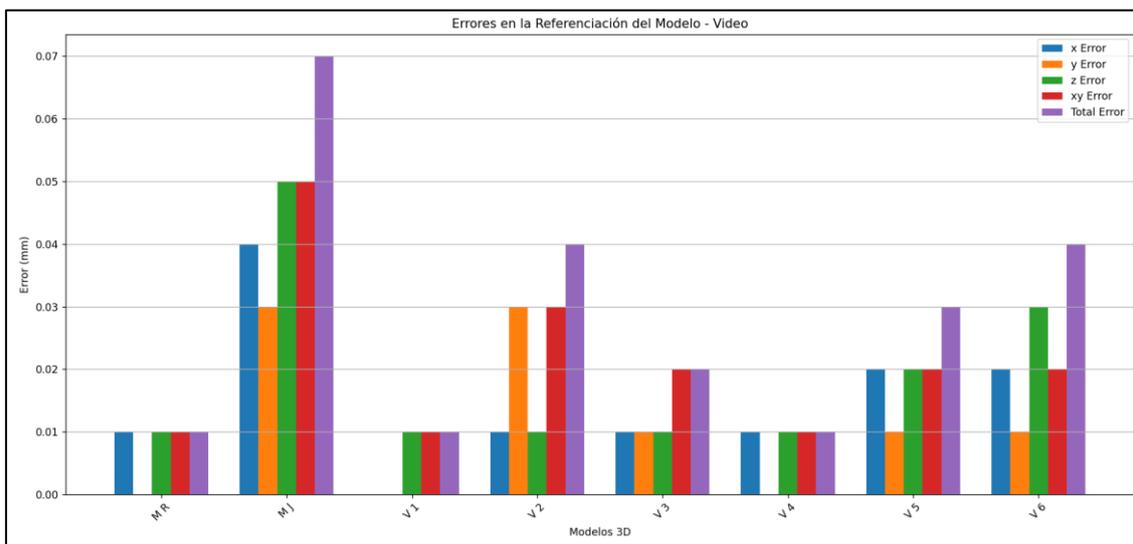


Figura 68. Resumen de error de referenciación entre modelos – Video.

8.4.3. COMPARATIVO DE REFERENCIACIÓN PHOTOMEDAS

En la Tabla 11 se presenta un comparativo del factor de escala y el error cuadrático medio (RMS) obtenido en el proceso de referenciación de los modelos generados con PhotoMeDAS.

El factor de escala indica la relación entre la dimensión real de un objeto y su representación en la imagen, mientras que el RMSE es una medida de la precisión del modelo generado. En general, cuanto más cercano a 1 sea el factor de escala y menor sea el RMSE, mejor será la calidad del modelo.

En este caso, se puede observar que los modelos generados con la cámara tienen un factor de escala cercano a 1 y un RMS bajo, lo que indica una buena precisión en el proceso de referenciación. En cambio, los modelos generados con video tienen un factor de escala ligeramente inferior a 1 y un RMSE un poco más elevado que los generados con la cámara. Los modelos generados con PhotoMeDAS presentan un factor de escala cercano a 1 y un RMSE bajo en la mayoría de los casos, aunque hay algunas excepciones como el modelo V2, que presenta un factor de escala más bajo y un RMS más elevado que los demás modelos.

En resumen, estos resultados indican que los modelos generados con la cámara presentan una mayor precisión en el proceso de referenciación, mientras que los modelos generados con video y PhotoMeDAS tienen una precisión similar, aunque con algunas variaciones entre modelos.

MODELO	FACTOR ESCALA	RMSE (mm)
M R	0.953	0.887
M J	0.975	1.763
V 1	0.961	0.777
V 2	0.945	3.179
V 3	0.968	1.013
V 4	0.976	0.140
V 5	0.988	0.851
V 6	0.970	1.023

Tabla 12. Factor de escala y RMS de los modelos PhotoMeDAS.

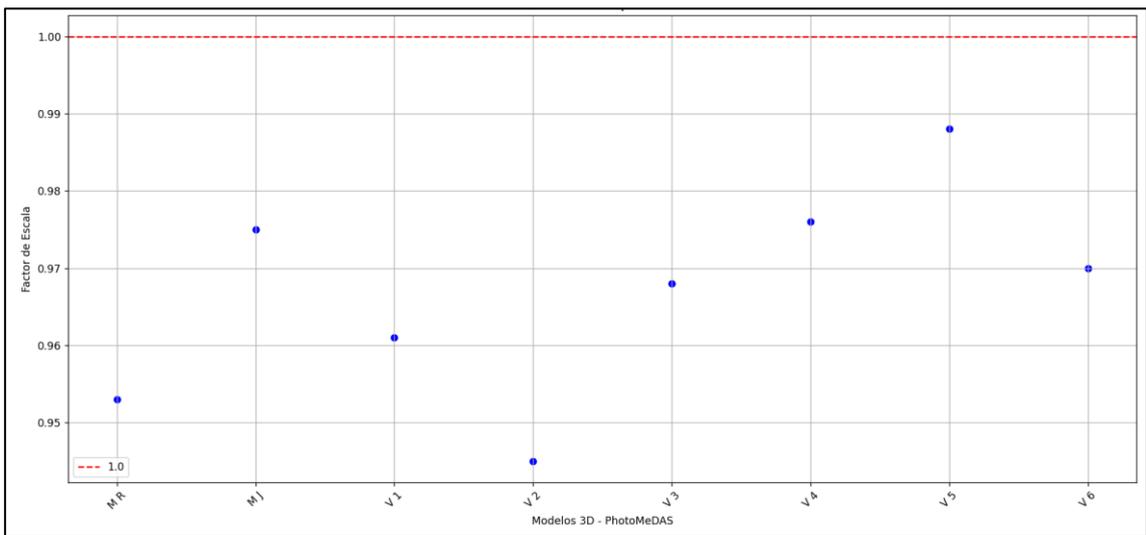


Figura 69. Comparativo de factor de escala – PhotoMeDAS.

8.5. COMPARATIVA DE DISTANCIA ENTRE MODELOS 3D

8.5.1. COMPARATIVA DE MODELOS EN CLOUDCOMPARE

La Tabla 13 muestra el resumen de las estadísticas generales de CloudCompare para comparar las distancias de los modelos 3D obtenidos con diferentes técnicas de captura. Los valores presentados son la media y la desviación estándar de la distancia entre los puntos de los modelos en cada método de captura: cámara, video y PhotoMeDAS.

Se puede observar que el modelo obtenido con la cámara (M R) presenta la menor media y desviación estándar en la distancia entre puntos, lo que indica que es el modelo más preciso. Los modelos obtenidos con video (V 2, V 4 y V 6) tienen una distancia media mayor y una desviación estándar más alta que el modelo de la cámara, lo que indica que tienen una precisión inferior. Por otro lado, el modelo PhotoMeDAS (M J) presenta la mayor distancia media y desviación estándar, lo que indica que es el menos preciso de los modelos 3D obtenidos.

Es importante tener en cuenta que estas estadísticas generales se basan en el análisis de la distancia entre los puntos de los modelos 3D, y no en la calidad visual de los modelos en sí mismos. Por lo tanto, también es necesario evaluar la calidad visual de los modelos para tener una comprensión completa de su precisión y utilidad en aplicaciones específicas.

Modelo	Media Cámara (mm)	Desv. Est. Cámara (mm)	Media. Video(mm)	Desv. Est. Video(mm)	Media PhotoMeDAS (mm)	Desv. Est. Photomedas [JLL22][OCQE23] [OQ24] (mm)
M R	0.002	0.656	0.138	0.883	0.82	0.66
M J	0.192	0.634	0.200	0.840	0.02	2.17
V 1	0.151	0.871	0.178	1.235	0.06	0.75
V 2	1.263	4.182	2.341	3.655	0.36	1.48
V 3	0.035	1.087	0.080	1.088	0.02	0.71
V 4	0.067	1.116	0.210	1.804	0.15	0.36
V 5	0.017	0.712	0.246	0.939	1.38	1.02
V 6	0.052	1.048	0.357	1.019	0.34	0.62[JLL25] [OCQE26][OQ27]
Promedio	0.222	1.288	0.469	1.433	0.394	1.021

Tabla 13. Comparativa de distancia entre modelos.

