

Universidad Santo Tomás Facultad de Ciencias económicas

Programa de Estadística

Informe del Estado del Arte Proyecto Osteo-Forense

Autores: Alejandra Benedetti, Alejandro Chavarro, Angela Orjuela y Natalia Zárate

Septiembre de 2025

El presente informe detalla el estado del arte en las áreas de antropología forense, visión por computador e inteligencia artificial, relevantes para el Proyecto Osteo-Forense. Este proyecto busca innovar en la resolución del problema de la desaparición de personas en Colombia, un contexto donde a menudo faltan registros de identificación tradicionales. La iniciativa propone combinar la antropología forense con la visión por computador para estandarizar imágenes, extraer rasgos faciales como puntos de referencia y medidas craneofaciales, y crear representaciones numéricas (*embeddings*) de los rostros, que permitan realizar comparaciones automáticas para fortalecer la identificación de víctimas.

1. La Antropología Forense y la Identificación Humana

La antropología forense es una ciencia moderna que se fundamenta en la antropología física y cuyo objetivo principal es la identificación de restos humanos, ya sea que estén esqueletizados o en mal estado de conservación. Esta disciplina es crucial en escenarios como desastres masivos, conflictos bélicos, desapariciones forzadas e investigaciones criminales, donde la necesidad de instrumentos precisos y eficaces para establecer y verificar la identidad humana es creciente.

El cráneo humano es una parte fundamental del sistema esquelético, encargada de proteger el encéfalo y dar soporte a la cara. Su estudio implica el análisis de huesos, suturas y, de manera crucial, los puntos craneométricos, que son puntos de referencia identificados para estandarizar diferentes medidas y denominar regiones del cráneo. Se pueden realizar una gran cantidad de medidas craneométricas sobre un cráneo, obteniendo un modelo matemático del mismo, utilizando estos puntos de referencia y expresando las medidas en milímetros. La variabilidad morfológica del cráneo, junto con índices que representan la relación entre dos variables, permite una descripción precisa del aspecto general de la cabeza y la cara.

Tradicionalmente, la identificación se realiza mediante métodos como el ADN y las huellas dactilares. Sin embargo, estos presentan limitaciones significativas: el ADN requiere una muestra de comparación que no siempre está disponible y es una técnica costosa y lenta, mientras que la dactiloscopia exige la conservación de los surcos interpapilares del cadáver y un sistema AFIS costoso. En escenarios de desastres masivos, la eficiencia de estas técnicas disminuye drásticamente. La antropología forense ofrece una alternativa con un rango de aplicación más amplio, contribuyendo a la identificación al establecer una

identidad o al limitar las posibles coincidencias con el individuo a través de técnicas como la superposición craneofacial (SCF) y el perfil biológico.

El perfil biológico implica el estudio de restos óseos para determinar rasgos como la estimación de la edad (analizando osificación, desarrollo dental, morfología de costillas y pelvis), el sexo (estudios morfométricos y morfológicos del cráneo y la cadera), la ascendencia (análisis morfológico y métrico del cráneo) y la estatura (medición de huesos largos). La evaluación de este perfil es un procedimiento secuencial, comenzando por la ascendencia, seguida del sexo, la edad y, finalmente, la estatura.

2. Visión por Computador e Inteligencia Artificial en Antropología Forense

La Inteligencia Artificial (*IA*), y en particular los avances en el aprendizaje automático (*Machine Learning*) y la visión por computador (*Computer Vision*) bajo el paraguas del aprendizaje profundo (*Deep Learning*), han transformado el reconocimiento, la restauración y la generación de imágenes en diversas áreas. A pesar de su éxito en la medicina, la antropología forense ha permanecido, en gran medida, como una disciplina manual y tecnológicamente precaria. Sin embargo, la IA ofrece un potencial inmenso para automatizar tareas tediosas, reducir la subjetividad y procesar enormes volúmenes de datos, mejorando la precisión y la rapidez en la identificación forense.

Las técnicas de visión por computador con mayor potencial de aplicación en antropología forense incluyen:

- **Segmentación de Imágenes (SI):** Consiste en dividir una imagen en regiones homogéneas con respecto a características visuales como color, intensidad o textura, asignando una etiqueta a cada píxel. Esto es fundamental para aislar estructuras anatómicas de interés, como huesos en radiografías.
- **Detección, Clasificación y Comprensión de Imágenes:** Permite localizar objetos dentro de una imagen, categorizarlos y describir matemáticamente sus propiedades, incluso tomando decisiones basadas en la interpretación de la imagen. Un ejemplo es la detección automática de *landmarks* cefalométricos en imágenes.
- **Registro de Imágenes (RI):** Busca una transformación geométrica para superponer dos imágenes tomadas en diferentes momentos, puntos de vista o con distintos sensores. En el ámbito forense, esto puede ser entre dos fotos (2D-2D), dos modelos 3D (3D-3D), o un modelo 3D y una imagen 2D (3D-2D), siendo esta última crucial para alinear un cráneo 3D con una fotografía facial 2D. Los algoritmos de optimización se emplean para minimizar el error de solapamiento.

