



ORIGINAL

Identificación de los líderes rebeldes ejecutados durante el levantamiento polaco-lituano contra el Imperio Ruso de 1863-64 mediante superposición craneofacial usando Skeleton-ID

IDENTIFICATION OF THE REBEL LEADERS EXECUTED DURING THE POLISH-LITHUANIAN UPRISING AGAINST THE RUSSIAN EMPIRE OF 1863-64 BY CRANIOFACIAL SUPERIMPOSITION USING SKELETON-ID.

Martos R.^{1,2}, Ibáñez O.^{2,3}, Valsecchi A.^{2,3}, Bermejo E.⁴, Navarro F.¹, Kisielius G.⁵, Jankauskas R.⁶

1 Laboratorio de Antropología Física. Departamento de Medicina Legal, Toxicología y Antropología Física, Universidad de Granada, Granada, España.

2 Panacea Cooperative Research S. Coop., Ponferrada, España.

3 Instituto Andaluz Interuniversitario en Data Science and Computational Intelligence, Universidad de Granada, Granada, España.

4 National Research Institute of Police Science, Japan.

5 State Forensic Medicine Service, Vilna, Lituania.

6 Department of Anatomy, Histology and Anthropology, Universidad de Vilna, Vilna, Lituania.

RESUMEN: En 2017, una serie de restos humanos correspondientes a los líderes ejecutados del “Levantamiento de enero” de 1863-64 fueron descubiertos en el Castillo Superior de Vilna. Durante las excavaciones arqueológicas, se encontraron 14 fosas de inhumación con 21 restos humanos en el sitio. El proceso de identificación posterior fue llevado a cabo por el equipo del Dr. Jankauskas, incluido el análisis y la comparación cruzada de los datos post-mortem (PM) obtenidos in-situ, con los datos ante-mortem (AM) obtenidos de archivos históricos. Paralelamente, el Sr. Martos, intenta la identificación de 11 de estos 21 individuos mediante la técnica de Superposición Craneofacial. Para ello, este estudiante de doctorado, sin experiencia previa en casos de identificación, tiene acceso a 19 cráneos escaneados en 3D y 12 fotografías de 11 candidatos diferentes. Sin acceso a cualquier otro tipo de información (perfil biológico, contexto o archivos históricos), el Sr. Martos se enfrenta a un problema de comparación cruzada que involucra 216 la realización de solapamientos cara-cráneo. La metodología seguida considera los principales acuerdos del proyecto europeo MEPROCS y utiliza el software Skeleton-ID™ 0.70-alpha1. En base al standard MEPROCS, se proporcionó una decisión final dentro de una escala, asignando un valor en términos de apoyo fuerte, moderado o limitado a la afirmación de que el cráneo y la imagen facial perteneciesen (o no) a la misma persona para cada caso. También se planteó el problema de clasificación binario, positivo / negativo, en el que a partir de los datos proporcionados por el Dr. Jankauskas, se reveló una tasa de aciertos del 98,76%. Este “ejercicio” representa la primera validación ciega de la aplicación del marco metodológico definido por el consorcio MEPROCS mediante la herramienta Skeleton-ID en un escenario de identificación real.

PALABRAS CLAVE: Superposición Craneofacial, Inteligencia Artificial, Antropología Forense, Solapamiento cráneo-cara.

ABSTRACT: In 2017, a series of human remains corresponding to the executed leaders of the “January Uprising” of 1863-1864 were uncovered at the Upper Castle of Vilnius. During the archaeological excavations, 14 inhumation pits with 21 human remains were found at the site. The subsequent identification process was carried out by the team of Dr. Jankauskas including the analysis and cross-comparison of post-mortem (PM) data obtained in-situ with ante-mortem (AM) data obtained from historical archives. In parallel, Mr. Martos attempts to identify 11 of these 21 individuals using the Craniofacial Superimposition technique. To do this, this PhD student, without previous experience in identification cases, has access to 19 3D scanned skulls and 12 photographs of 11 different candidates. Without access to any other type of information (biological profile, context or historical files), Mr. Martos faces a cross-comparison problem involving 216 skull-face overlay scenarios. The methodology followed considers the main agreements of the European project MEPROCS and uses the Skeleton-ID™ 0.70-alpha1 software. Based on the MEPROCS standard, a final decision was provided within a scale, assigning a value in terms of strong, moderate or limited support to the claim that the skull and the facial image belonged (or not) to the same person for each case. The problem of binary classification, positive / negative, was also raised, in which from the data provided by Dr. Jankauskas, an identification rate of 98.76% was revealed. This “exercise” represents the first blind validation of the application of the methodological framework defined by the MEPROCS consortium using the Skeleton-ID tool in a real identification scenario.

KEY WORDS: Craniofacial Superimposition, Artificial Intelligence, Forensic Anthropology, Skull-face overlay

CONTACTO: Rubén Martos. Programa de doctorado en Biomedicina. Laboratorio de Antropología Física. Departamento de Medicina Legal, Toxicología y Antropología Física, Universidad de Granada, Granada, España. Facultad de Medicina, Universidad de Granada, 18071, Granada, España. marfer@ugr.es

1. INTRODUCCIÓN.

A principios de 2017, se descubrieron una serie de restos humanos en el Castillo Superior de Vilna (Vilna, Lituania) (Figura 1). Los artefactos arqueológicos hallados en el lugar

de enterramiento confirmaron que podría tratarse de las inhumaciones clandestinas de líderes militares ejecutados durante la rebelión polaco-lituana contra el Imperio Ruso en el siglo XIX, conocida como “Levantamiento de Enero” (1863-64).



Figura 1. Castillo Superior de Vilna, Lituania.

Posteriormente, el equipo liderado por el Dr. Rimantas Jankauskas, del Departamento de Anatomía, Histología y Antropología de la Universidad de Vilna (Lituania), comenzó las excavaciones arqueológicas sistemáticas, junto con las investigaciones antropológicas e históricas pertinentes, descubriendo un total de 21 restos humanos en 14 fosas de inhumación (Figuras 2 y 3). Con el objetivo de identificar los restos humanos, para el posterior entierro estatal, procedieron al análisis y la comparación cruzada de los datos

PM (edad, estatura, signos de ejecución y lesiones AM) con los datos AM (edad, fecha y modo de ejecución, y otros datos de los archivos históricos). Se realizó una búsqueda genealógica de parientes vivos y fallecidos para proceder a la identificación de los restos mediante ADN por medio de secuenciación de nueva generación. En noviembre de 2019, una vez identificados los restos, se realizó un entierro estatal con honores de los mismos.



Figura 2. Representación de las 14 fosas de inhumación encontradas en el castillo.



Figura 3. Restos encontrados en una de las 14 fosas del Castillo Superior de Vilna (imagen de la izquierda) y detalle de artefacto (alianza de matrimonio con iniciales y fecha de la boda) utilizado para la identificación de uno de los sujetos (imagen de la derecha).

Además de los métodos de identificación mencionados anteriormente, debido a la disponibilidad de fotografías de 11 individuos, se realizó la Superposición Craneofacial (SCF). Esta técnica consiste en la comparación directa de la imagen o el modelo 3D de un cráneo del que se desconoce su identidad con la fotografía de una persona conocida, correlacionando su correspondencia morfológica para determinar, con un grado razonable de confianza, si pertenecen a la misma persona o no [1-3]

Aunque la técnica de SCF lleva aplicándose desde hace más de un siglo [4], sigue existiendo controversia dentro de la comunidad científica [5]. El reducido número de estudios y las limitaciones de estos [6], conduce a información contradictoria sobre su fiabilidad. En lugar de seguir una metodología uniforme, cada experto tiende a aplicar su propio enfoque al problema, basado en la disponibilidad tecnológica y el conocimiento sobre anatomía craneofacial, los tejidos blandos y sus relaciones. En el marco del proyecto europeo “Nuevas Metodologías y Protocolos de Identificación Forense por Superposición Craneofacial” (MEPROCS) [7], uno de los principales objetivos fue proponer un estándar común, evitando suposiciones particulares que pudiesen sesgar el proceso, para permitir la aplicación de la técnica de SCF en escenarios prácticos de identificación forense. La publicación se presentó como el primer estándar de SCF, donde se recogen las fuentes de error e incertidumbre a la hora de aplicar la técnica, 17 ítems de buenas prácticas y 4 prácticas a evitar. Además, incluye un documento con los requisitos técnicos y características deseables que deberían tener los sistemas de video-superposición y SCF asistida por ordenador para la correcta aplicación de la técnica.

En el presente estudio se ha seguido como enfoque metodológico los acuerdos del consorcio MEPROCS, mediante el uso del software Skeleton-ID™ [8], la primera y única herramienta software que cumple con todos los requisitos y funcionalidades deseables según dicho estándar (ver Sección 3). Además, Skeleton-ID incorpora un algoritmo de Inteligencia Artificial capaz de superponer de forma automática, y en menos de un segundo, un modelo 3D del cráneo sobre una fotografía de la cara a partir de un conjunto de landmarks y sus valores de tejido blando estimados. Por lo tanto, el presente trabajo representa la primera validación ciega del software en un escenario de identificación real, en el que se ha aplicado la técnica de SCF sobre todas las posibles parejas de datos AM-PM de manera independiente a las identificaciones llevadas a cabo por el equipo del Dr. Jankauskas en la Universidad de Vilna.

2. ANTECEDENTES HISTÓRICOS.

La rebelión del “Levantamiento de Enero” tuvo lugar entre el 22 de enero de 1863 y el 19 de abril de 1864 [9]. Fue una insurrección dirigida a la restauración de la Mancomunidad Lituano-polaca (actualmente Polonia, Lituania, Letonia, Bielorrusia, partes de Ucrania y Rusia occidental) contra el Imperio Ruso del zar Alejandro II, el cual había dividido la entidad entre Rusia, Austria y Prusia. El levantamiento contó con habitantes de cada una de las tierras divididas: Polonia (anteriormente el Reino de Polonia) y Lituania (anteriormente el Gran Ducado de Lituania). Fue la insurgencia más duradera en Polonia después de la partición. El conflicto involucró a todos los estamentos de la sociedad, y posiblemente tuvo profundas repercusiones en las relaciones internacionales contemporáneas y, en última instancia, provocó un cambio de paradigma social e ideológico en los eventos nacionales que tuvieron una influencia decisiva en el desarrollo posterior de la sociedad polaca [10].

Fue la confluencia de una serie de factores los que hicieron inevitable el levantamiento a principios de 1863. La nobleza polaca y los círculos burgueses urbanos anhelaron el estatus semiautónomo que habían disfrutado en el Congreso de Polonia antes de la insurgencia una generación anterior, en 1830, mientras que la juventud alentada por el éxito del movimiento de independencia italiano deseaba con urgencia el mismo resultado. Rusia se había debilitado por su aventura en Crimea e introdujo una actitud más liberal en su política interna que alentó al gobierno nacional clandestino de Polonia a planear un ataque organizado contra sus ocupantes rusos, no antes de la primavera de 1863. No habían contado con Aleksander Wielopolski, el jefe de la administración civil conservador pro-ruso en la división rusa, que se enteró de los planes. Wielopolski sabía que el ferviente deseo de independencia de sus compatriotas estaba llegando a un punto crítico, algo que quería evitar a toda costa. En un intento por descarrilar el movimiento nacional polaco, adelantó a enero el reclutamiento de jóvenes activistas polacos en el Ejército Imperial Ruso (durante 20 años de servicio). Esa decisión es lo que desencadenó el levantamiento de enero de 1863, el mismo resultado que Wielopolski había querido evitar. A finales de la primavera, principios del verano de 1863, el historiador Jerzy Zdrada [10] registra que había 35.000 polacos bajo las armas enfrentando a un ejército ruso de 145.000 hombres.

El 1 de febrero de 1863, el levantamiento se extendió al Gran Ducado de Lituania. Voluntarios, armas y suministros



Figura 4. “Polonia, 1863”, de Jan Matejko, 1864, Museo nacional, Cracovia –[11]. La imagen representa las consecuencias del levantamiento de enero de 1863.

comenzaron a llegar a través de las fronteras desde Galicia en la partición austriaca y desde la partición prusiana. También llegaron voluntarios de Italia, Hungría, Francia y de la propia Rusia. El mayor revés vino de la imposibilidad del campesinado para participar en la lucha, excepto en aquellas regiones que estaban dominadas por unidades polacas, que vieron un aumento de inscripción gradual entre sus filas.

A las protestas y la rebelión de los jóvenes reclutas pronto se unieron oficiales de alto rango polaco-lituanos y miembros de la clase política. Los insurreccionistas, aún mal organizados, fueron superados en número y carecían de suficiente apoyo extranjero, viéndose obligados a realizar tácticas peligrosas de guerra de guerrillas. Las represalias fueron rápidas y despiadadas. Las ejecuciones públicas y las deportaciones a Siberia persuadieron a muchos polacos para abandonar la lucha armada. Finalmente, los últimos insurgentes fueron capturados y ejecutados en 1864. Este conflicto armado ocasionó la muerte de más de 6.500

insurgentes polaco-lituanos y 10.000 rusos durante la rebelión. Después del colapso del levantamiento, siguieron duras represalias. Según la información oficial rusa, 396 personas fueron ejecutadas y 18.672 fueron exiliadas a Siberia. Se enviaron grandes cantidades de hombres y mujeres al interior de Rusia y al Cáucaso, los Urales y otras áreas remotas. En total, unas 70.000 personas fueron encarceladas y posteriormente exiliadas de Polonia y enviadas a regiones distantes de Rusia.

Dos de las figuras históricas más relevantes de este alzamiento fueron los comandantes de las fuerzas del Levantamiento en Lituania, Zygmunt Sierakowski y Konstanty Kalinowski.