La figura 70 representa gráficamente la comparativa indicada en la tabla 13, la comparativa se divide según el modelo y según el procedimiento, según lo siguiente : (C)Procedimiento con Cámara,(V) Procedimiento con Video y (P)Procedimiento con PhotoMeDAS.

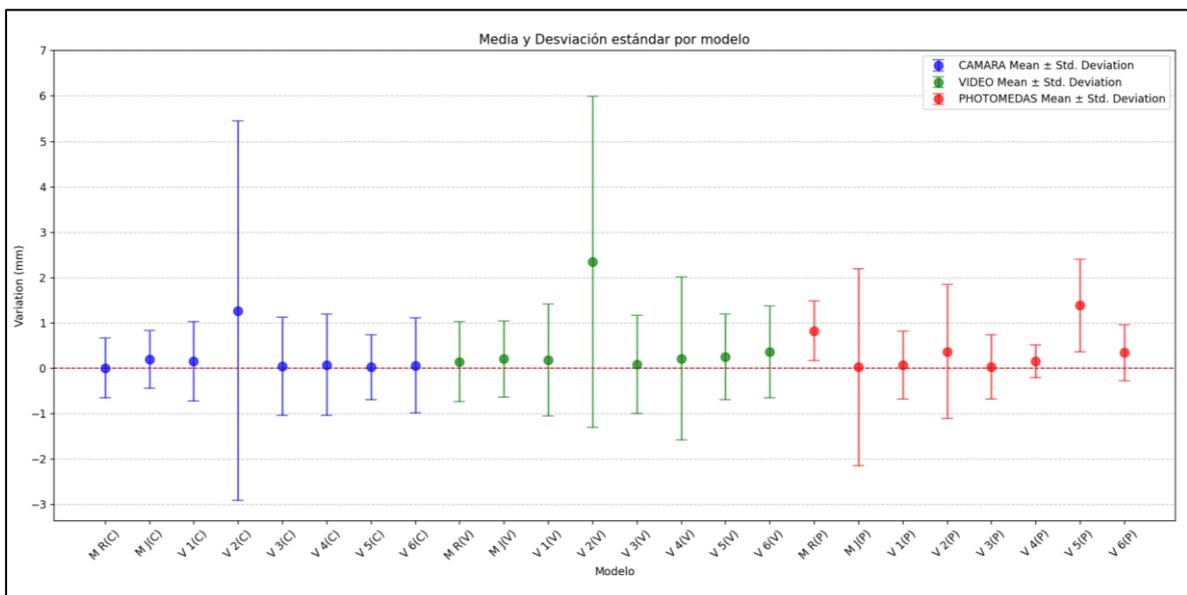


Figura 70. Comparativa media de distancia respecto al modelos mallados 3D del escáner.

8.5.2. COMPARATIVA DEL NÚMERO DE CARAS DE LOS MODELOS 3D

Los resultados obtenidos en los comparativos muestran que el modelo obtenido mediante el escáner láser presenta una mayor precisión y calidad [JLL28][OCQE29] en cuanto a la representación 3D del objeto (Tabla 14). Por otro lado, los modelos obtenidos mediante la cámara y el video presentan una menor precisión y calidad en comparación con el modelo obtenido mediante el escáner láser, pero aun así se obtienen resultados aceptables. Además, el modelo obtenido mediante PhotoMeDAS presenta una menor cantidad de caras en el mallado en comparación con los otros modelos, lo que indica que puede haber una menor precisión en la representación de los detalles finos del objeto. En general, se puede concluir que el escáner láser es la herramienta más recomendada para obtener modelos 3D de alta precisión y calidad, pero en caso de no ser posible su uso, la cámara y el video pueden ser alternativas viables.

Modelo	Escáner	Cámara	Video	Photomedas
M R	301,986	391,965	111,849	1,038
M J	332,552	461,530	98,119	1,045
V 1	392,642	565,065	111,672	1,031
V 2	420,262	588,931	98,745	1,041
V 3	408,642	319,257	75,626	1,030
V 4	460,980	447,549	79,580	1,041
V 5	429,127	650,590	82,852	1,047
V 6	411,820	278,301	60,027	1,039

Tabla 14. Comparativo del número de caras del mallado de los 4 modelos 3D

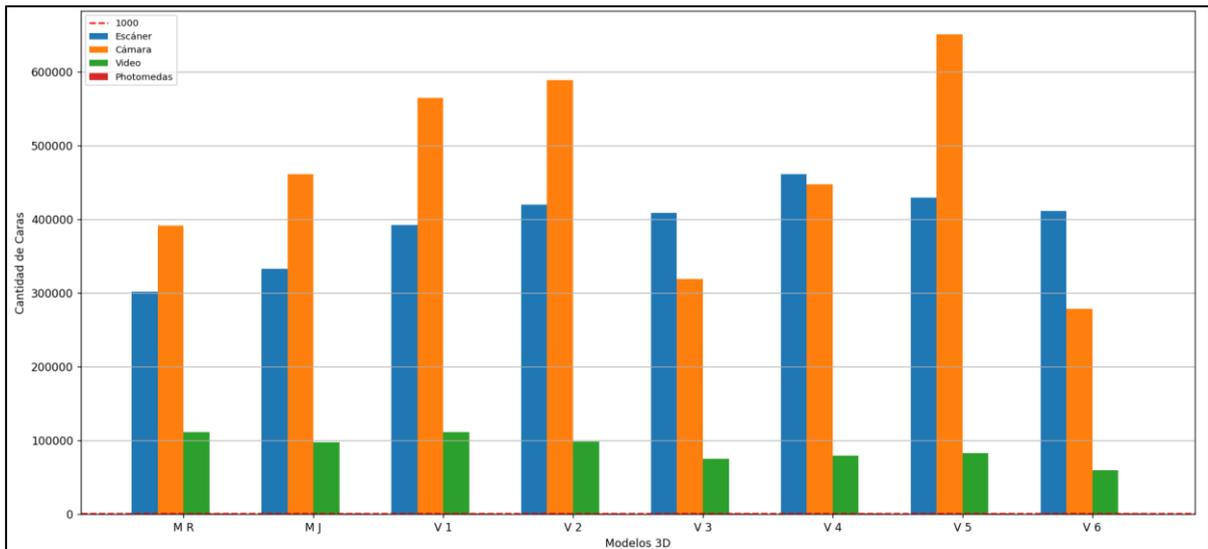


Figura 71. Comparativo del número de caras utilizadas para el mallado del cráneo.

8.5.3. COMPARATIVA DE DISTANCIA DE PUNTOS DE REFERENCIA ANATOMICA EN LA CABEZA

Esta Tabla 15 se muestra las distancias respecto al escaneado 3D para cada sector y para cada método de medición utilizado para el Modelo R. El promedio de las distancias es de 0.349 mm para la cámara, 0.451 mm para el video y 1.371 mm para el PhotoMeDAS. La distancia mínima se obtuvo en el sector ZPR2 con una medición de 0.092 mm para la cámara y 0.104 mm para el video, mientras que la distancia máxima se obtuvo en el sector ZPI2 con una medición de 2.092 mm para PhotoMeDAS. La desviación estándar de las distancias es de 0.232 mm para la cámara, 0.294 mm para el video y 0.555 mm para PhotoMeDAS. En general, el modelo R muestra una buena precisión en las mediciones de distancia de los puntos de referencia anatómica en la cabeza para los tres métodos utilizados.

MODELO R			
Distancia respecto al escaneado			
Sector	Cámara	Video	PhotoMeDAS
ZC1	0.310 mm	0.494 mm	-
ZC2	0.858 mm	0.362 mm	-
ZC3	0.178 mm	0.156 mm	-
ZF1	0.282 mm	0.104 mm	0.992 mm
ZF2	0.154 mm	0.245 mm	1.077 mm
ZF3	0.247 mm	0.219 mm	1.122 mm
ZPR1	0.208 mm	0.324 mm	1.560 mm
ZPR2	0.092 mm	0.308 mm	2.080 mm
ZPR3	0.269 mm	0.888 mm	1.837 mm
ZPI1	0.324 mm	0.267 mm	1.765 mm
ZPI2	0.355 mm	0.492 mm	2.092 mm
ZPI3	0.243 mm	0.646 mm	1.653 mm
ZP1	0.885 mm	0.287 mm	1.310 mm
ZP2	0.480 mm	0.924 mm	0.518 mm
ZP3	0.355 mm	1.041 mm	0.444 mm
Promedio	0.349 mm	0.451 mm	1.371 mm
Des. Estand	0.232 mm	0.294 mm	0.555 mm
Mínimo	0.092 mm	0.104 mm	0.444 mm
Máximo	0.885 mm	1.041 mm	2.092 mm

Tabla 15. Comparativa de puntos de referencia anatómica en la cabeza - Modelo R.

Siguiendo la misma estructura de la Tabla 15, se comparan las distancias de varios sectores con el modelo de referencia escaneado utilizando tres métodos diferentes: cámara, video y PhotoMeDAS. Lo mismo ocurre con las tablas 16 a la 22, donde se comparan las distancias de diferentes puntos en el modelo utilizando los mismos métodos.

MODELO J			
Distancia respecto al escaneado			
Sector	Cámara	Video	PhotoMeDAS
ZC1	0.861 mm	0.486 mm	-
ZC2	0.923 mm	0.370 mm	-
ZC3	0.132 mm	0.213 mm	-
ZF1	0.136 mm	0.524 mm	2.318 mm
ZF2	0.256 mm	0.264 mm	1.107 mm
ZF3	0.161 mm	0.388 mm	1.210 mm
ZPR1	0.181 mm	0.196 mm	1.642 mm
ZPR2	0.169 mm	0.126 mm	1.931 mm
ZPR3	0.327 mm	0.237 mm	1.714 mm
ZPI1	0.296 mm	0.394 mm	0.658 mm
ZPI2	0.122 mm	0.293 mm	1.418 mm
ZPI3	0.427 mm	0.406 mm	3.105 mm
ZP1	0.887 mm	0.492 mm	1.360 mm
ZP2	0.509 mm	0.278 mm	2.588 mm
ZP3	0.526 mm	0.642 mm	3.454 mm
Promedio	0.394 mm	0.354 mm	1.875 mm
Des. Estand	0.288 mm	0.142 mm	0.841 mm
Mínimo	0.122 mm	0.126 mm	0.658 mm
Máximo	0.923 mm	0.642 mm	3.454 mm

Tabla 16. Comparativa de puntos de referencia anatómica en la cabeza - Modelo J.

VOLUNTARIO 1			
Distancia respecto al escaneado			
Sector	Cámara	Video	PhotoMeDAS
ZC1	0.689 mm	1.047 mm	-
ZC2	0.881 mm	1.567 mm	-
ZC3	0.827 mm	0.948 mm	-
ZF1	0.194 mm	0.478 mm	1.195 mm
ZF2	0.667 mm	0.877 mm	0.391 mm
ZF3	0.426 mm	0.381 mm	0.389 mm
ZPR1	0.744 mm	0.746 mm	0.967 mm
ZPR2	0.807 mm	1.473 mm	1.371 mm
ZPR3	0.489 mm	0.662 mm	1.021 mm
ZPI1	0.524 mm	0.483 mm	1.343 mm
ZPI2	0.787 mm	0.532 mm	1.780 mm
ZPI3	0.504 mm	0.295 mm	1.869 mm
ZP1	1.747 mm	2.643 mm	1.388 mm
ZP2	1.990 mm	2.705 mm	1.247 mm
ZP3	2.485 mm	3.227 mm	1.582 mm
Promedio	0.917 mm	1.204 mm	1.212 mm
Des. Estand	0.641 mm	0.938 mm	0.469 mm
Mínimo	0.194 mm	0.295 mm	0.389 mm
Máximo	2.485 mm	3.227 mm	1.869 mm

Tabla 17. Comparativa de puntos de referencia anatómica en la cabeza – Voluntario 1.

VOLUNTARIO 2			
Sector			
Sector	Cámara	Video	PhotoMeDAS
ZC1	9.090 mm	7.750 mm	-
ZC2	8.627 mm	5.687 mm	-
ZC3	5.081 mm	3.844 mm	-
ZF1	0.671 mm	1.935 mm	1.763 mm
ZF2	1.180 mm	0.969 mm	1.838 mm
ZF3	2.450 mm	2.891 mm	1.802 mm
ZPR1	8.692 mm	8.296 mm	3.959 mm
ZPR2	8.410 mm	8.519 mm	3.337 mm
ZPR3	6.094 mm	7.855 mm	4.180 mm
ZPI1	6.189 mm	6.008 mm	4.200 mm
ZPI2	7.792 mm	6.515 mm	4.713 mm
ZPI3	4.723 mm	5.996 mm	3.294 mm
ZP1	4.987 mm	3.040 mm	1.898 mm
ZP2	3.669 mm	2.999 mm	4.342 mm
Promedio	5.547 mm	5.164 mm	2.944 mm
Des. Estand	3.068 mm	2.771 mm	1.452 mm
Mínimo	0.671 mm	0.969 mm	1.763 mm
Máximo	9.090 mm	8.519 mm	4.713 mm

Tabla 18. Comparativa de puntos de referencia anatómica en la cabeza – Voluntario 2.

VOLUNTARIO 3			
Distancia respecto al escaneado			
Sector	Cámara	Video	PhotoMeDAS
ZC1	1.968 mm	1.668 mm	-
ZC2	1.211 mm	2.278 mm	-
ZC3	2.327 mm	2.181 mm	-
ZF1	2.509 mm	2.345 mm	0.933 mm
ZF2	2.693 mm	2.851 mm	0.899 mm
ZF3	2.050 mm	2.125 mm	0.875 mm
ZPR1	1.973 mm	1.493 mm	1.002 mm
ZPR2	2.342 mm	1.653 mm	1.278 mm
ZPR3	2.243 mm	1.203 mm	1.181 mm
ZPI1	1.629 mm	1.173 mm	0.800 mm
ZPI2	0.900 mm	0.803 mm	0.987 mm
ZPI3	0.726 mm	1.030 mm	0.952 mm
ZP1	0.469 mm	0.681 mm	0.689 mm
ZP2	0.438 mm	0.378 mm	0.807 mm
ZP3	0.357 mm	0.655 mm	0.986 mm
Promedio	1.589 mm	1.501 mm	0.949 mm
Des. Estand	0.827 mm	0.737 mm	0.161 mm
Mínimo	0.357 mm	0.378 mm	0.689 mm
Máximo	2.693 mm	2.851 mm	1.278 mm

Tabla 19. Comparativa de puntos de referencia anatómica en la cabeza – Voluntario 3

VOLUNTARIO 4			
Distancia respecto al escaneado			
Sector	Cámara	Video	PhotoMeDAS
ZC1	1.074 mm	1.347 mm	-
ZC2	1.377 mm	2.143 mm	-
ZC3	1.894 mm	2.177 mm	-
ZF1	1.226 mm	2.525 mm	1.150 mm
ZF2	0.713 mm	2.720 mm	0.472 mm
ZF3	1.257 mm	3.260 mm	0.645 mm
ZPR1	0.555 mm	1.189 mm	1.744 mm
ZPR2	0.465 mm	2.155 mm	1.345 mm
ZPR3	1.117 mm	2.907 mm	0.936 mm
ZPI1	0.636 mm	1.912 mm	0.165 mm
ZPI2	0.755 mm	1.497 mm	0.688 mm
ZPI3	1.142 mm	3.268 mm	0.968 mm
ZP1	0.675 mm	3.351 mm	1.846 mm
ZP2	0.806 mm	3.766 mm	2.166 mm
ZP3	0.740 mm	3.302 mm	2.166 mm
Promedio	0.962 mm	2.501 mm	1.191 mm
Des. Estand	0.382 mm	0.806 mm	0.667 mm
Mínimo	0.465 mm	1.189 mm	0.165 mm
Máximo	1.894 mm	3.766 mm	2.166 mm

Tabla 20. Comparativa de puntos de referencia anatómica en la cabeza – Voluntario 4.