Zygmunt Sierakowski, alias “Dolega”, nació en 1826 en una familia patriótica en Volhynia, Ucrania contemporánea. Su padre Ignacy participó en una lucha de independencia polaca previa conocida como el Levantamiento de noviembre. Al igual que Konstanty Kalinowski, estudió en

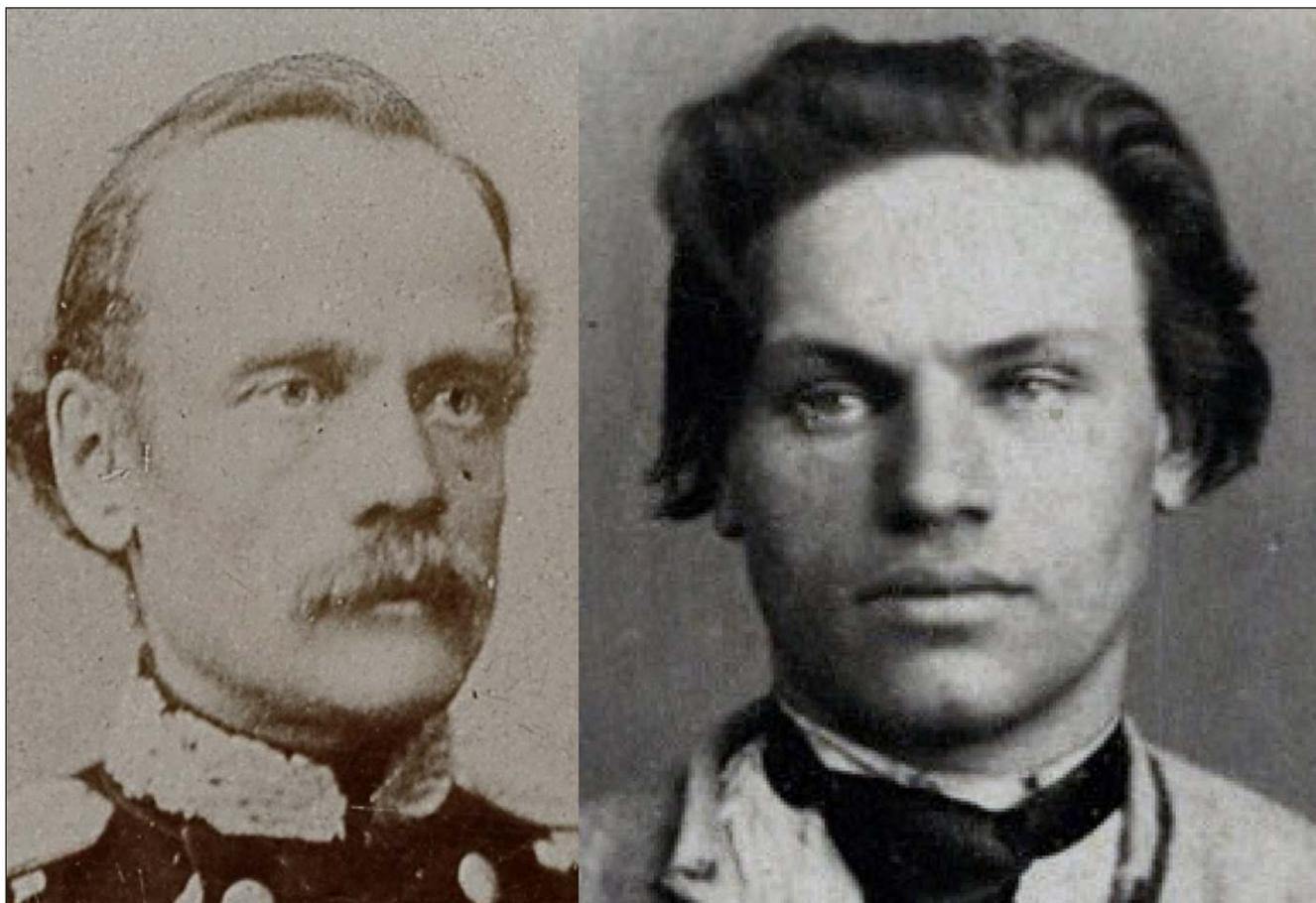


Figura 5. A la izquierda, Zygmunt Sierakowski (1826-63), a la derecha Konstanty Kalinowski (1838-64). Comandantes del Levantamiento de enero en Lituania.

San Petersburgo, y en 1859 se graduó con la medalla de oro de la Academia del Estado Mayor, obteniendo el rango de teniente y siendo derivado al Departamento de Estadística del Estado Mayor. En 1861 fue nombrado capitán del Estado Mayor y fue condecorado con la Orden de Santa Ana. Contrariamente a la opinión pública internacional, fue ahorcado el 27 de junio de 1863.

Konstanty Kalinowski nació en 1838 en el pueblo de Mostowlany ubicado en la Polonia contemporánea. Se graduó en el Departamento de Derecho de la Universidad de San Petersburgo, estableció un movimiento de insurgencia clandestino en la ciudad bielorrusa de Grodno en 1861 y, gracias a un manifiesto que publicó, los partidarios lituanos y bielorrusos del Levantamiento de Enero se unieron a la lucha por el renacimiento de la comunidad. Siguió siendo el comandante del levantamiento en Lituania y Bielorrusia hasta su juicio y ejecución el 22 de marzo de 1864.

El 22 de noviembre de 2019, los restos de Zygmunt Sierakowski, Konstanty Kalinowski y 19 participantes más del

Levantamiento de enero fueron enterrados con honores militares en un funeral estatal en el cementerio de Rossa en Vilna. El presidente de la República de Polonia, Andrzej Duda, el presidente de Lituania, Gitanas Naus da, y el viceprimer ministro bielorruso, Ihar Pietryszenko, asistieron a las ceremonias fúnebres.

3. MATERIAL Y MÉTODOS.

Con el objetivo de llevar a cabo las identificaciones pertinentes, el material enviado por el Dr. Jankauskas se limitó a los modelos tridimensionales de 19 cráneos de los 21 restos humanos encontrados (dos de los cráneos se perdieron durante las excavaciones arqueológicas) y 12 fotografías correspondientes a once candidatos diferentes. Para que las condiciones del estudio fuesen ciegas, no se tuvo acceso a la información correspondiente al perfil biológico (edad) de los candidatos, información de

elementos circunstanciales hallados en los restos (enseres personales como alianzas de matrimonio con las iniciales del nombre), o a la información obtenida de los registros históricos (fechas y modos de ejecución) con la que trabajó el equipo del Dr. Jankauskas. Por ello, debido a falta de información con las que hacer un triaje previo, este desafío de identificación supone un escenario de comparación cruzada que involucra un total de 216 (18x12) solapamientos cráneo-cara (SCC), correspondientes a 198 problemas de SCF. De manera independiente a los investigadores que trabajaron sobre todo el material AM y PM disponible (el equipo del Dr. Jankauskas), este método de identificación fue llevado a cabo en la Universidad de Granada por el antropólogo Rubén Martos, estudiante de doctorado en el campo de la identificación craneofacial y sin experiencia

previa en la resolución de casos.

Para abordar este complejo escenario de identificación, se utilizó el software Skeleton-ID™ versión 0.7.0 – Alpha 2 [8], desarrollado por Panacea Cooperative Research [12] y el algoritmo automático POSEST-SFO[13] para el SCC (incluido en el mismo software). Skeleton-ID™ es la primera herramienta que cuenta con todos los requisitos y características deseables propuestos por el consorcio MEPROCS[6] para la aplicación de la técnica de SCF asistida por ordenador (ver Tabla 1), con la finalidad de minimizar o evitar las principales fuentes de error, así como, tratar con las fuentes de incertidumbre inherentes a la aplicación de la técnica.

Tipo / nombre	Requisitos	Características deseables
Software para la localización de landmarks	Herramienta para la localización de landmarks en un solo píxel	Modo de barrido (Wipe)
Software para llevar a cabo el solapamiento cráneo-cara Mostrar landmarks	Mostrar landmarks Modo de transparencia Herramientas para rotar, trasladar y escalar el modelo 3D del cráneo Herramientas para proyectar correctamente el cráneo 3D en la imagen 2D	Interacción simultánea entre el cráneo 3D y la fotografía AM
Software para la evaluación de la correspondencia cráneo-cara	Modo de transparencia	Mostrar landmarks y contornos Modo de barrido (Wipe) Herramientas para medir la distancia Euclídea entre landmarks o perímetros Herramientas para el marcado de

Tabla 1. Requisitos y características deseables del software de SCF según el consorcio MEPROCS.

Para la aplicación de la técnica, se ha seguido un proceso de 3 etapas consecutivas (Figura 6), las cuales se han descrito en las revisiones bibliográficas más recientes del campo de SCF [6, 14]:

- 1) La adquisición y el procesamiento de los materiales, es decir, escaneado 3D del cráneo y escaneado de las fotografías faciales AM y la posterior localización de los puntos craneométricos y cefalométricos.
- 2) El SCC, que trata de lograr el mejor solapamiento posible del cráneo en una sola fotografía AM. Este proceso se repite para cada fotografía disponible del mismo candidato, obteniendo diferentes SCCs.
- 3) La toma de decisiones, que evalúa el grado de soporte de ser la misma persona o no (exclusión) en función de los SCCs anteriores. Esta decisión se ve influenciada por la correlación morfológica entre el cráneo y la cara, la coincidencia entre los puntos faciales de acuerdo con la profundidad del tejido blando y la consistencia entre las posibles asimetrías.

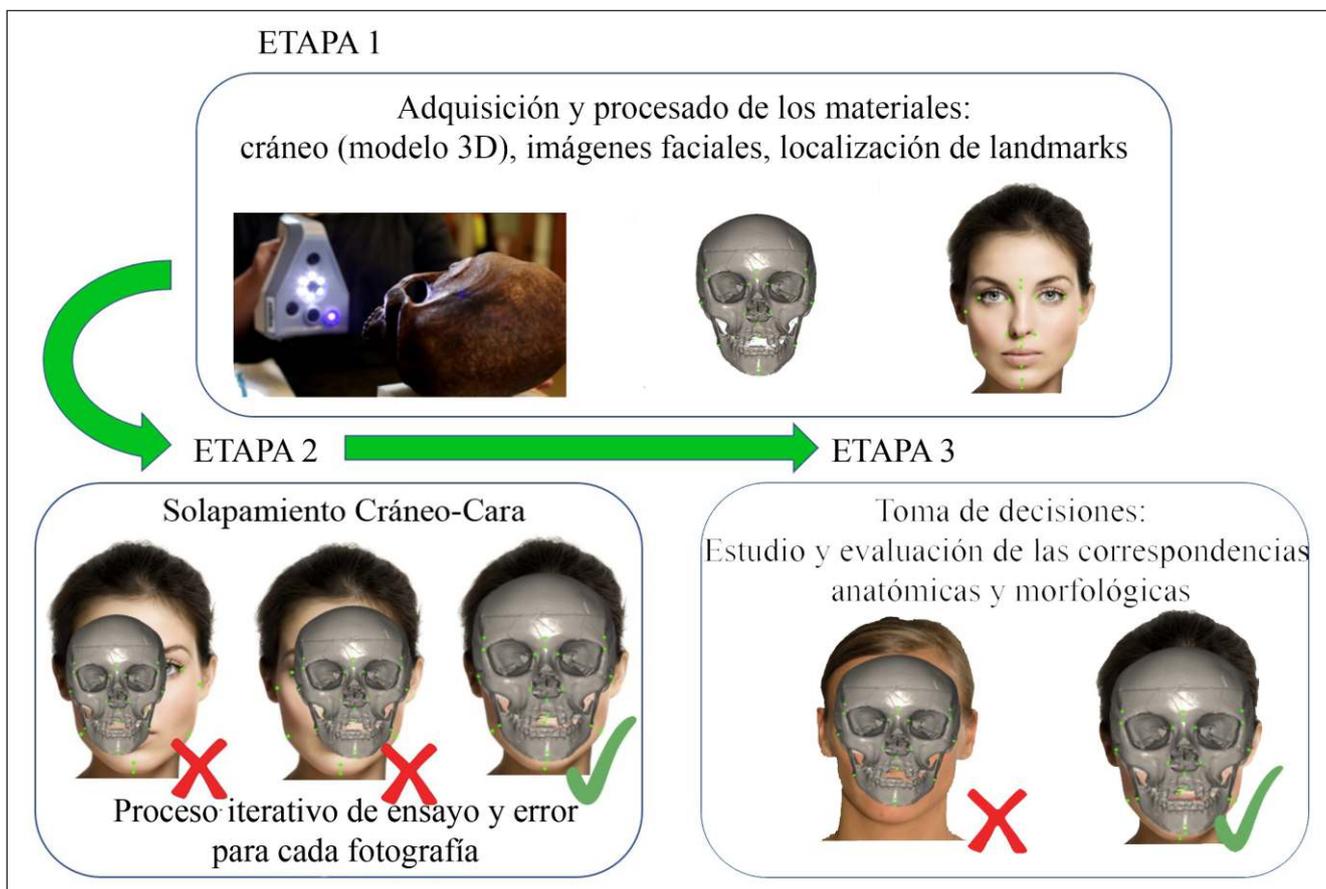


Figura 6. Etapas del proceso asistido por ordenador de Superposición Craneofacial –.

A continuación, se describen las tareas llevadas a cabo, siguiendo las “buenas prácticas” definidas por el consorcio MEPROCS [7] siempre que fuera posible, así como las herramientas de Skeleton-ID™ empleadas en cada una de las etapas.

3.1. Etapa 1. Adquisición y procesado de los materiales.

Para obtener el modelo tridimensional de los 18 cráneos se empleó un escáner 3D de luz estructurada (Go!SCAN 20™). Este trabajo fue realizado por el equipo del Dr. Jankauskas en Vilna, que de acuerdo con las buenas prácticas definidas en MEPROCS, escaneo por separado la mandíbula y el resto del cráneo. Para la articulación de ambos modelos 3D se utilizó el algoritmo automático desarrollado en [28]. Las 12 fotografías de los candidatos fueron obtenidas por el equipo del Dr. Jankauskas de distintas fuentes de los registros históricos y posteriormente digitalizadas utilizando un escáner Epson Perfection v700, manteniendo la relación de aspecto original. Posteriormente, el Sr. Martos

las clasificó en función de la idoneidad de las mismas para aplicar la técnica de SCF (ver Tabla 2).

Los landmarks utilizados para la identificación fueron los de la cara y el cráneo, y preferiblemente aquellos localizados en zonas en las que el grosor del tejido blando es menor, con menor variación como consecuencia de cambios relacionados con la edad, el peso o las expresiones faciales. Se seleccionó un conjunto de 17 landmarks cefalométricos y sus homólogos craneométricos [17] (Figura 7), que posteriormente fueron marcados por el Sr. Martos en los modelos 3D del cráneo y las fotografías. Atendiendo a las recomendaciones de MEPROCS [7], se le pidió a un antropólogo de la Universidad de Vilna que localizase los landmarks craneométricos en el cráneo real, antes de proceder a su escaneado, para guiar posteriormente su localización con el ordenador. Sin embargo, dicho marcado no se tuvo en cuenta debido a varias discrepancias en la localización de ciertos landmarks, según el criterio del antropólogo Rubén Martos, por lo que se hizo necesario un nuevo marcado sobre los modelos 3D.