VOLUNTARIO 5			
Distancia respecto al escaneado			
Sector	Cámara	Video	PhotoMeDAS
ZC1	0.991 mm	0.996 mm	-
ZC2	0.229 mm	0.327 mm	-
ZC3	0.373 mm	1.295 mm	-
ZF1	0.896 mm	0.596 mm	2.001 mm
ZF2	0.615 mm	0.768 mm	1.315 mm
ZF3	1.014 mm	1.186 mm	1.583 mm
ZPR1	0.416 mm	0.397 mm	1.157 mm
ZPR2	0.651 mm	0.568 mm	0.823 mm
ZPR3	0.460 mm	0.701 mm	0.826 mm
ZPI1	0.491 mm	0.521 mm	1.627 mm
ZPI2	0.480 mm	0.644 mm	1.994 mm
ZPI3	0.320 mm	1.079 mm	1.978 mm
ZP1	0.511 mm	0.954 mm	1.040 mm
ZP2	0.725 mm	1.041 mm	0.679 mm
ZP3	0.570 mm	0.903 mm	1.512 mm
Promedio	0.583 mm	0.799 mm	1.378 mm
Des. Estand	0.236 mm	0.292 mm	0.478 mm
Mínimo	0.229 mm	0.327 mm	0.679 mm
Máximo	1.014 mm	1.295 mm	2.001 mm

Tabla 21. Comparativa de puntos de referencia anatómica en la cabeza – Voluntario 5.

VOLUNTARIO 6			
Distancia respecto al escaneado			
Sector	Cámara	Video	PhotoMeDAS
ZC1	1.636 mm	0.397 mm	-
ZC2	1.032 mm	0.936 mm	-
ZC3	1.236 mm	2.002 mm	-
ZF1	0.212 mm	0.575 mm	0.178 mm
ZF2	0.531 mm	0.392 mm	0.767 mm
ZF3	1.109 mm	1.088 mm	1.224 mm
ZPR1	1.236 mm	0.718 mm	0.518 mm
ZPR2	0.348 mm	0.196 mm	0.528 mm
ZPR3	1.148 mm	0.614 mm	0.896 mm
ZPI1	0.292 mm	0.531 mm	1.260 mm
ZPI2	1.055 mm	1.457 mm	1.052 mm
ZPI3	1.086 mm	1.349 mm	1.098 mm
ZP1	1.095 mm	2.506 mm	0.840 mm
ZP2	0.845 mm	2.117 mm	0.720 mm
ZP3	1.413 mm	1.834 mm	1.424 mm
Promedio	0.952 mm	1.114 mm	0.876 mm
Des. Estand	0.422 mm	0.725 mm	0.360 mm
Mínimo	0.212 mm	0.196 mm	0.178 mm
Máximo	1.636 mm	2.506 mm	1.424 mm

Tabla 22. Comparativa de puntos de referencia anatómica en la cabeza – Voluntario 6.

Esta Tabla 23 compara el resumen de los parámetros estadísticos de puntos de referencia anatómica en la cabeza utilizando la metodología de la cámara en diferentes

"Evaluación comparativa de modelos craneofaciales 3D utilizando dispositivos móviles y fotogrametría"

modelos (M R, M J, V1, V2, V3, V4, V5, V6). Los parámetros incluyen el promedio, el mínimo, el máximo y la desviación estándar de las distancias de los puntos de referencia anatómica en la cabeza a la referencia escaneada.

	CÁMARA							
PARAMETRO	M R	M J	V 1	V 2	V 3	V 4	V 5	V 6
Promedio(mm)	0.349	0.394	0.917	5.547	1.589	0.962	0.583	0.952
Des. Estand(mm)	0.232	0.288	0.641	3.068	0.827	0.382	0.236	0.422
Mínimo(mm)	0.092	0.122	0.194	0.671	0.357	0.465	0.229	0.212
Máximo(mm)	0.885	0.923	2.485	9.090	2.693	1.894	1.014	1.636

Tabla 23. Comparativo de parámetros estadísticos de puntos de referencia anatómica – Cámara.

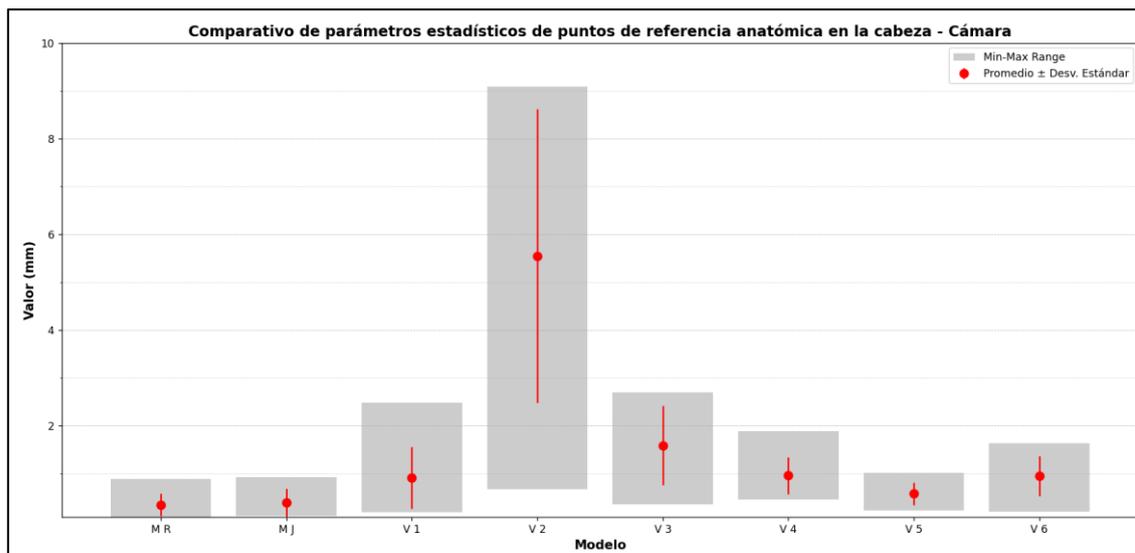


Figura 72. Resumen comparativo de distancias entre modelos – Cámara.

Esta Tabla 24 compara el resumen de los parámetros estadísticos de puntos de referencia anatómica en la cabeza utilizando la metodología del video en diferentes modelos (M R, M J, V1, V2, V3, V4, V5, V6). Los parámetros incluyen el promedio, el mínimo, el máximo y la desviación estándar de las distancias de los puntos de referencia anatómica en la cabeza a la referencia escaneada.

	VIDEO							
PARAMETRO	M R	M J	V 1	V 2	V 3	V 4	V 5	V 6
Promedio(mm)	0.451	0.354	1.204	5.164	1.501	2.501	0.799	1.114
Des. Estand(mm)	0.294	0.142	0.938	2.771	0.737	0.806	0.292	0.725
Mínimo(mm)	0.104	0.126	0.295	0.969	0.378	1.189	0.327	0.196
Máximo(mm)	1.041	0.642	3.227	8.519	2.851	3.766	1.295	2.506

Tabla 24. Comparativo de parámetros estadísticos de puntos de referencia anatómica – Video.

"Evaluación comparativa de modelos craneofaciales 3D utilizando dispositivos móviles y fotogrametría"

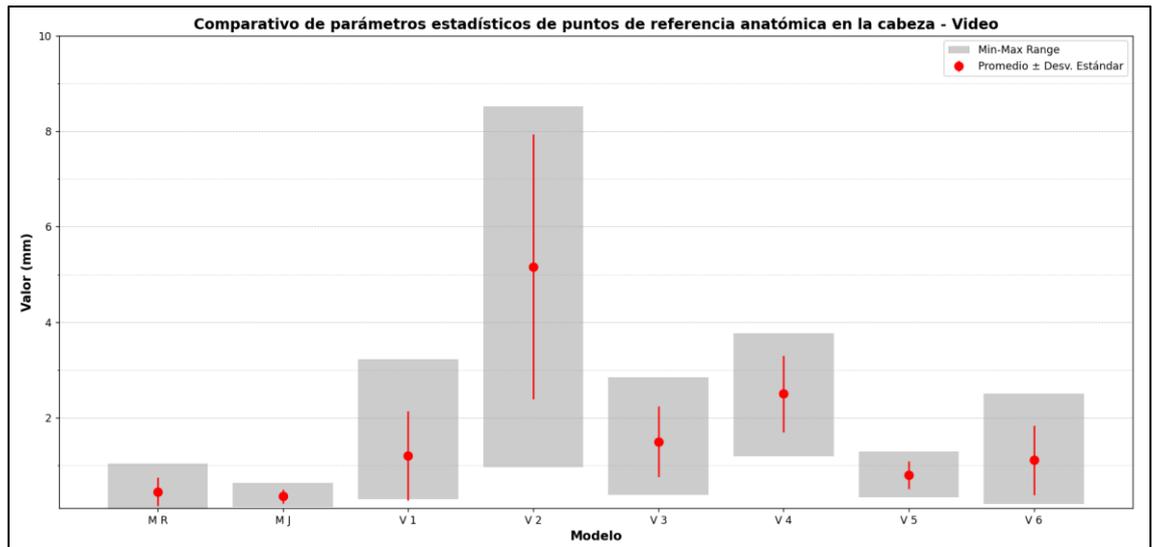


Figura 73. Resumen comparativo de distancias entre modelos – Video

Esta Tabla 25 compara el resumen de los parámetros estadísticos de puntos de referencia anatómica en la cabeza utilizando la metodología del PhotoMeDAS en diferentes modelos (M R, M J, V1, V2, V3, V4, V5, V6). Los parámetros incluyen el promedio, el mínimo, el máximo y la desviación estándar de las distancias de los puntos de referencia anatómica en la cabeza a la referencia escaneada.

PARAMETRO	PHOTOMEDAS							
	M R	M J	V 1	V 2	V 3	V 4	V 5	V 6
Promedio(mm)	1.371	1.875	1.212	2.944	0.949	1.191	1.378	0.876
Des. Estand(mm)	0.555	0.841	0.469	1.452	0.161	0.667	0.478	0.360
Mínimo(mm)	0.444	0.658	0.389	0.000	0.689	0.165	0.679	0.178
Máximo(mm)	2.092	3.454	1.869	4.713	1.278	2.166	2.001	1.424

Tabla 25. Comparativo de parámetros estadísticos de puntos de referencia anatómica –PhotoMeDAS.

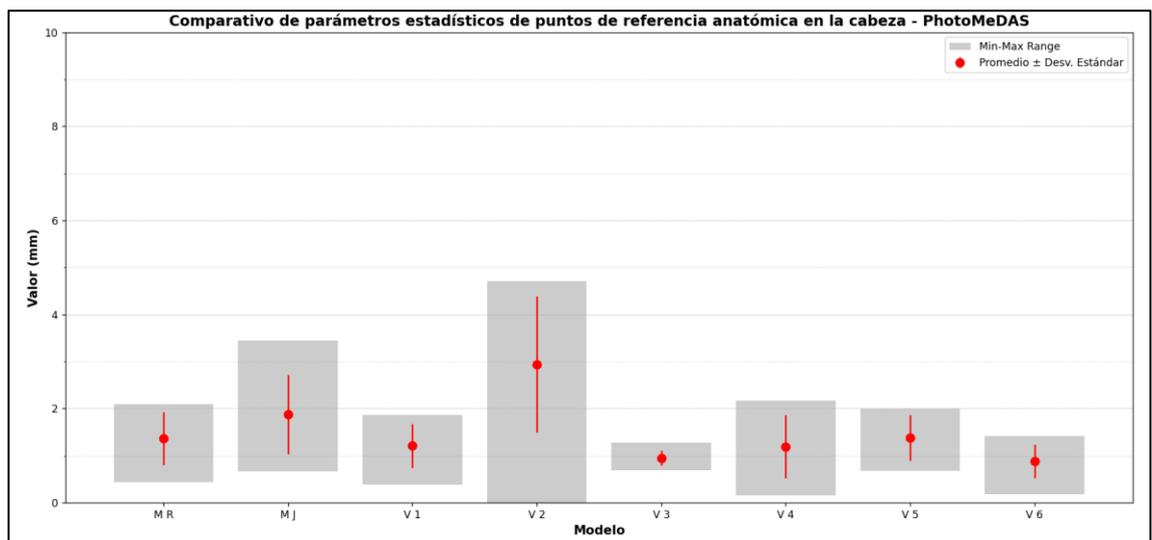


Figura 74. Resumen comparativo de distancias entre modelos – PhotoMeDAS.

La tabla 26 muestra el resumen correspondiente al promedio general obtenido de las distancias entre los puntos de referencia anatómicos de los 8 voluntarios y por cada procedimiento.

"Evaluación comparativa de modelos craneofaciales 3D utilizando dispositivos móviles y fotogrametría"

Modelo	Cámara		Video		PhotoMedAS	
	Promedio Dist. (mm)	Desv. Dist. (mm)	Promedio Dist. (mm)	Promedio Dist. (mm)	Desv. Dist. (mm)	Promedio Dist. (mm)
M R	0.35	0.23	0.45	0.29	1.37	0.56
M J	0.39	0.29	0.35	0.14	1.88	0.84
V 1	0.92	0.64	1.20	0.94	1.21	0.47
V 2	5.55	3.07	5.16	2.77	2.94	1.45
V 3	1.59	0.83	1.50	0.74	0.95	0.16
V 4	0.96	0.38	2.50	0.81	1.19	0.67
V 5	0.58	0.24	0.80	0.29	1.38	0.48
V 6	0.95	0.42	1.11	0.73	0.88	0.36
Promedio general	1.41	0.76	1.64	0.84	1.47	0.62
Promedio sin V 2	0.82	0.43	1.13	0.56	1.26	0.50

Tabla 26. Resumen comparativo de distancia de puntos de referencia anatómicos.

En la Figura 75 se muestra la comparativa de cada método, se debe indicar que en el caso del Modelo correspondiente al Voluntario 2, presenta mayor variación debido a que se movió durante la toma de datos. [JLL32][OCQE33]

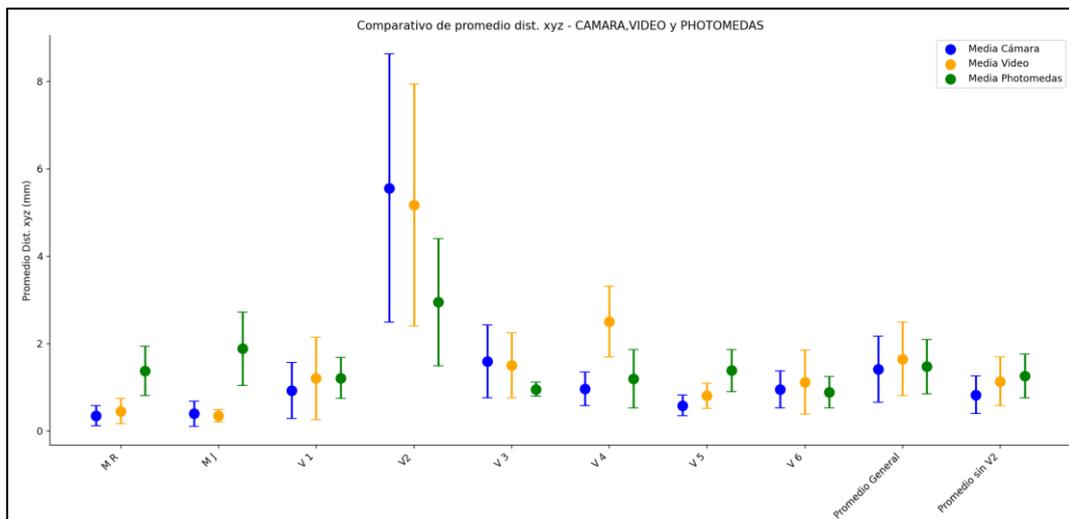


Figura 75. Comparativo de distancias de puntos de referencia anatómica en la cabeza entre modelos

En la Figura 76 se muestra la comparativa de distancias por zona de la cabeza por método considerando como referencia al modelo 3D obtenido con el escáner Academia 50.