Caso AM	N° de Fotos	Pose	Dientes visibles	Resolución (píxeles)	PPP	PEP	Calidad para SCF
AM 1	1	Lateral	No	2158 x 3475	800	371.6	Alta
AM 3	1	Frontal	No	5900 x 7085	800	291.1	Alta
AM 4	1	Frontal	No	2847 x 4244	600	101.9	Alta
AM 6	2	Lateral	No	1017 x 1654	350	72.1	Suficiente
		Frontal	No	1008 x 1712	300	102.2	Alta
AM7	1	Lateral	No	720 x 576	96	108.6	Alta
AM 12	1	Frontal	No	1165 x 1647	180	37	Baja
AM 17	1	Lateral	No	1138 x 1836	96	123.3	Alta
AM 18	1	Lateral	No	289 x 294	300	26	Baja
AM 19	1	Frontal	No	638 x 1067	300	53	Baja
AM 20	1	Frontal	No	1069 x 1490	180	40	Baja
AM 21	1	Frontal	No	496 x 624	72	60	Suficiente

Tabla 2. Clasificación de las 12 fotografías AM en función de sus características e idoneidad para SCF. PPP = píxeles por punto; PEP = píxeles entre las pupilas.

Se utilizó Skeleton-ID™ para cargar y visualizar las fotografías y modelos 3D de los cráneos. Posteriormente, se utilizaron las herramientas recomendadas por MEPROCS y disponibles en el software para el marcado de los puntos cefalométricos y craneométricos (Imagen 6):

- Herramienta de cruceta y líneas transversales auxiliares 2D para facilitar el marcado con precisión de los puntos cefalométricos (en un solo píxel) con relación a otros puntos o estructuras anatómicas.
- Herramienta para establecer el plano de Frankfurt en el cráneo.
- Visualización de 4 pantallas simultáneas donde se muestran las distintas Normas craneales en plano de Frankfurt, facilitando el marcado y refinamiento de los puntos craneométricos.
- Herramienta de cruceta y líneas transversales auxiliares 3D para facilitar el marcado con precisión de los puntos craneométricos en relación a otros puntos o estructuras anatómicas, permitiendo interactuar con dos vistas a la vez, y localizar de manera unívoca el punto más anterior o posterior de una región dentro de la superficie del modelo 3D.

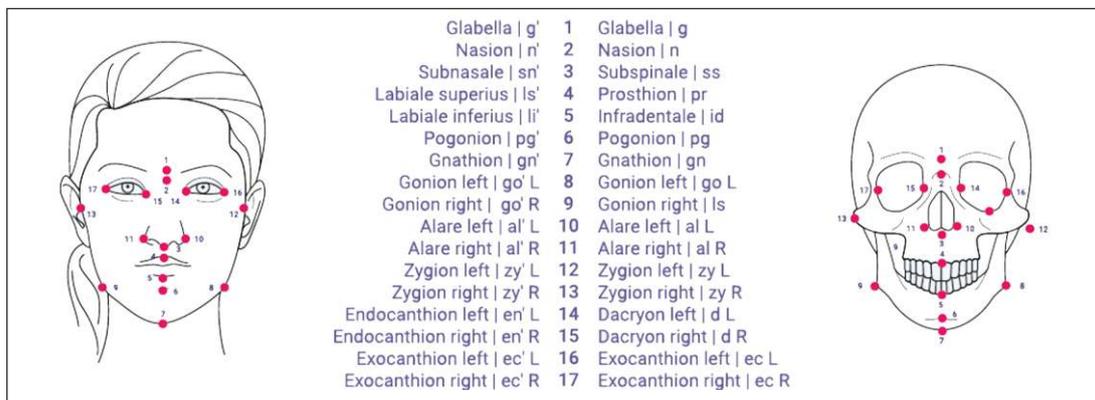


Figura 7. Listado de landmarks cefalométricos y craneométricos considerados durante el proceso de SCF.

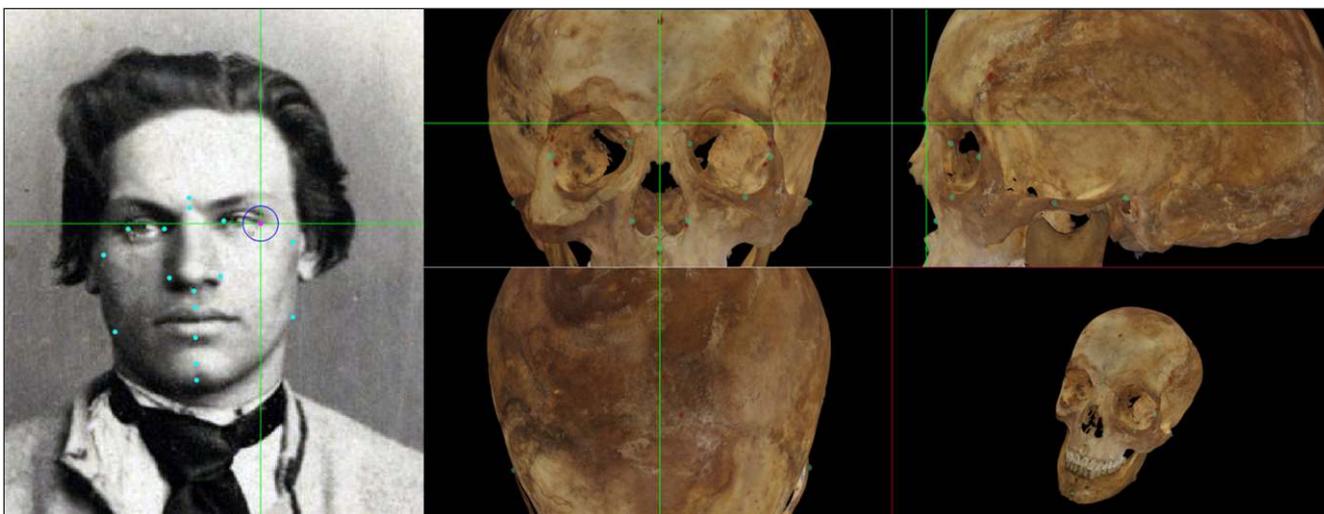


Figura 8. Localización de landmarks cefalométricos (izquierda) y craneométricos (derecha) mediante las herramientas proporcionadas para tal fin por Skeleton-ID™.

3.2. Etapa 2. Solapamiento cráneo-cara.

Los 216 SCCs se obtuvieron mediante un novedoso algoritmo automático, denominado “POSEST-SFO” [13] (Figura 9). Dicho algoritmo resuelve un sistema de ecuaciones polinómicas que relacionan las distancias entre los puntos craneales y faciales antes y después de la proyección del modelo 3D del cráneo sobre la cara en la fotografía. Este método es extremadamente rápido, ya que en menos de 78 milisegundos es capaz de obtener un solapamiento.

Posteriormente, se procedió al refinamiento manual en aquellos casos en los que fue necesario (aquellos en los que, debido a la oclusión de ciertos puntos, la superposición no se había realizado correctamente según el criterio del antropólogo Rubén Martos).

Para los datos del tejido blando se utilizaron los valores medios publicados en Stephan y col. [18] para población mundial de edad adulta.

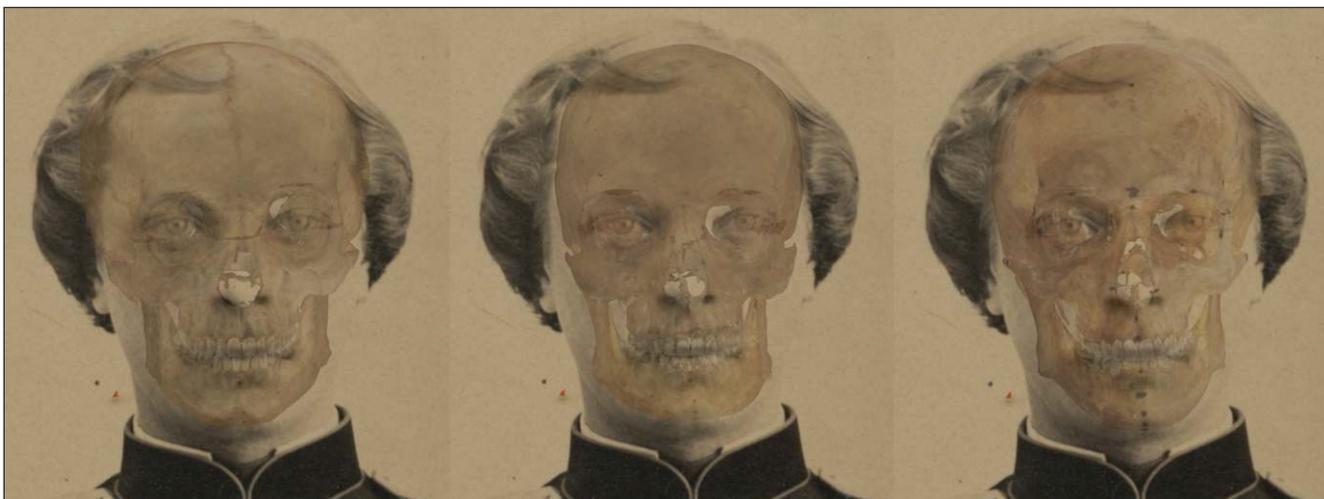


Figura 9. SCCs correspondientes a 3 cráneos diferentes sobre la misma fotografía, obtenidos mediante el algoritmo automático POSEST-SFO.

Se utilizó Skeleton-ID™ para aplicar el algoritmo automático de superposición y el refinamiento manual del modelo 3D del cráneo sobre la fotografía, mediante las herramientas de rotación, escalado y proyección. Análogamente, cuando se

consideró oportuno, se utilizaron las operaciones de cámara avanzada (cambio de la distancia cámara-sujeto, distancia focal y punto principal de la imagen).

3.3. Etapa 3. Toma de decisiones.

Para llegar a una conclusión sobre cada superposición, se han utilizado una serie de criterios morfológicos para la evaluación de la consistencia anatómica entre el cráneo superpuesto y la fotografía. Estos criterios se agrupan en: (1) el estudio de asimetrías faciales; (2) la concordancia entre los contornos de la cara y el cráneo; (3) el análisis del emparejamiento de landmarks cefalométricos y craneométricos considerando el grosor del tejido blando; y (4) la relación posicional de las estructuras faciales y esqueléticas. Las definiciones de estos criterios se pueden encontrar en Chai y col. [19], Austin y Maples [20], Yoshino y col. [21, 22], o Jayaprakash y col. [23], entre otros.

Los criterios más representativos utilizados para la evaluación de la correspondencia morfológica en este estudio se pueden observar en la Tabla 3.

Estos criterios se evaluaron de manera visual con la ayuda de las herramientas específicas de transparencia y wipe propuestas por MEPROCS, junto con la visualización de los datos de tejido blando, disponibles para tal efecto en Skeleton-ID™ (Figura 10):

- Herramientas para el cambio de opacidad (transparencia), y wipe, para ocultar parte del cráneo, de manera que permiten la evaluación de la correspondencia morfológica y la posición de las estructuras anatómicas (Figura 10).
- Visualización y análisis de la consistencia del tejido blando a través de conos (Figura 11). El tamaño de este cono vendrá determinado por el estudio de tejido blando definido y consta de tres regiones: en rojo se visualizan distancias de tejido blando inferiores a las que tiene cabida dentro del estudio de tejido blando, en amarillo estarían los datos del estudio por encima de la media más tres veces la desviación típica y por debajo de la media menos tres veces la desviación típica. La franja de color amarillo daría cabida al 99,7% de la distribución, de acuerdo con el teorema de Chebyshev, el cual asume una distribución normal de los datos. Finalmente, en verde se encuentran los grosores de tejido blando entre la media \pm la desviación típica. El análisis consistirá en determinar, para cada landmark cefalométrico, la región del cono del landmark craneométrico correspondiente en la que se encuentra, o constatar la inconsistencia en ese punto.

Consistencia de los contornos óseos y faciales / curvas morfológicas.	El contorno del hueso frontal sigue el contorno de la frente.
	La altura del cráneo y la cabeza es similar (explica la variación en el tejido blando y la distorsión en la percepción creada por la presencia del cabello).
	El ancho del cráneo rellena el área de la frente en la cara.
	La longitud del cráneo desde menton a bregma encaja dentro de la cara.
	La línea lateral del hueso cigomático coincide con el contorno de la mejilla.
	El contorno de la barbilla es consistente con el contorno del mentón.
	El arco superciliar sigue el margen supraorbital.
Relación posicional entre el cráneo y la cara.	El porion se alinea justo posterior al trago, ligeramente inferior al núcleo del hélix.
	El tubérculo de Whitnall se alinea con el exocanthion en el plano horizontal y verticalmente se encuentra medial al tubérculo. El ancho orbital es consistente con la fisura del ojo.
	El margen medial de las órbitas se alinea y superpone con los endocanthion.
	El margen inferior de la abertura piriforme coincide con subnasale.
	El ancho y la altura de la abertura piriforme se encuentran dentro de los bordes de la nariz.
Grosor del tejido blando facial en los pares de puntos homólogos	Visualización de los datos de tejido blando de las parejas de landmarks homólogos a través de conos, cuyo tamaño está determinado por el estudio de tejido blando definido.
Asimetrías faciales	Asimetrías en el área nasal.
	Asimetrías en el área cigomática.
	Asimetrías en las orbitas.

Tabla 3. Descripción de los criterios morfológicos más representativos utilizados para la evaluación de la correspondencia morfológica.

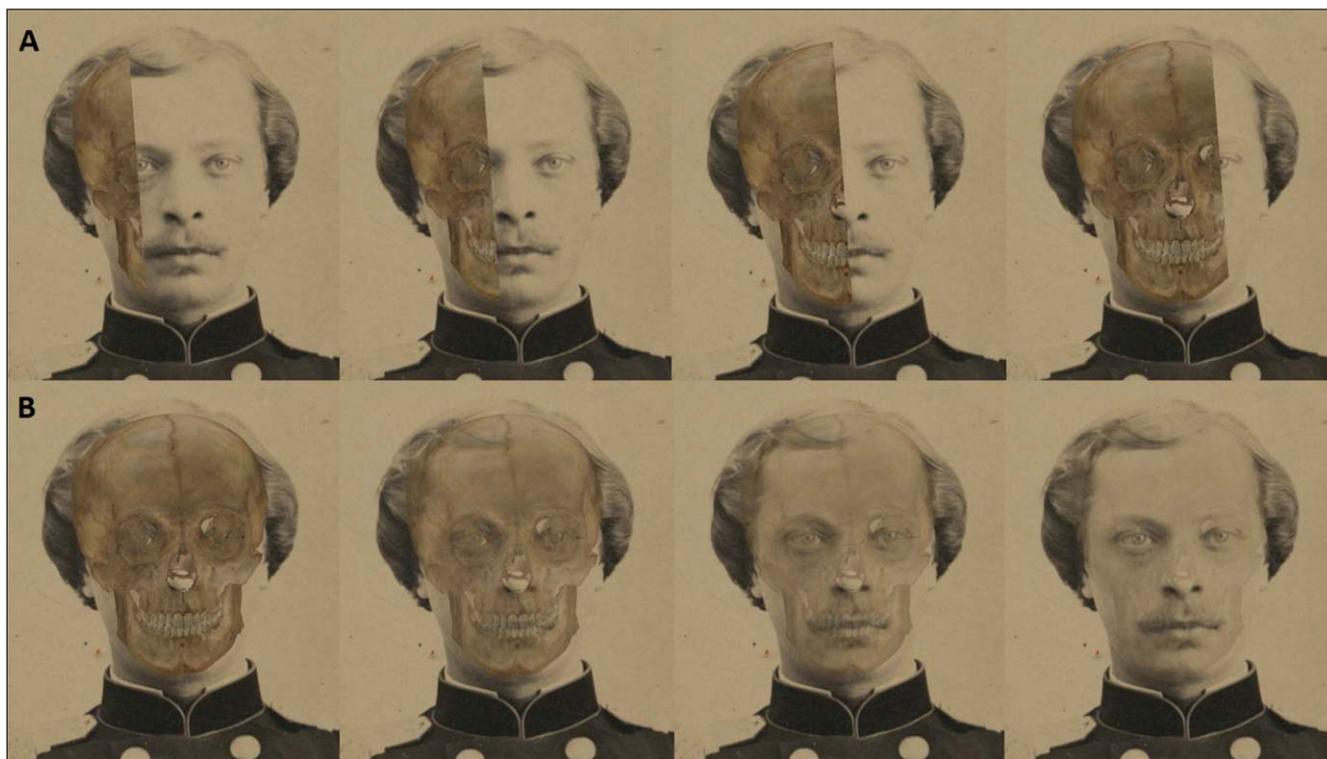


Figura 10. Evaluación de criterios morfológicos en un SCC con Skeleton-ID. A) Evaluación visual del contorno del margen supraorbital y el arco superciliar mediante una secuencia de barrido con la herramienta wipe. Se puede observar como el arco superciliar sigue el margen supraorbital consistentemente; B) Evaluación visual de la relación posicional de las estructuras anatómicas entre el cráneo y la cara mediante una secuencia de transparencia (80%, 60%, 40%, 20%) con la herramienta de opacidad. Se puede observar como la fisura del ojo es consistente con el ancho orbital y como la altura y la anchura de la abertura

4. RESULTADOS.

Teniendo en cuenta los materiales examinados y la consistencia de la correspondencia entre el cráneo y la cara, se proporcionó una decisión final dentro de la escala establecida por el consorcio MEPROCS, asignando un valor en términos de soporte fuerte, moderado o limitado a la afirmación de que el cráneo y la imagen facial perteneciesen (o no) a la misma persona (ver Tabla 4). Además, se tuvieron en cuenta posibles características discriminatorias para la modificación del grado final de soporte dando una explicación adecuada.

Tomando por buenos los resultados de identificación proporcionados por el Dr. Jankauskas, el cual se basó en los

resultados ofrecidos por diferentes métodos de identificación y elementos circunstanciales según se explica en la Tabla 5, se llevó a cabo el cálculo de la matriz de confusión (ver Tabla 6) para comparar las decisiones tomadas por el antropólogo Rubén Martos con los verdaderos positivos y negativos. Esta última revela una tasa de decisiones correctas del 98,76%, con ningún falso negativo, pero con dos falsos positivos. Además, en 36 de los 198 casos de SCF no se pudo alcanzar una decisión (indeterminada) debido a la mala calidad de dos de las fotografías. Las imágenes correspondientes a los casos positivos pueden encontrarse en el anexo de este trabajo.

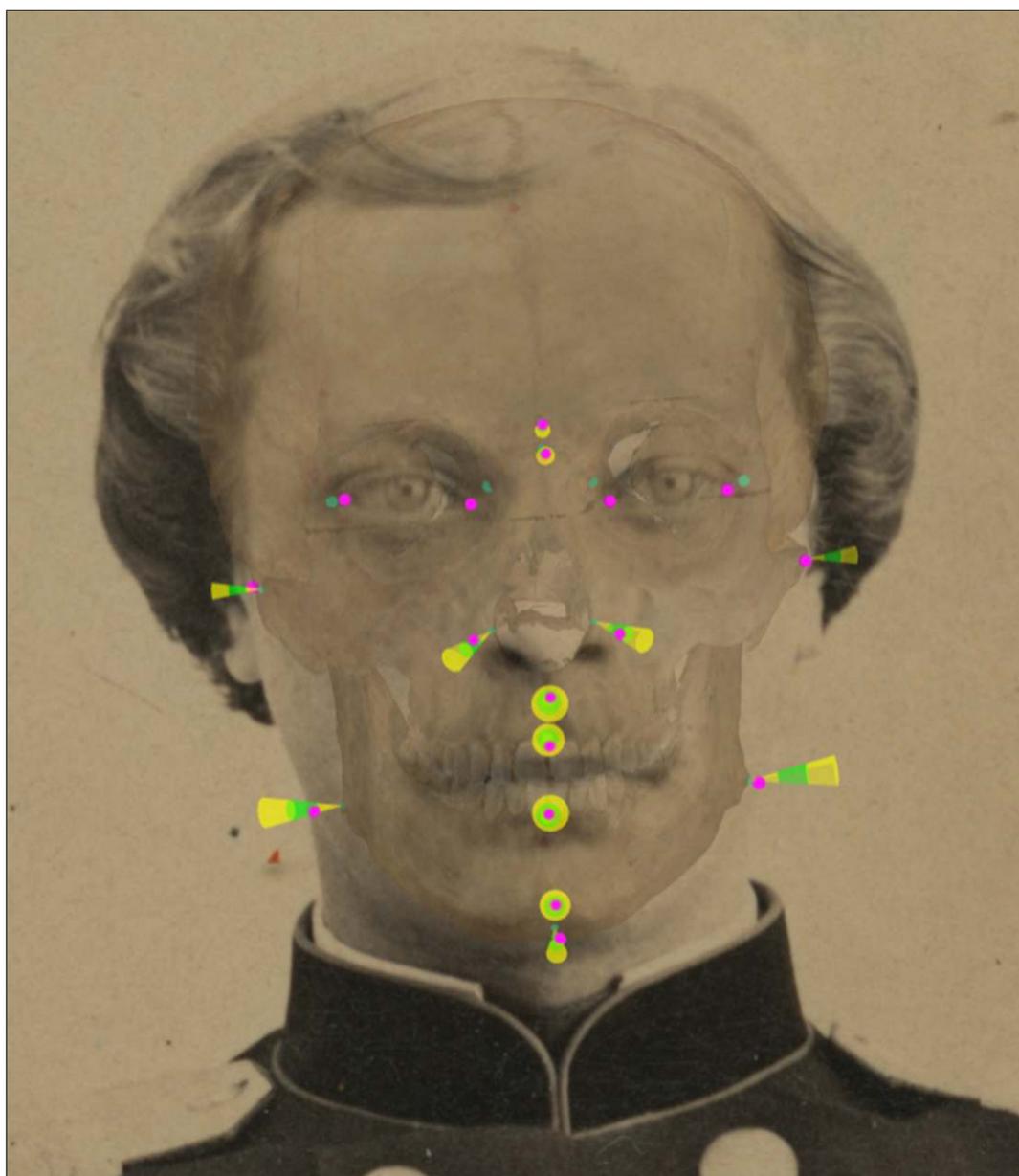


Figura 11. Visualización y análisis de la consistencia del tejido blando a través de conos con Skeleton-ID. Para ello se analiza el encaje de cada landmark cefalométrico (color magenta) dentro del cono con el que se representa el tejido blando aplicado sobre su landmark craneofacial homólogo. Podemos observar cómo, en la franja verde, se encuentran los grosores de tejido blando entre la media \pm la desviación típica ($n' - n$, $al' L - al L$, $al' R - al R$, $sn' - ss$, $ls' - pr$, $li' - id$, $pg' - pg$, $gn' - gn$). En la franja amarilla, los grosores entre la media + la desviación típica y la media + 3 veces la desviación típica ($g' - g$) y los grosores entre la media - la desviación típica y la media - 3 veces la desviación típica ($zy' L - zy L$, $zy' R - zy R$, $go' L - go L$, $go' R - go R$). Las parejas $en' - d$ y $ex' - ec$ no se han analizado debido a la ausencia de datos en el estudio de grosor de tejido blando utilizado.

Finalmente, tras realizar las correspondientes evaluaciones morfológicas, se asignó el grado de soporte (limitado, moderado o fuerte) que puede lograr un caso de

identificación de SCF específico, en consonancia con la calidad y la cantidad del material disponible (fotografías AM, mandíbula, y cráneo) según los criterios

	Grado de soporte	# Decisiones	Observaciones
De ser la misma persona	Positivo Fuerte	1	<ul style="list-style-type: none"> Cráneo completo con mandíbula. 2 fotografías en diferentes poses con suficiente calidad. Las parejas de landmarks se encuentran dentro de la media \pm la desviación estándar acorde al estudio estadístico utilizado. Los criterios anatómicos analizados entre el cráneo y la cara son fuertemente consistentes. Las asimetrías observadas son consistentes en cráneo y cara.
	Positivo Moderado	4	<ul style="list-style-type: none"> Cráneo completo con mandíbula. Una fotografía de buena calidad. La mayoría de parejas de landmarks se encuentran dentro de la media \pm la desviación estándar acorde al estudio estadístico utilizado. Los criterios anatómicos analizados entre el cráneo y la cara son fuertemente consistentes.
	Positivo Limitado	4	<ul style="list-style-type: none"> Cráneo completo con mandíbula. Una fotografía de suficiente o poca calidad. La mayoría de parejas de landmarks se encuentran dentro de la media \pm la desviación estándar acorde al estudio estadístico utilizado. La mayoría de los criterios anatómicos analizados entre el cráneo y la cara son moderadamente consistentes.
De NO ser la misma persona	Indeterminado	36	<ul style="list-style-type: none"> La consistencia anatómica cráneo-cara no puede ser evaluada debido a la mala calidad de la fotografía.
	Negativo Limitado	64	<ul style="list-style-type: none"> Cráneo completo con mandíbula. Una fotografía de suficiente o poca calidad. La mayoría de las parejas de landmarks se encuentran fuera del rango acorde al estudio estadístico utilizado. La mayoría de los criterios anatómicos analizados entre el cráneo y la cara son inconsistentes.
	Negativo Moderado	72	<ul style="list-style-type: none"> Cráneo completo con mandíbula. Una fotografía de buena calidad. La mayoría de las parejas de landmarks se encuentran fuera del rango acorde al estudio estadístico utilizado. La mayoría de los criterios anatómicos analizados entre el cráneo y la cara son inconsistentes.
	Negativo Fuerte	17	<ul style="list-style-type: none"> Cráneo completo con mandíbula. 2 fotografías en diferentes poses con suficiente calidad. La mayoría de las parejas de landmarks se encuentran fuera del rango acorde al estudio estadístico utilizado. La mayoría de los criterios anatómicos analizados entre el cráneo y la cara son inconsistentes. Las asimetrías observadas son inconsistentes en cráneo y cara.
	Total	198	

Tabla 4. Número de casos clasificados en cada uno de los grados de soporte atendiendo a las observaciones propuestas por el consorcio MEPROCS.

Caso AM	Decisión SCF (Caso PM)	Ground Truth (Caso PM)	Método de identificación.
AM1	-	-	<ul style="list-style-type: none"> Restos no encontrados en las fosas de inhumación.
AM3	K4P7	K4P7	<ul style="list-style-type: none"> Contexto arqueológico: dos individuos ejecutados el mismo día y enterrados en la misma fosa (el otro individuo fue identificado por ADN). Edad, sexo y modo de ejecución coincidentes. Superposición craneofacial.
AM4	K12P18	K12P18	<ul style="list-style-type: none"> Contexto arqueológico. Edad, sexo y modo de ejecución coincidentes.
AM6	K3P5	K3P5	<ul style="list-style-type: none"> Contexto arqueológico: alianza de matrimonio con iniciales y fecha de la boda. Edad, sexo y modo de ejecución coincidentes. Superposición craneofacial (dos fotografías en poses diferentes).
AM7	K13P19	K13P19	<ul style="list-style-type: none"> Contexto arqueológico. Edad, sexo y modo de ejecución coincidentes. Superposición craneofacial.
AM12	K2P2	K2P4	<ul style="list-style-type: none"> Contexto arqueológico: único caso de 3 individuos ejecutados el mismo día. Edad (el mayor de los 3), sexo y modo de ejecución coincidentes.
AM17	K6P11	K6P11	<ul style="list-style-type: none"> Contexto arqueológico: dos individuos ejecutados el mismo día, enterrado con Dormanowski. Edad, sexo y modo de ejecución coincidentes. Superposición craneofacial.
AM18	-	K6P10	<ul style="list-style-type: none"> Contexto arqueológico: dos individuos enterrados el mismo día, enterrado con AM17. Edad, sexo y modo de ejecución coincidentes. Superposición craneofacial.
AM19	K5P8	K14P20	<ul style="list-style-type: none"> Contexto arqueológico. Identificación mediante una muestra de ADN de su hermano, exhumado de otro cementerio histórico.
AM20	K8P13	K8P13	<ul style="list-style-type: none"> Contexto arqueológico. Edad, sexo y modo de ejecución coincidentes. Superposición craneofacial.
AM21	K1P1	K1P1	<ul style="list-style-type: none"> Contexto arqueológico. Edad, sexo y modo de ejecución coincidentes. Superposición craneofacial.

Tabla 5. Decisiones binarias (que cráneo corresponde a cada caso AM) tomadas por el antropólogo Rubén Martos (segunda columna) y resultados de identificación (tercera columna) del equipo del Dr. Jankauskas. En la última columna se enumeran los distintos métodos de identificación y elementos de juicio que llevaron al equipo del Dr. Jankauskas a establecer la identificación positiva.

5. CONCLUSIONES Y DISCUSIÓN.

Por primera vez se ha abordado un escenario complejo de múltiples comparaciones mediante SCF, en un estudio ciego, sobre un escenario real de identificación en una fosa común con 19 cráneos. Se ha validado la primera herramienta diseñada de forma específica para SCF, Skeleton-ID™, que cumple con los estándares y requisitos para un software de

SCF definidos por el consorcio MEPROCS. Esta validación es extensible al algoritmo automático de SCC que incluye dicho software.