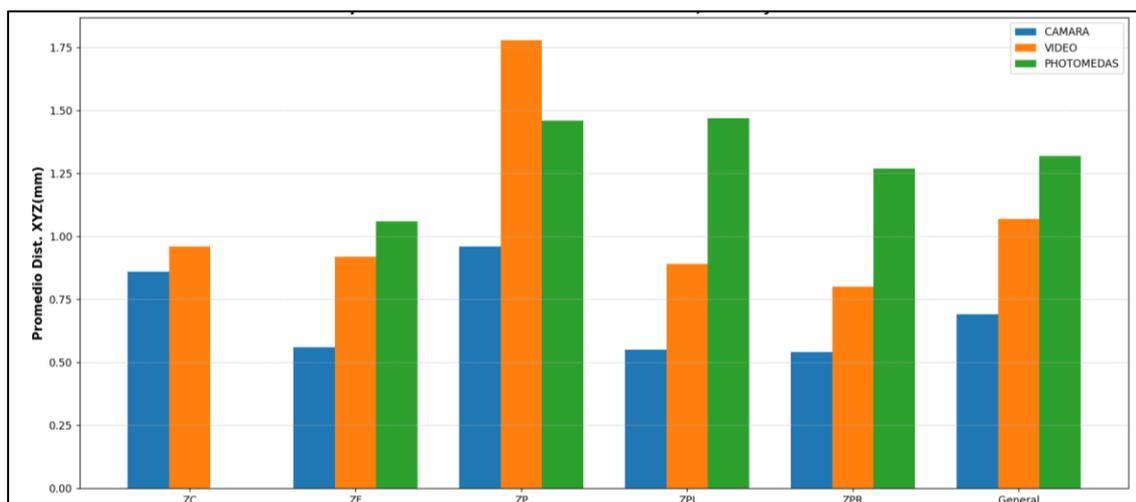


Figura 76. Comparativo de distancias de puntos de referencia anatómica por zona

8.6. CALCULO DE T STUDENT [JLL34][OCQE35] PARA LOS PUNTOS DE REFERENCIA ANATÓMICA

Se indica que para realizar la prueba t-student se utilizó coordenadas 3D(x,y,z) de los puntos de referencia anatómica de las zonas de la cabeza, estos puntos 3D fueron identificados mediante la texturizado del modelo obtenido con el proceso de Cámara, Videogrametría, PhotoMeDAS (codificación de aruco) y el escáner 3D.

Formulación de la hipótesis

Hipótesis nula (H0): Afirma que no hay diferencia significativa entre las medias de los dos grupos. Se realizó la prueba para distancia media de cada caso (Cámara, Video y PhotoMeDAS) respecto a la referencia del escáner debería ser de 0mm,0.25mm, 0.5mm, 0.75mm,1mm o 1.25mm.

Hipótesis alternativa (H1): Afirma que hay una diferencia significativa entre las medias de los dos grupos. La media de la muestra no es cercana al valor de la hipótesis H0.

Para lograr el objetivo y determinar la equivalencia se utilizó el software IBM-SPSS stadistics, prueba T de una muestra, considerando como referencia la distancia ideal de separación entre modelos. La tabla 26 muestra que para un 95% de confianza según el instrumento utilizado (cámara, video, PhotoMeDAS).

Para esta evaluación no se consideró el caso del voluntario 2, el cual fue quien generó mayor movimiento de todos los casos y distorsionaba la distribución de la estadística.

Prueba (T-student)	0mm	0.25mm	0.5mm	0.75mm	1mm	1.25mm
	P valor (dos colas)					
Cámara	0.000	0.000	<.001	0.238	-	-
Video	0.000	0.000	<.001	0.000	0.142	-
PhotoMeDAS	0.000	0.000	<.001	0.000	0.000	0.827

Tabla 27. Resumen de evaluación de t-student de 2 colas para las diferentes metodologías.

Si el nivel de significancia (p-valor) es mayor que alfa (0.05), no se rechaza la hipótesis H0. Si el nivel de significancia es menor que alfa (0.05), se rechaza la hipótesis H0.

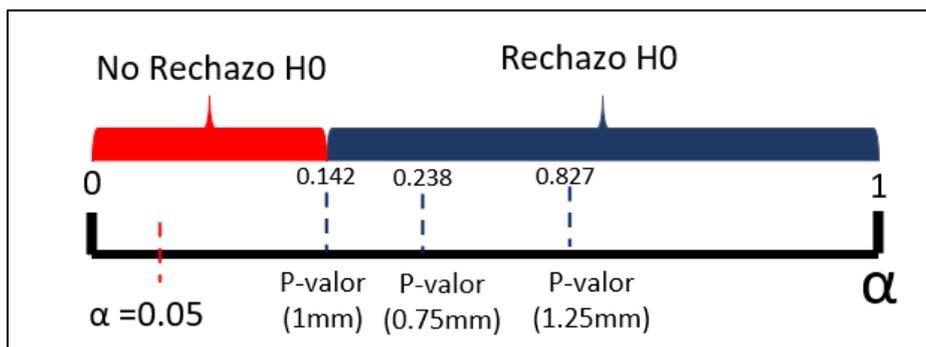


Figura 77. Evaluación de la Hipótesis según el instrumento de análisis.

Se puede indicar que la media de distancia con la cámara es equivalente (no hay diferencia significativa) de 0.75mm, para el caso del video es de 1 mm y para el caso de PhotoMeDAS es de 1.25mm .

9. DISCUSIÓN

Considerando el desarrollo del estudio se puede indicar lo siguiente:

- **Respecto a la presentación de los resultados generales:**

En la tabla 28 se presenta el resumen de comparativo de distancias promedio respecto al mallado y a los puntos de referencia anatómico, según el tipo de procedimiento y tomando como referencia del mallado obtenido con el escáner 3D.

Promedio de los 8 casos	Media Cámara (mm)	Media. Video (mm)	Media PhotoMeDAS (mm)
Comparativa distancia mallado	0.22±1.29	0.47±1.43	0.39±1.02
Comparativa distancia de los puntos referencia anatómica	1.41±0.76	1.64±0.84	1.47±0.62

Tabla 28. Comparativa promedio de distancias de mallado.

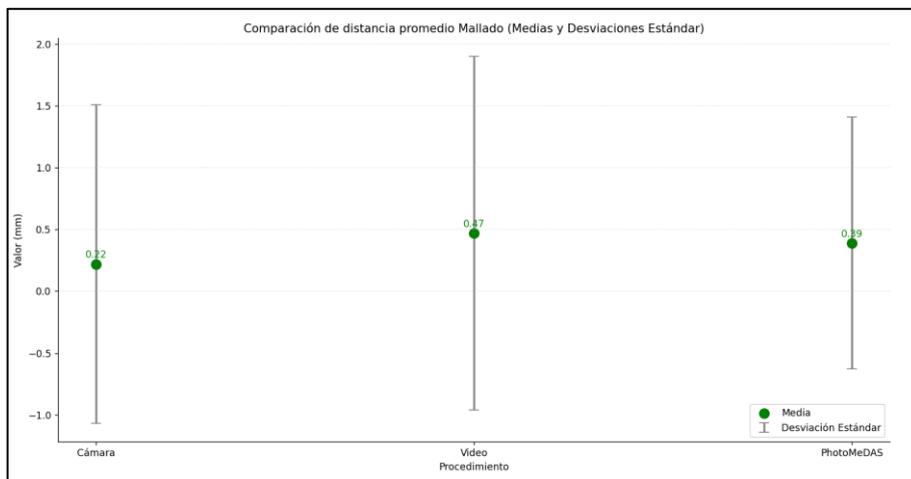


Figura 78. Comparativo de distancia promedio mallado, considerando los 8 casos.

Distancia promedio comparativa de los puntos de referencia anatómica, según el tipo de procedimiento y la referencia del mallado obtenido con el escáner 3D.

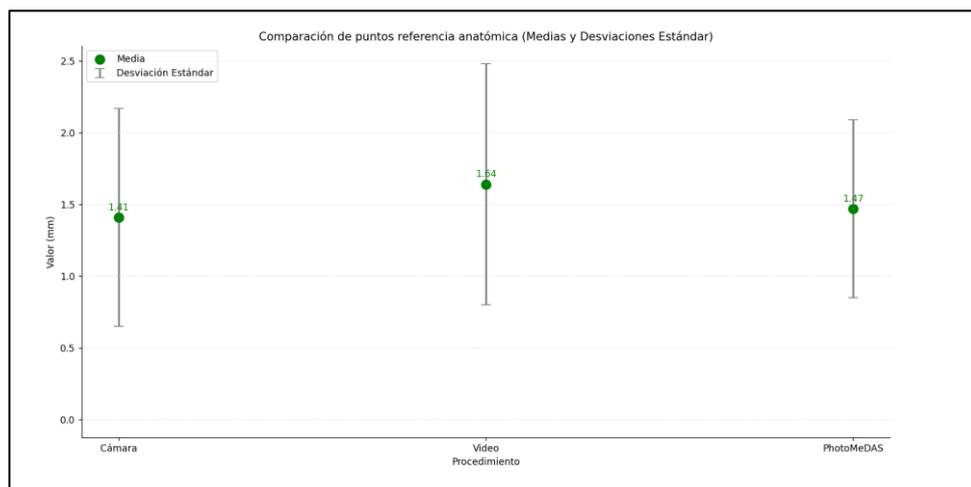


Figura 79. Comparativo de distancia promedio de puntos de referencia anatómica, considerando los 8 casos.

- **En relación con los objetivos de investigación:**

Fueron obtenidos treinta y dos modelos 3D que se obtuvieron a través de diferentes procedimientos: cámara, video, PhotoMeDAS y escáner 3D, este último fue utilizado como referencia (sistema de coordenadas local) para la comparación automática del nivel de detalle del mallado y los puntos de referencia anatómica.

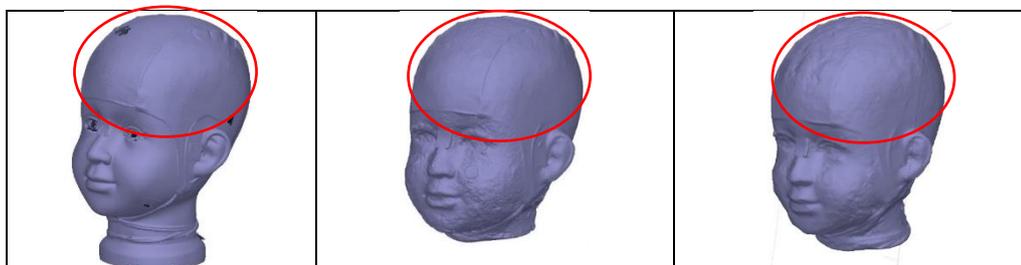


Figura 80. Comparativo de enmallado del área cubierta por la gorra – Modelo J

Se observa una mayor cantidad de ruido y variación morfológica (Figura 80) en los modelos obtenidos mediante la técnica de cámara y video, especialmente en las zonas no cubiertas por el gorro utilizado durante la captura de datos. Para minimizar la interferencia en el procedimiento del ruido es de suma relevancia la aplicación del filtro de confianza antes de realizar el mallado.

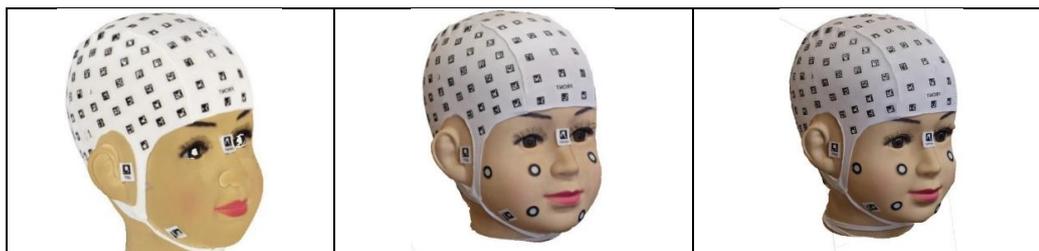


Figura 81. Comparativo de texturizado – Modelo J

En cuanto al texturizado (Figura 81), se registró que la cámara presenta una resolución promedio de 0.07 mm/pix, mientras que, en el caso del video, la resolución promedio es de 0.2 mm/pix. Esto permite una buena identificación de los vértices de las marcas codificadas y una referencia precisa; la unidad mínima de la marca tiene una dimensión aproximada de 1mm.

Poder identificar claramente los puntos de referencia con apoyo del texturizado permite minimizar errores en el proceso de la referenciación, así como la aplicación correcta del factor de escalado.

Durante la captura de datos utilizando la cámara, el video, PhotoMeDAS y el escáner 3D, es importante tener en cuenta que el movimiento de la cabeza del voluntario puede influir significativamente en la calidad de los modelos generados. Si los dispositivos son tolerantes al movimiento, esto no será tan influyente en la construcción del modelo, pero en caso contrario, se deben tomar medidas para minimizar el movimiento y asegurar la precisión de los datos capturados.

- **Limitaciones del estudio:**

Las limitaciones del estudio incluyen la falta de variedad en la muestra de voluntarios y la falta de análisis de otros aspectos importantes como la precisión de la posición de las marcas y la calidad de la iluminación. Para abordar estas limitaciones, se sugiere realizar estudios con muestras más diversas y considerar otros factores técnicos en la captura de datos. También se sugiere la comparación de las técnicas con modelos anatómicos reales para una mayor validez.

10. CONCLUSIONES

El estudio concluye que los modelos de la cabeza obtenidos con diferente procedimiento (cámara, video, PhotoMeDAS y escáner 3D) tiene un impacto significativo en la calidad y nivel de detalle de los modelos obtenidos. El procedimiento con el escáner 3D fue la que produjo la mayor cantidad de caras en promedio, mientras que la cámara y el video presentaron mayor cantidad de ruido en zonas no cubiertas por el gorro utilizado durante la captura de datos, es por ello por lo que es necesario aplicar un filtro de confiabilidad para obtener mejores resultados del mallado y texturizado.

En cuanto al objetivo del proceso de referenciación, se logró una referenciación cercana al milímetro en la mayoría de los casos considerando el factor de escala para ajustar los modelos, pero el modelo V 2 obtenido con cámara y video presentó un mayor error debido a pequeños movimientos de cabeza durante la toma de datos.

La comparativa de distancias entre modelos mallado en promedio general(8 voluntario con 4 modelos de cabeza por cada voluntario) para el procedimiento de la cámara se indica un promedio de 0.22 ± 1.29 mm, para el caso del video 0.47 ± 1.43 mm y para el caso de PhotoMeDAS 0.39 ± 1.02 mm. Respecto a la comparativa de los puntos referenciales anatómica se realizó un análisis estadístico para analizar la equivalencia de distancia según el procedimiento con la cámara de 0.75mm , en el caso del video es de 1mm y para el caso de PhotoMeDAS 1.25mm.