La altísima tasa de aciertos y el incontable ahorro en tiempo hablan del enorme beneficio que puede suponer el uso de un software específico junto con algoritmos basados en IA y el marco metodológico de MEPROCS. No obstante, durante la

elaboración de este estudio se han tenido que abordar numerosas desventajas, que han propiciado un escenario más complejo si cabe, y que a buen seguro han tenido un impacto negativo en la etapa de toma de decisiones:

- No se ha tenido acceso a los cráneos originales (únicamente a los modelos 3D digitales).
- Los dientes no eran visibles en las fotografías (imposibilitando la comparación dental).
- Únicamente se disponía de una fotografía en una única pose para 11 de los 12 individuos.
- Las fotografías utilizadas eran muy antiguas (más de 150 años), por lo que no se tenía acceso a los metadatos (modelo de cámara y focal utilizada) y la calidad de algunas era inaceptable para la aplicación de la SCF.

Todas estas limitaciones son, hoy en día, fácilmente salvables dado el multitudinario uso de las cámaras del teléfono móvil. Parece coherente pensar que en casos actuales tengamos acceso a decenas de fotografías digitales recientes, en distintas poses, de calidad suficiente y donde se haga visible

parte de la dentadura.

Pese a las dificultades encontradas, los resultados obtenidos son positivos. Los únicos errores (falsos positivos) se produjeron en dos casos que se clasificaron como positivos con un apoyo limitado (el menor grado de soporte posible dentro de la escala MEPROCS). Nótese que el proceso de identificación se abordó desde un principio como un escenario cerrado, en el cual entre los 19 cráneos analizados debían encontrarse los 11 individuos de las fotografías. Finalmente, resultó no ser así tras las investigaciones del equipo del Dr. Jankauskas, realizadas en paralelo a este estudio. De esta manera, los dos casos clasificados como falsos positivos se hicieron atendiendo a los pocos criterios que podían correlacionarse de manera positiva dentro de la baja calidad de las fotografías y los 19 cráneos. De esos dos casos, el cráneo perteneciente al sujeto AM19 no se encontraba entre los modelos 3D facilitados al antropólogo Rubén Martos y la fotografía correspondiente al sujeto AM12 era errónea (etiquetada con el nombre del sujeto equivocado). Es importante destacar que una decisión positiva en términos de apoyo limitado no debe tomarse como una evidencia en la identificación, sino como un apoyo complementario para guiar la investigación.

Caso AM	# Casos de SCF	Indeterminados	VP	VN	FP	FN	% Decisiones correctas
AM1	18	18	0	0	0	0	-
AM3	18	0	1	17	0	0	100%
AM4	18	0	1	17	0	0	100%
AM6	18	0	1	17	0	0	100%
AM7	18	0	1	17	0	0	100%
AM12	18	0	0	17	1	0	94,4%
AM17	18	0	1	17	0	0	100%
AM18	18	18	0	0	0	0	-
AM19	18	0	0	17	1	0	94,4%
AM20	18	1	0	17	0	0	100%
AM21	18	0	1	17	0	0	100%
TOTALES	198	37	6	153	2	0	98,76%

Tabla 6. Matriz de confusión donde se muestra el porcentaje de decisiones correctas alcanzado por Rubén Martos en la evaluación de los 198 casos de SCF. En cada columna se detallan el número de falsos positivos (FP) y negativos (FN), verdaderos positivos (VP) y negativos (VN), así como los casos indeterminados.

Cabe mencionar el caso del sujeto AM4, cuya fotografía facilitada correspondía en realidad a la fotografía de su hermano. Pese a no ser la foto del individuo en cuestión, se llegó a la misma conclusión que el Dr. Jankauskas, asignando el mismo cráneo (K12P18) con un grado de apoyo limitado. Una de las posibles explicaciones pudiera ser que, al tratarse de hermanos, la morfología facial fuese muy parecida entre

ambos y dada la baja calidad de la imagen, los criterios morfológicos generales analizados fuesen similares. Aunque existen estudios sobre la similitud en la morfología craneofacial en gemelos [26, 27], en base a nuestro conocimiento, no existe ningún estudio que use la técnica de SCF para llevar a cabo comparaciones cráneo-cara entre hermanos, familiares cercanos o descendientes.

Otro dato muy relevante se refiere al tiempo empleado para realizar el estudio. El uso de la herramienta Skeleton-ID™ ha permitido que en un total de 90 horas un antropólogo inexperto fuese capaz de situar de manera precisa los landmarks craneométricos y cefalométricos, realizar 216 SCCs (18 cráneos 3D x 12 fotografías faciales), analizar las correspondencias morfológicas y llegar a conclusiones sobre la mayoría de los casos abordados. El gran potencial de las herramientas y los algoritmos automáticos basados en IA reside en la capacidad de ejecutar tareas que para el experto son tediosas, propensas a errores y que requieren mucho tiempo como es el caso del SCC. De esta manera, estas herramientas permitirán el abordaje y la resolución de un mayor número de casos en un tiempo menor.

Los resultados obtenidos de manera semi-automática (antropólogo + uso del algoritmo automático de SCC) suponen un nuevo empuje en la dirección de la consideración de la SCF como técnica de identificación forense. Tanto el enfoque metodológico [25, 28, 29] como la tecnología disponible [13, 15, 16] han avanzado mucho en los últimos años y demuestran su utilidad incluso en escenarios sumamente complejos como el abordado en este trabajo. El futuro de la técnica de SCF pasa, en opinión de los autores, por los siguientes puntos:

- La necesidad de una formación multidisciplinar (anatomía/morfología facial y conceptos de fotografía/fotogrametría) y específica (localización de landmarks, solapamiento cráneo-cara, análisis de correspondencias morfológicas).
- La aplicación rigurosa y metodológica de la técnica de SCF (siguiendo las buenas prácticas y consideraciones establecidas por el consorcio MEPROCS).
- El uso de herramientas informáticas diseñadas específicamente para la tarea de SCF.
- El uso de algoritmos de IA para apoyar al experto en las diferentes etapas del proceso.

Los trabajos futuros que nos planteamos en la línea de validación de la técnica de SCF y la herramienta Skeleton-ID pasan por la utilización de nuevos algoritmos de IA (localización automática de landmarks en fotografías y modelos 3D de cráneos, un nuevo algoritmo de SCC que trabaja sobre varias fotografías al mismo tiempo y un sistema de soporte a la toma de decisiones [30, 31]) y el estudio del impacto de cada uno de estos en la precisión de los resultados alcanzados en diferentes escenarios de identificación (fosas comunes históricas, casos de personas desaparecidas recientes, etc.). Así mismo, nos planteamos llevar a cabo estudios donde participen varios expertos para

poder medir la variabilidad inter-experto a la par que estudiaremos la fiabilidad de un enfoque totalmente automático.

6. AGRADECIMIENTOS.

Este trabajo ha sido cofinanciado por el Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades, a través de las subvenciones SNEO-20191236 (programa Neotec del CDTI), PTQ-17-09306 (programa Torres Quevedo) y PGC2018-101216-B-I00 (proyecto EXASOCO), todos ellos incluyendo fondos FEDER.

7. BIBLIOGRAFÍA.

1. KROGMAN W, ISCAN M. *The Human Skeleton in Forensic Medicine*. Springfield: Charles C Thomas Publisher, LTD, 1986.
2. ISCAN MY, HELMER RP. *Forensic analysis of the skull*. Wiley-Liss, 1993.
3. WILKINSON C, RYNN C (eds). *Craniofacial Identification*. 1 edition. Cambridge; New York: Cambridge University Press, 2012.
4. GLAISTER J, BRASH JC. *Medico-legal aspects of the Ruxton case*. Baltimore: W. Wood & Co., 1937.
5. JAYAPRAKASH PT, HADI H, SRINIVASAN A, et al. Gaudio D, Olivieri L, De Angelis D, Poppa P, Galassi A, Cattaneo C. Reliability of craniofacial superimposition using three-dimension skull model. *J Forensic Sci* 2016; 61(1):5-11. *Journal of Forensic Sciences* 2016; 61: 1390-1393.
6. HUETE MI, IBÁÑEZ O, WILKINSON C, et al. Past, present, and future of craniofacial superimposition: Literature and international surveys. *Leg Med (Tokyo)* 2015; 17: 267-278.
7. DAMAS S, WILKINSON C, KAHANA T, et al. Study on the performance of different craniofacial superimposition approaches (II): Best practices proposal. *Forensic Science International* 2015; 257: 504-508.
8. Skeleton-ID, <https://skeleton-id.com/> (accessed 8 June 2020).
9. VITKUS G (ed) *Wars of Lithuania: A Systemic Quantitative Analysis of Lithuania's National Wars in the Nineteenth and Twentieth Centuries*. Vilnius: Eugrimas, 2014.
10. Powstanie styczniowe - Muzeum Historii Polski, <http://muzhp.pl/pl/c/983/powstanie-styczniowe> retrieved 2019%20june%202018 (accessed 20 May 2020).

11. January Uprising. *Wikipedia*, https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=January_Uprising&oldid=955460920 (accessed 20 May 2020).
12. Panacea Cooperative Research, <https://panacea-coop.com/index.php/es/> (accessed 8 June 2020).
13. VALSECCHI A, DAMAS S, CORDÓN O. A Robust and Efficient Method for Skull-Face Overlay in Computerized Craniofacial Superimposition. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security* 2018; 13: 1960-1974.
14. DAMAS S, CORDÓN O, IBÁÑEZ O, et al. Forensic identification by computer-aided craniofacial superimposition: A survey. *ACM Comput Surv* 2011; 43: 27:1-27:27.
15. CAMPOMANES-ÁLVAREZ BR, IBÁÑEZ O, CAMPOMANES-ÁLVAREZ C, et al. Modeling Facial Soft Tissue Thickness for Automatic Skull-Face Overlay. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security* 2015; 10: 2057-2070.
16. BERMEJO E, CAMPOMANES-ÁLVAREZ C, VALSECCHI A, et al. Genetic algorithms for skull-face overlay including mandible articulation. *Information Sciences* 2017; 420: 200-217.
17. CAPLE J, STEPHAN CN. A standardized nomenclature for craniofacial and facial anthropometry. *Int J Legal Med* 2016; 130: 863-879.
18. STEPHAN CN. The Application of the Central Limit Theorem and the Law of Large Numbers to Facial Soft Tissue Depths: T-Table Robustness and Trends Since 2008. *Journal of forensic sciences* 2014; 59(2): 454-62. DOI: 10.1111/1556-4029.12328.
19. CHAI DS, LAN YW, TAO C, et al. A study on the standard for forensic anthropologic identification of skull-image superimposition. *J Forensic Sci* 1989; 34: 1343-1356.
20. AUSTIN-SMITH D, MAPLES WR. The Reliability of Skull/Photograph Superimposition in Individual Identification. *JFS* 1994; 39: 446-455.
21. YOSHINO M, IMAIZUMI K, MIYASAKA S, et al. Evaluation of anatomical consistency in craniofacial superimposition images. *Forensic Science International* 1995; 74: 125-134.
22. YOSHINO M. Craniofacial superimposition. *Craniofacial Identification* 2012; 238-253.
23. JAYAPRAKASH PT, SRINIVASAN GJ, AMRAVANESWARAN MG. Cranio-facial morphanalysis: a new method for enhancing reliability while identifying skulls by photo superimposition. *Forensic Science International* 2001; 117: 121-143.
24. VESELOVSKAJA JV. Antropologiceskaja rekonstrukcija (Anthropological reconstruction). Moscow, 1991.
25. DAMAS S, CORDÓN O, IBÁÑEZ O. *Handbook on Craniofacial Superimposition: The MEPROCS Project*. Springer International Publishing 2020. DOI: 10.1007/978-3-319-11137-7.
26. WEINBERG SM, PARSONS TE, MARAZITA ML, et al. Heritability of Face Shape in Twins: A Preliminary Study using 3D Stereophotogrammetry and Geometric Morphometrics. *Dent* 3000 2013; 1(1): 14. DOI: 10.5195/d3000.2013.14.
27. DJORDJEVIC J, ZHUROV AI, RICHMOND S. Genetic and Environmental Contributions to Facial Morphological Variation: A 3D Population-Based Twin Study. *PLoS One*; 11. Epub ahead of print 1 September 2016. DOI: 10.1371/journal.pone.0162250.
28. DAMAS S, WILKINSON C, KAHANA T, et al. Study on the performance of different craniofacial superimposition approaches (II): Best practices proposal. *Forensic Science International* 2015; 257: 504-508.
29. IBÁÑEZ O, VALSECCHI A, CAVALLI F, et al. Study on the criteria for assessing skull-face correspondence in craniofacial superimposition. *Legal Medicine* 2016; 23: 59-70.
30. CAMPOMANES-ÁLVAREZ C, MARTOS-FERNÁNDEZ R, WILKINSON C, et al. Modeling Skull-Face Anatomical/Morphological Correspondence for Craniofacial Superimposition-Based Identification. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security* 2018; 13: 1481-1494.
31. CAMPOMANES-ÁLVAREZ C, IBÁÑEZ O, CORDÓN O, et al. Hierarchical information fusion for decision making in craniofacial superimposition. *Information Fusion* 2018; 39: 25-40.

8. ANEXO.

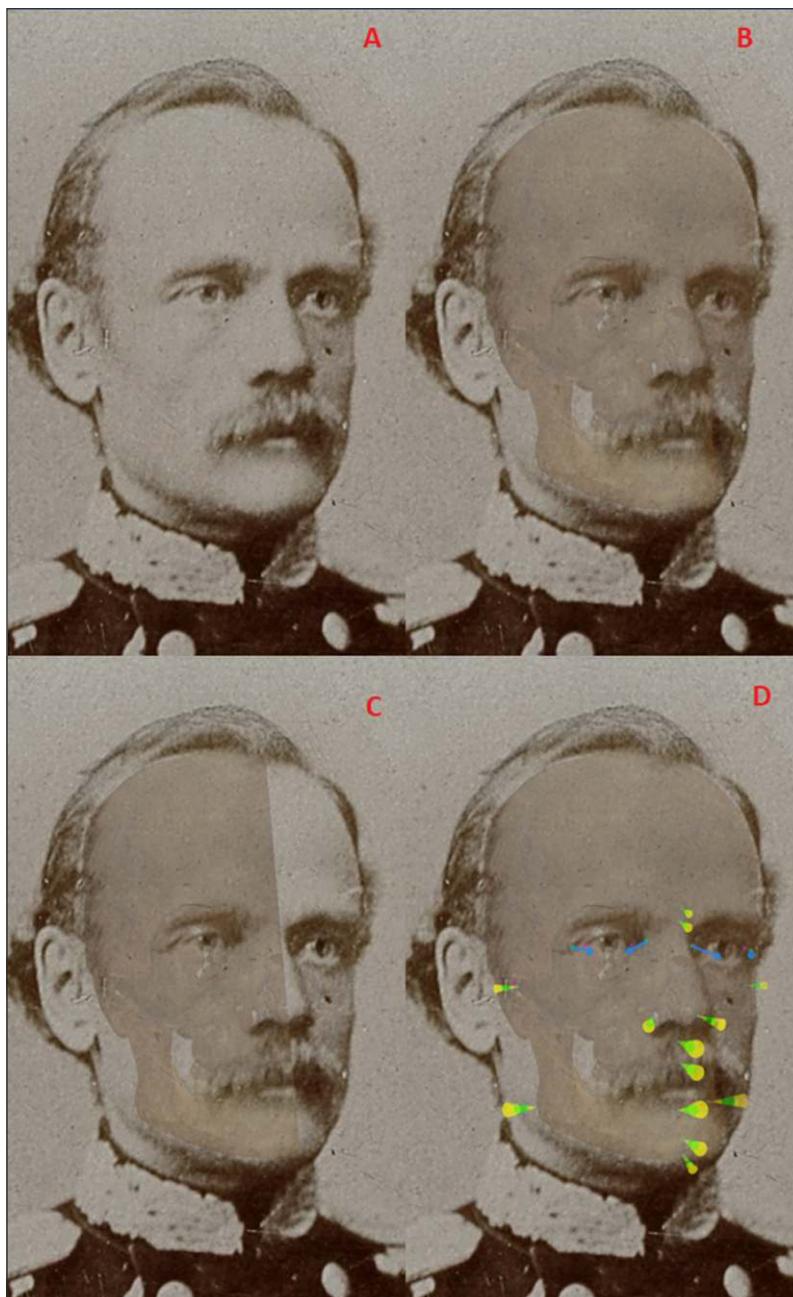


Figura 12. Superposición n° 1 correspondiente al sujeto AM6 (Zygmunt Sierakowski) contra el cráneo K3P5. Clasificado como Positivo con soporte fuerte (verdadero positivo). A) Imagen original; B) SCC con un 30% de opacidad; C) Barrido del cráneo sobre la fotografía; D) Representación del estudio estadístico de tejido blando mediante conos.

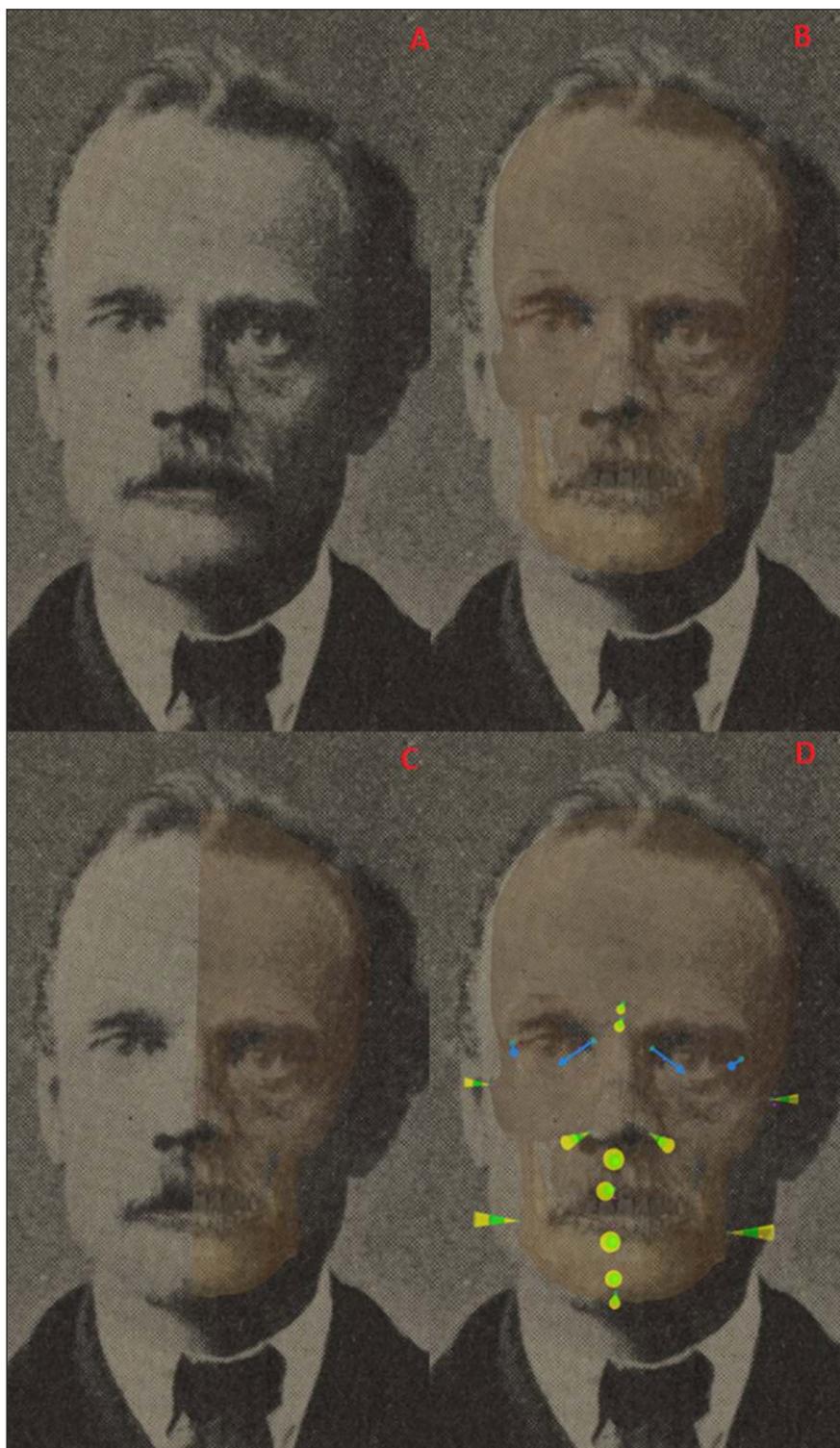


Figura 13. Superposición n° 2 correspondiente al sujeto AM6 (Zygmunt Sierakowski) contra el cráneo K3P5. Clasificado como Positivo con soporte fuerte (verdadero positivo). A) Imagen original; B) SCC con un 30% de opacidad; C) Barrido del cráneo sobre la fotografía; D) Representación del estudio estadístico de tejido blando mediante conos.

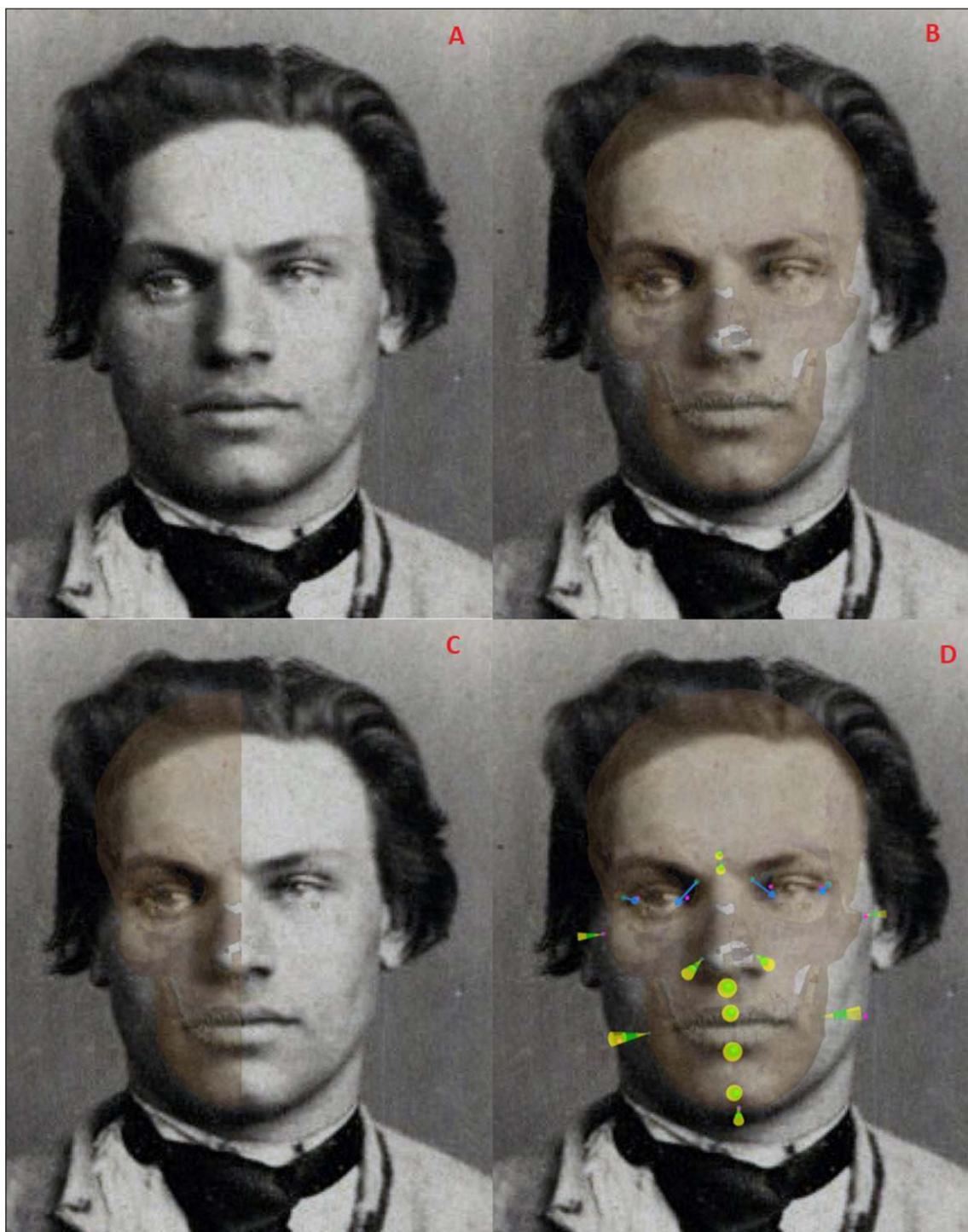


Figura 14. Superposición correspondiente al sujeto AM21 (Konstanty Kalinowski) contra el cráneo K1P1. Clasificado como Positivo con soporte moderado (verdadero positivo). A) Imagen original; B) SCC con un 30% de opacidad; C) Barrido del cráneo sobre la fotografía; D) Representación del tejido blando.

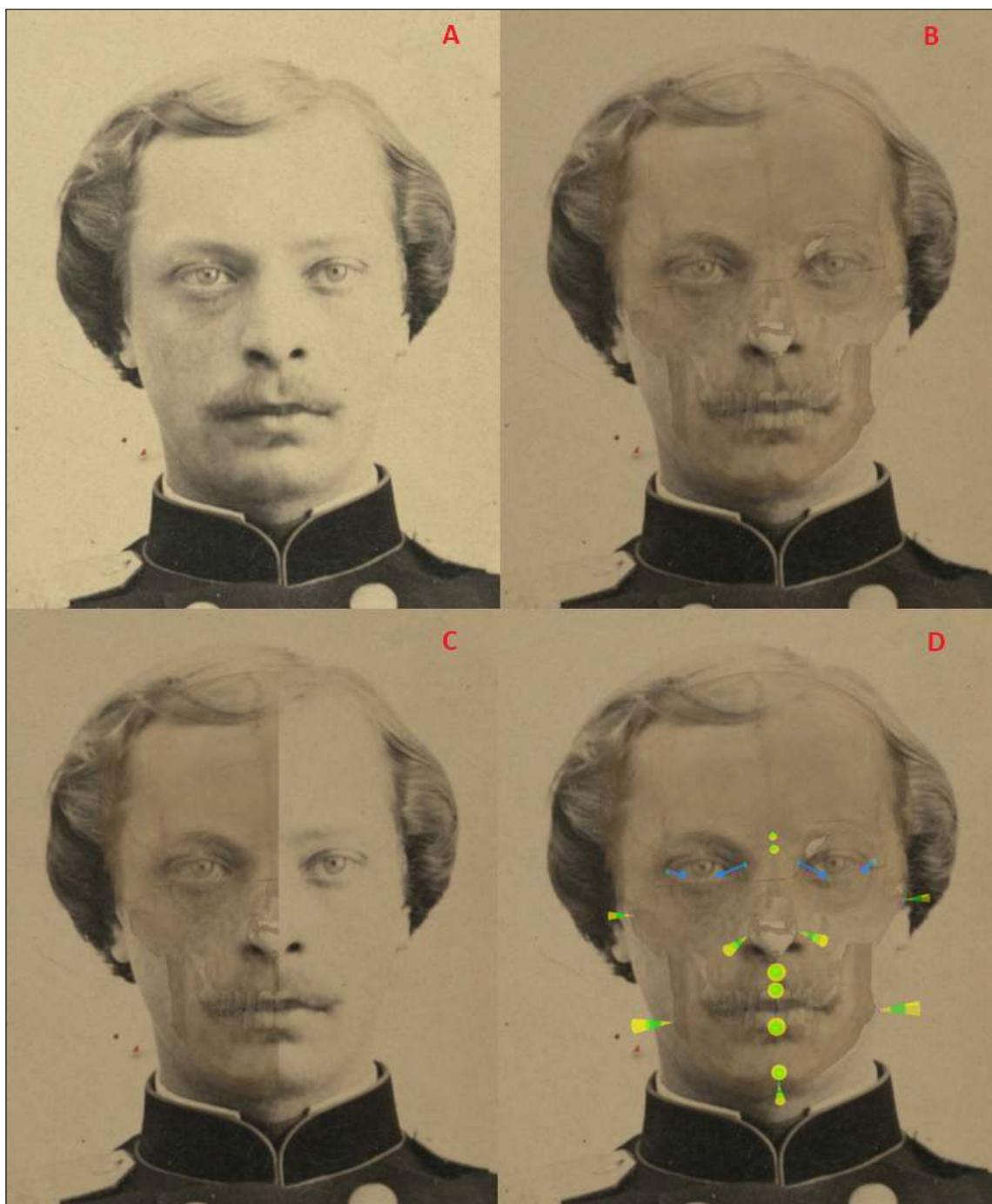


Figura 15. Superposición correspondiente al sujeto AM3 (Albert Laskowski) contra el cráneo K4P7. Clasificado como Positivo con soporte moderado (verdadero positivo). A) Imagen original; B) SCC con un 30% de opacidad; C) Barrido del cráneo sobre la fotografía; D) Representación del tejido blando.