11. RECOMENDACIONES

Con base en los resultados y limitaciones del estudio, se pueden hacer las siguientes recomendaciones:

- Realizar estudios con muestras más diversas: Dado que el presente estudio se llevó a cabo con un número limitado de voluntarios, se sugiere ampliar la muestra con el fin de obtener resultados más representativos y generales.
- Considerar otros factores técnicos en la captura de datos: El estudio no abordó la precisión de la posición de las marcas y la calidad de la iluminación, lo cual puede afectar la calidad de los modelos craneofaciales 3D. Se recomienda considerar estos factores en estudios futuros.
- Comparar las técnicas con modelos anatómicos reales: Para una mayor validez de los resultados, se sugiere comparar los modelos obtenidos con las diferentes técnicas con modelos anatómicos reales de diferentes tamaños.
- Evaluar la aplicabilidad clínica de las técnicas: Si bien se identificaron las limitaciones y ventajas de cada técnica en la obtención de modelos craneofaciales 3D, es importante evaluar la aplicabilidad clínica de las técnicas

"Evaluación comparativa de modelos craneofaciales 3D utilizando dispositivos móviles y fotogrametría"

en el diagnóstico y tratamiento de diversas condiciones médicas y en el diseño de prótesis y dispositivos médicos personalizados.

- Desarrollar técnicas de obtención de modelos craneofaciales 3D más precisas: Aunque se identificaron las ventajas y limitaciones de las diferentes técnicas de obtención de modelos craneofaciales 3D, aún hay margen de mejora en términos de precisión y calidad de los modelos. Se recomienda seguir investigando y desarrollando técnicas más precisas y eficientes en la obtención de modelos craneofaciales 3D.
- Se puede considerar la utilización de la técnica de superposición de modelos 3D craneofaciales obtenidos mediante un smartphone y un modelo craneal creado con PhotoMeDAS (Figura 82).

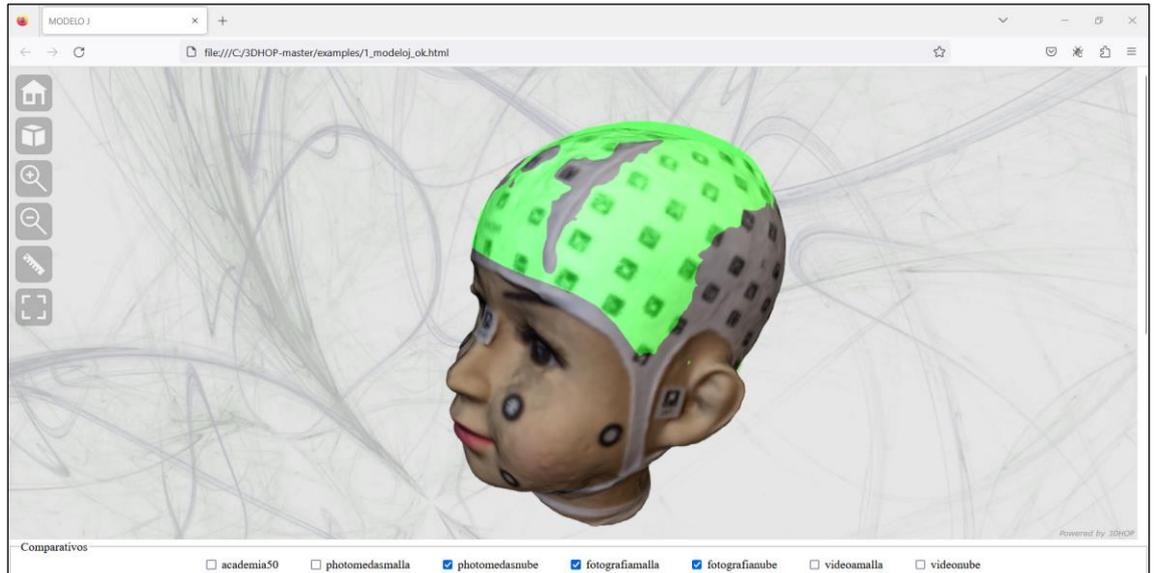


Figura 82. Superposición de modelo 3D craneofacial obtenido con Smartphone y PhotoMeDAS(modelo craneal).

12. REFERENCIAS

- Barbero-García, I. (2018). *Smartphone-based close-range photogrammetric assessment of spherical objects*. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/phor.12243>
- Barbero-García, I., Lerma, J. L., & Mora-Navarro, G. (2020). Fully automatic smartphone-based photogrammetric 3D modelling of infant's heads for cranial deformation analysis. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 166, 268-277. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2020.06.013>
- Conde, C. S., Cabello, E., Juan Carlos, R. C., Enlaces, R. Y., Bolle, R., Connell, J. H., Pankanti, S., Ratha, N. K., Senior, A., Phillips, P. J., Flynn, P. J., Scruggs, T., Bowyer, K. W., Chang, J., Hoffman, K., Marques, J., Min, J., Worek, W., Chang, K., ... Thiran, J. (2009). *Overview of the face recognition grand challenge* (Vol. 42, Número 2). www.sedoptica.es.
- Díaz Alemán, M. D. (2021). Modelado 3D de precisión en procesos de digitalización de escultura construida. *AusArt*, 9(2), 113-125. <https://doi.org/10.1387/ausart.23077>
- María Díaz-Romero, R., Ávila-Rosas, H., & Revuelta Pérez, R. (2003). Morfometría facial en neonatos a término. En *Revista ADM: Vol. LX* (Número 5).
- Morena, S., Molero Alonso, B., Barrera-Vera, J. A., & Barba, S. (2020). As-built graphic documentation of the Monumento a la Tolerancia. Validation of low-cost survey techniques. *EGE-Expresión Gráfica en la Edificación*, 13, 98. <https://doi.org/10.4995/ege.2020.14766>
- Tu, L., Porras, A. R., Morales, A., Perez, D. A., Piella, G., Sukno, F., & Linguraru, M. G. (2019). Three-Dimensional Face Reconstruction from Uncalibrated Photographs: Application to Early Detection of Genetic Syndromes. *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 11840 LNCS, 182-189. https://doi.org/10.1007/978-3-030-32689-0_19
- Enrique Colmenares-Guillén, L., Carrillo Ruiz, M., Gaona Bernabé, G., Luis Hernández Ameca, J., & Javier Albores Velasco, F. (2018). UNA APROXIMACIÓN DE CLASIFICACIÓN DE ROSTROS USANDO ANTROPOMETRÍA FACIAL AN APPROACH OF CLASSIFICATION OF FACES USING FACIAL ANTHROPOMETRY. *RITI Journal*, 6.
- García-Tornel Florensa, S., & Verde Sánchez, D. (2011). Deformidades en la cabeza del bebé. *Offarm*, 30(5), 71-75. <https://www.elsevier.es/es-revista-offarm-4-articulo-deformidades-cabeza-del-bebe-X0212047X11276652>
- Luis Ibarra, J. I. P. F. B. L. L. G. C. D. B. G. G. (2022). *Guía clínica: alteraciones de la forma del cráneo*. http://www.scielo.edu.uy/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1688-12492022000201804
- María Díaz-Romero, R., Ávila-Rosas, H., & Revuelta Pérez, R. (2003). Morfometría facial en neonatos a término. En *Revista ADM: Vol. LX* (Número 5).
- Mitchell, H. L., & Newton, I. (2002). *Medical photogrammetric measurement: overview and prospects*. www.elsevier.com/locate/isprsjprs
- Nahles, S., Klein, M., Yacoub, A., & Neyer, J. (2018). Evaluation of positional plagiocephaly: Conventional anthropometric measurement versus laser scanning method. *Journal of Cranio-Maxillofacial Surgery*, 46(1), 11-21. <https://doi.org/10.1016/j.jcms.2017.10.010>

Villanueva-Bonilla, S., Saavedra-Layera, L., & Vergara-Núñez, C. (2018). Comparación de mediciones antropométricas directa y con sistema de Figura 3D, en adultos jóvenes. *Revista clínica de periodoncia, implantología y rehabilitación oral*, 11(1), 16-19. <https://doi.org/10.4067/s0719-01072018000100016>