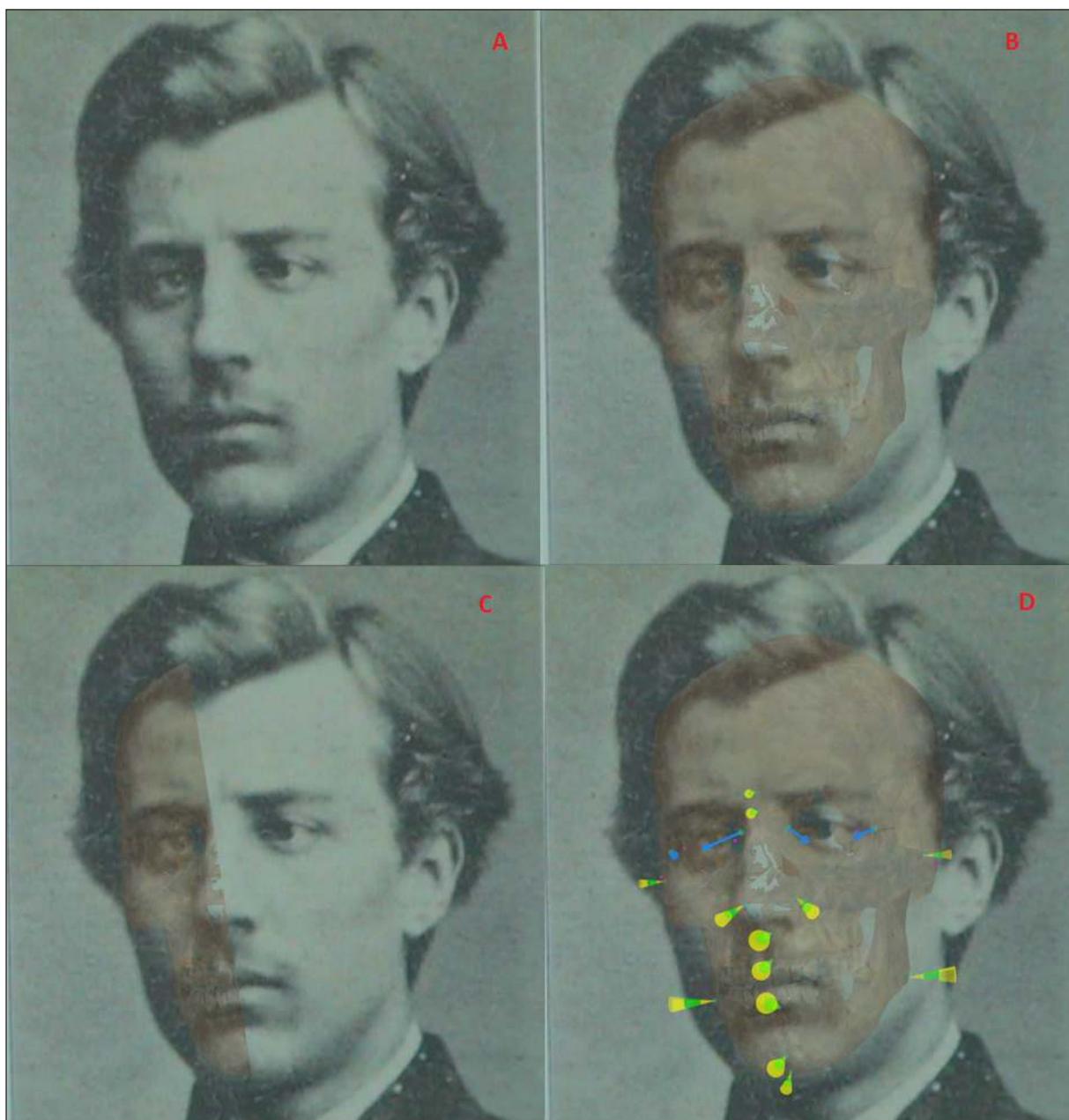


Figura 16. Superposición correspondiente al sujeto AM7 (Julian Lesnewski) contra el cráneo K13P19. Clasificado como Positivo con soporte moderado (verdadero positivo). A) Imagen original; B) SCC con un 30% de opacidad; C) Barrido del cráneo sobre la fotografía; D) Representación del tejido blando.

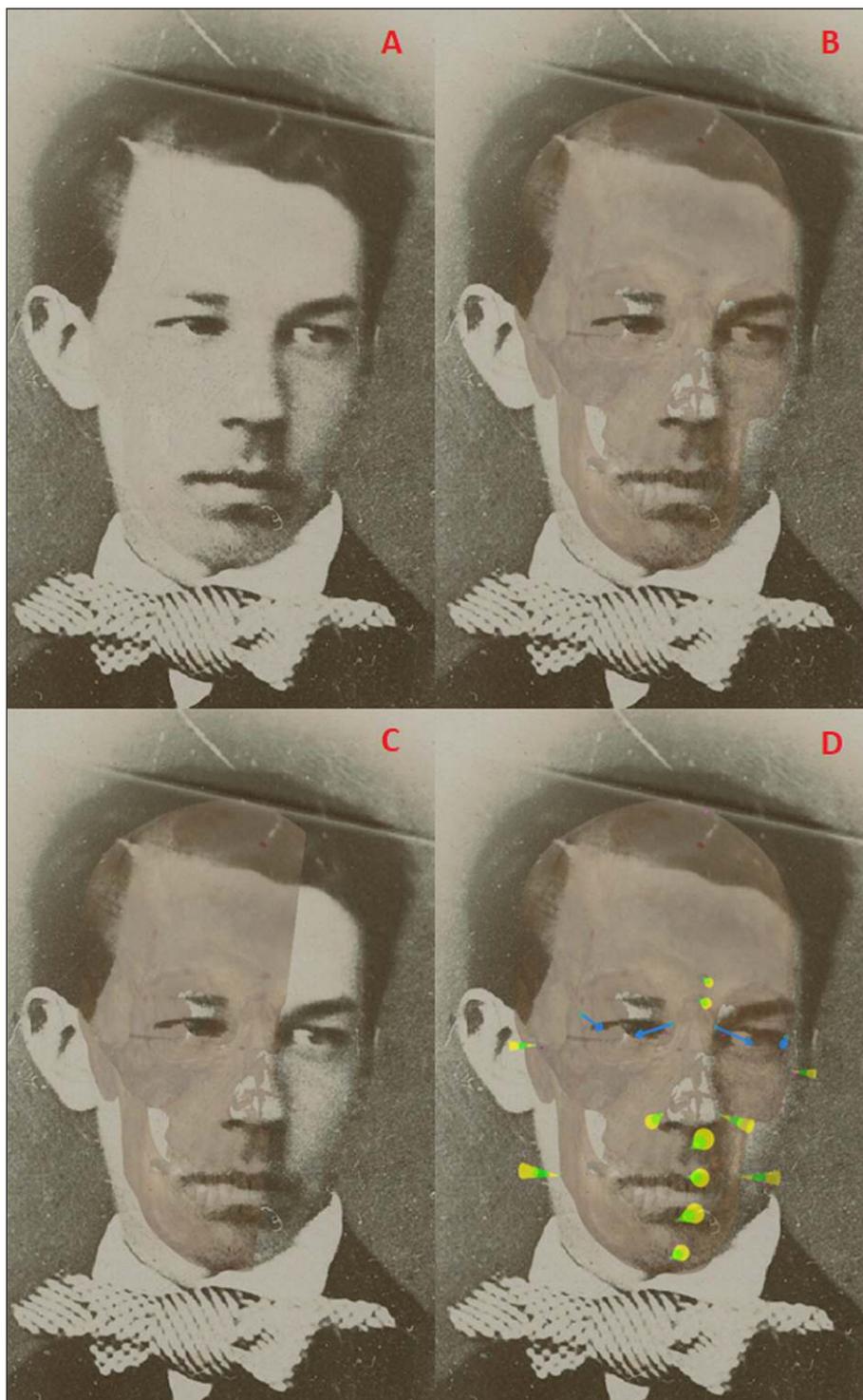


Figura 17. Superposición correspondiente al sujeto AM17 (Ignacy Zdanowicz) contra el cráneo K6P11. Clasificado como Positivo con soporte moderado (verdadero positivo). A) Imagen original; B) SCC con un 30% de opacidad; C) Barrido del cráneo sobre la fotografía; D) Representación del tejido blando.

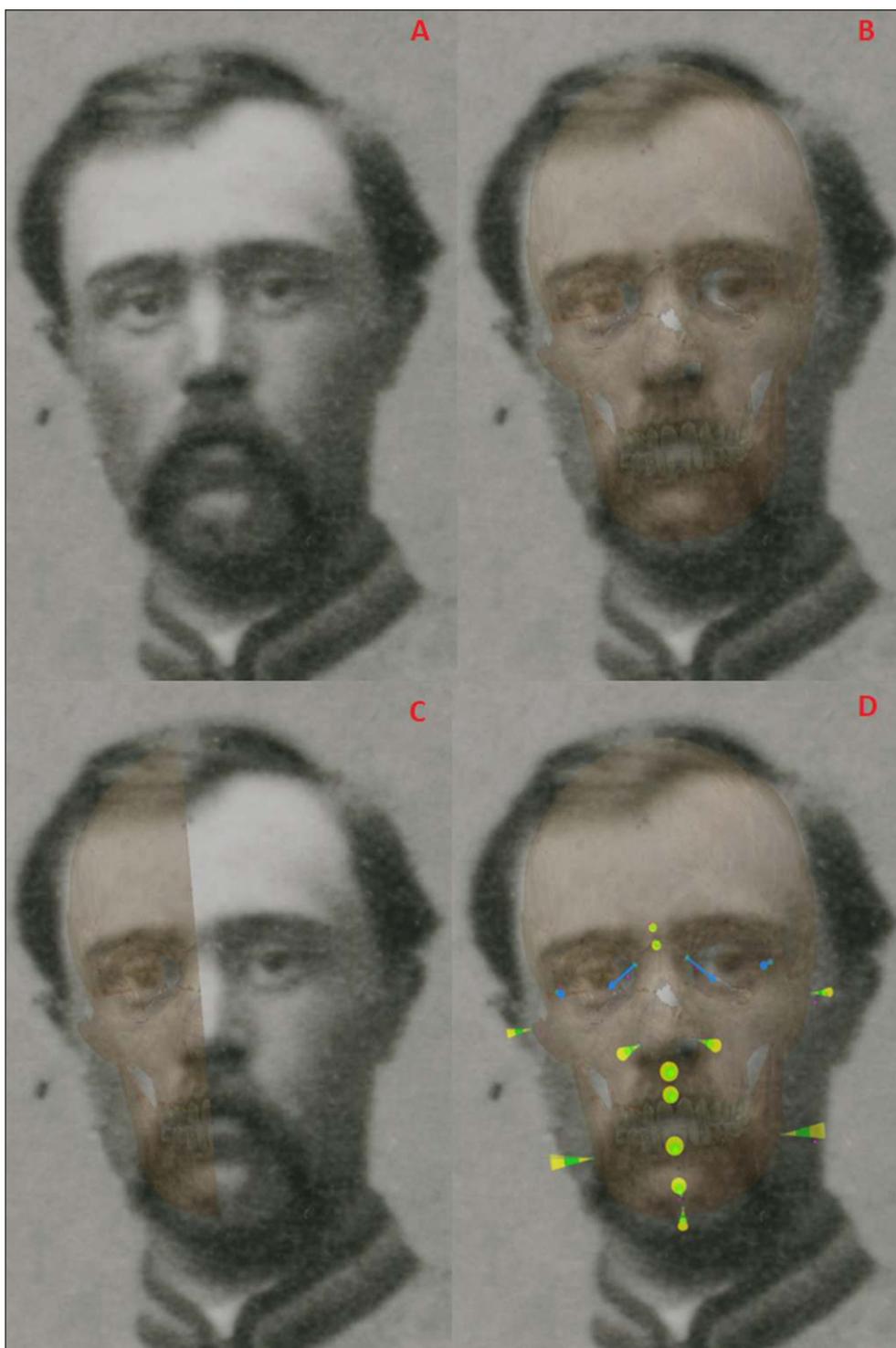


Figura 18. Superposición correspondiente al sujeto AM20 (Jakub Czechan) contra el cráneo K8P13. Clasificado como Positivo con soporte limitado (verdadero positivo). A) Imagen original; B) SCC con un 30% de opacidad; C) Barrido del cráneo sobre la fotografía; D) Representación del tejido blando.

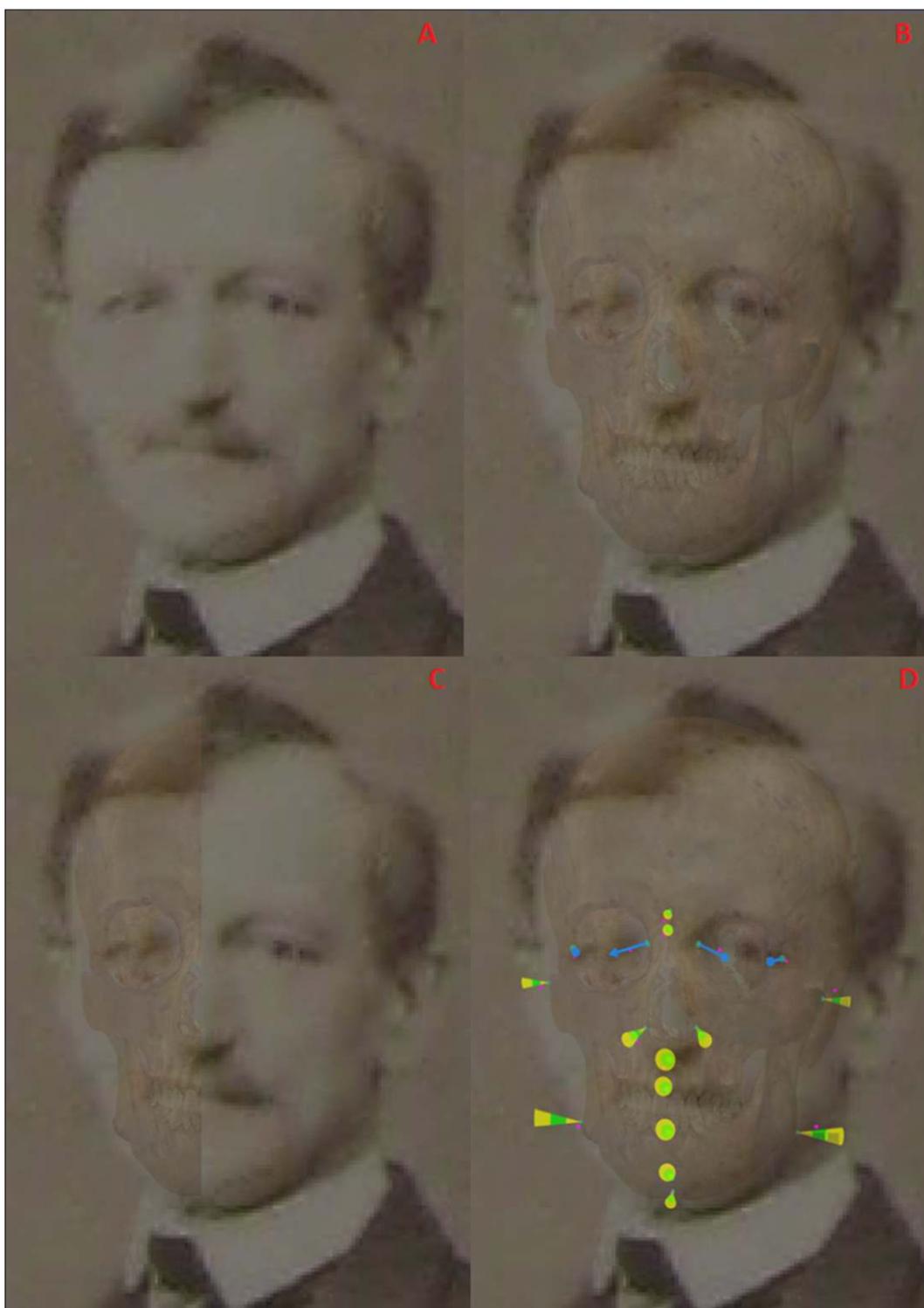


Figura 19. Superposición correspondiente al sujeto AM4 (fotografía correspondiente al hermano de Kolyszko Boleslaw) contra el cráneo K12P18. Clasificado como Positivo con soporte limitado (cráneo positivo). A) Imagen original; B) SCC con un 30% de opacidad; C) Barrido del cráneo sobre la fotografía; D) Representación del tejido blando.

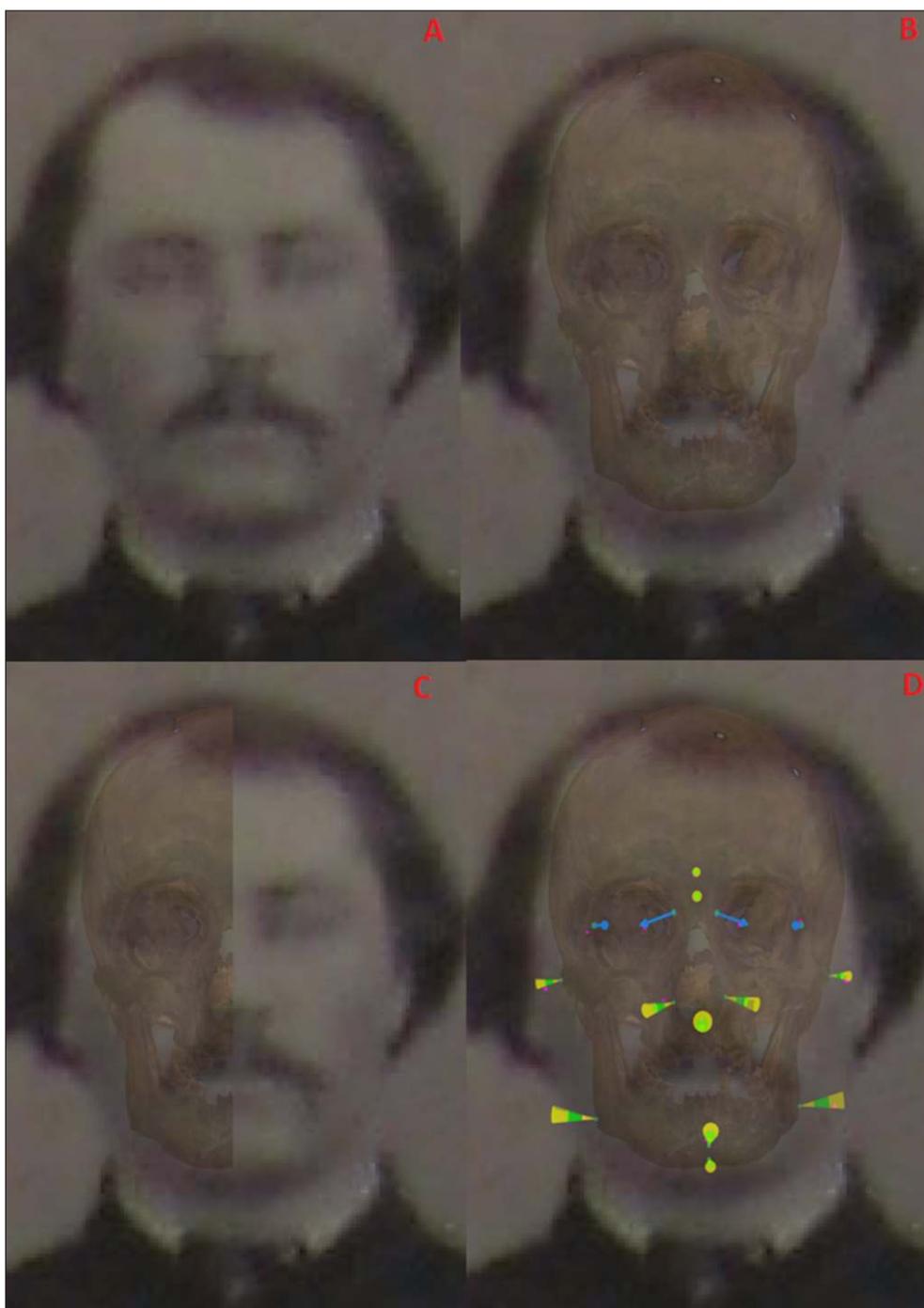


Figura 20. Superposición correspondiente al sujeto AM12 (fotografía errónea de Jan Benkowski) contra el cráneo K2P2. Clasificado como Positivo con soporte limitado (Falso Positivo). A) Imagen original; B) SCC con un 30% de opacidad; C) Barrido del cráneo sobre la fotografía; D) Representación del tejido blando.

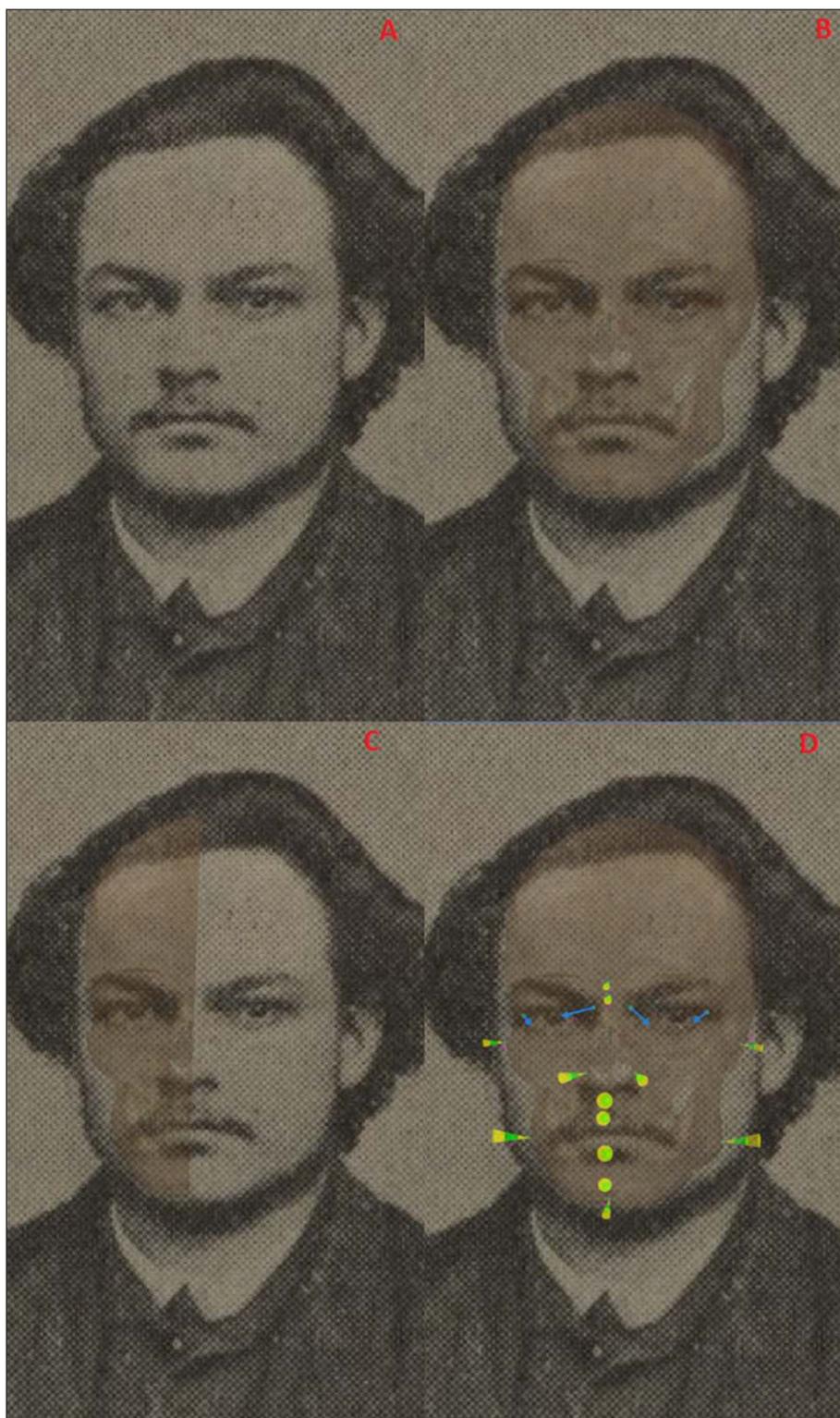


Figura 21. Superposición correspondiente al sujeto AM19 (Tytus Dalewski) contra el cráneo K5P8. Clasificado como Positivo con soporte limitado (Falso Positivo). A) Imagen original; B) SCC con un 30% de opacidad; C) Barrido del cráneo sobre la fotografía; D) Representación del tejido blando..

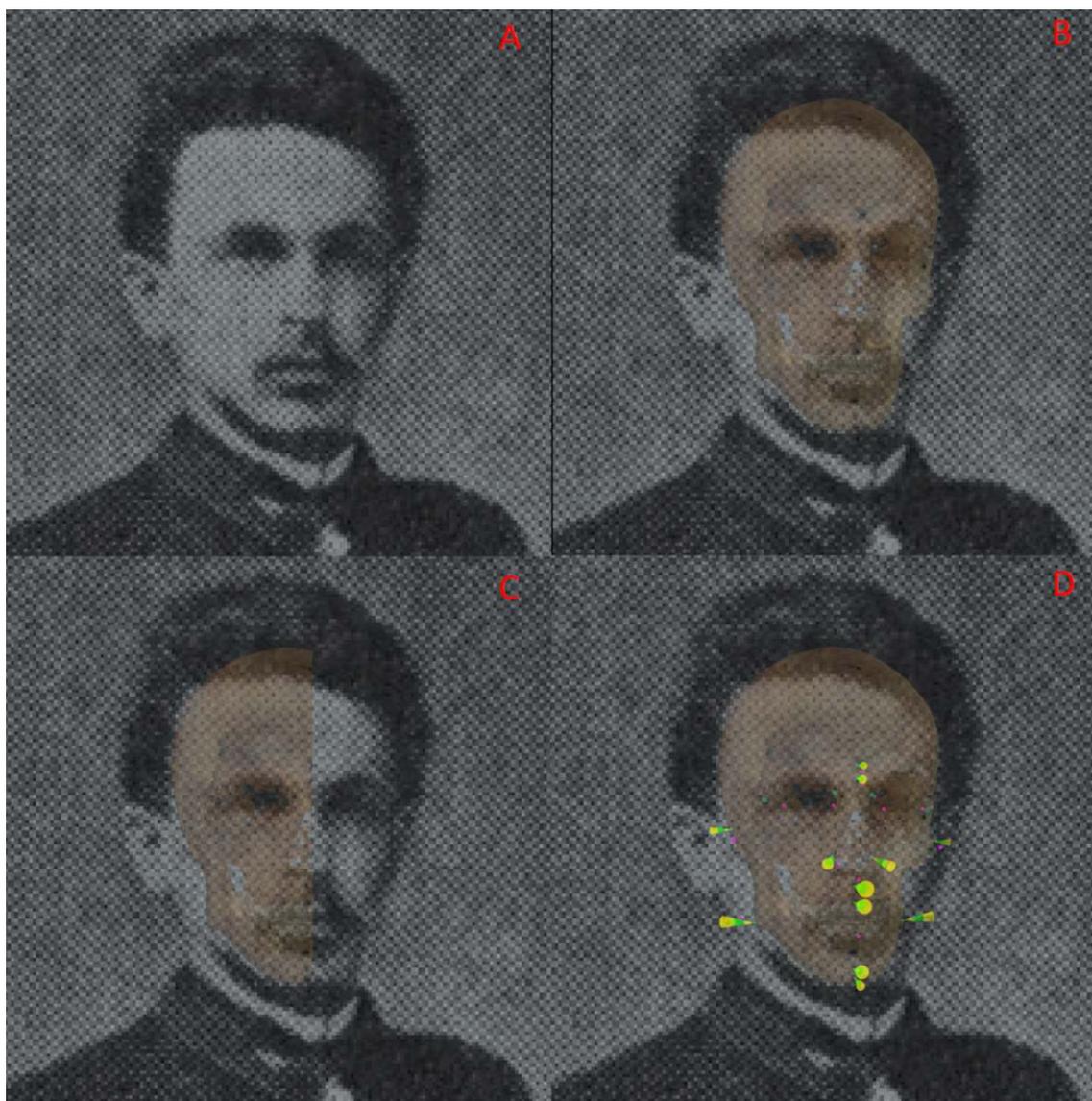


Figura 22. Superposición correspondiente al sujeto AM18 (Mieczyslaw Dormanowski) contra el cráneo K6P10. Clasificado como Indeterminado (verdadero positivo). A) Imagen original; B) SCC con un 30% de opacidad; C) Barrido del cráneo sobre la fotografía; D) Representación del tejido blando.