El aprendizaje profundo, especialmente a través de Redes Neuronales Convolucionales (*ConvNets*), es particularmente adecuado para analizar imágenes visuales sin necesidad de preprocesamiento o extracción manual de características. Estos modelos han demostrado

una capacidad excepcional para clasificar patologías y detectar lesiones óseas en imágenes de rayos X. También se utilizan para la estimación de la edad a partir de radiografías de la mano con una precisión notable.

3. Superposición Craneofacial (SCF) Asistida por Computador

La superposición craneofacial es un método de identificación que compara la imagen de un cráneo con una o varias fotografías faciales de un individuo, analizando su correspondencia morfológica para determinar si pertenecen a la misma persona. Esta técnica ha evolucionado significativamente con la incorporación de tecnologías asistidas por computador, volviéndose más conveniente, rápida y fiable. Los *landmarks* anatómicos son elementos clave en este proceso, ya que la identificación se basa en la comparación entre estos puntos de referencia.

El proceso de SCF asistida por computador se divide en tres etapas principales:

3.1. Adquisición y Procesamiento de Materiales

En esta etapa, se obtienen y procesan los datos del cráneo y las fotografías faciales.

- **Modelos 3D del cráneo:** Los escáneres láser y las tomografías computarizadas (TAC) permiten obtener modelos tridimensionales del cráneo con alta precisión. La reconstrucción 3D a partir de TACs es un punto de partida común en el campo biomédico.
- **Localización de landmarks:** Implica el marcado de puntos de referencia cefalométricos en las fotografías y craneométricos en el modelo 3D del cráneo. La visión por computador y las técnicas de aprendizaje profundo son capaces de automatizar la localización de *landmarks* faciales en fotografías con una precisión comparable a la de un experto, incluso en imágenes con condiciones variables. Para *landmarks* craneométricos en modelos 3D, se emplean métodos de registro de imágenes basados en plantillas, logrando errores medios similares a la dispersión inter-experto en el marcado manual.

3.2. Solapamiento Cráneo-Cara (SCC)

Esta etapa busca lograr la mejor superposición posible del cráneo sobre las fotografías faciales.

- El objetivo es replicar la pose del cráneo 3D en relación con la pose de la cara en la fotografía, lo que se logra estimando los parámetros intrínsecos y extrínsecos de la cámara.
- Se utilizan algoritmos evolutivos (AE) y conjuntos difusos para minimizar la distancia entre pares de *landmarks* craneométricos y cefalométricos. Estos

algoritmos también modelan la imprecisión en la localización de los *landmarks* y la incertidumbre en el grosor del tejido blando.

- Algoritmos como POSEST-SFO son capaces de obtener un solapamiento extremadamente rápido, en milisegundos, resolviendo sistemas de ecuaciones polinómicas que relacionan las distancias entre puntos craneales y faciales antes y después de la proyección.

3.3. Evaluación del Solapamiento y Toma de Decisiones

Finalmente, se evalúa la consistencia morfológica entre el cráneo y la cara para determinar el grado de apoyo a la identificación.

- Aunque tradicionalmente subjetivo, se han desarrollado sistemas jerárquicos de apoyo a la decisión (DSS) y algoritmos de visión por computador para automatizar el análisis de la consistencia anatómica en los SCC.
- Los criterios de evaluación incluyen el análisis de asimetrías faciales, la concordancia entre los contornos óseos y faciales, el emparejamiento de *landmarks* considerando el grosor del tejido blando, y la relación posicional de las estructuras. Estos criterios se evalúan visualmente con herramientas de transparencia y "wipe", y mediante la visualización de datos de tejido blando a través de conos que indican rangos de grosor.

3.4. Proyectos y Herramientas Relevantes

- **Proyecto MEPROCS (Nuevas Metodologías y Protocolos de Identificación Forense por Superposición Craneofacial):** Este proyecto europeo ha sido fundamental para establecer un estándar común, definir buenas prácticas y documentar las fuentes de error e incertidumbre en la aplicación de la SCF.
- **Software Skeleton-ID:** Desarrollado por Panacea Cooperative Research en colaboración con la Universidad de Granada, Skeleton-ID es la primera herramienta que cumple con todos los requisitos y funcionalidades deseables del estándar MEPROCS para la SCF asistida por computador. Incorpora algoritmos de IA para la localización automática de *landmarks* cefalométricos y craneométricos, y el algoritmo POSEST-SFO para el SCC. Este software ha demostrado su eficacia en estudios ciegos, logrando una alta tasa de decisiones correctas y un ahorro significativo de tiempo, incluso para antropólogos inexpertos. Skeleton-ID también está en continuo desarrollo para incorporar algoritmos de IA que apoyen la estimación del perfil biológico y la radiología comparativa.

4. Desafíos y Futuras Oportunidades para el Proyecto Osteo-Forense

La aplicación de técnicas de IA en la antropología forense, como las propuestas por el Proyecto Osteo-Forense, enfrenta desafíos importantes, pero también presenta grandes oportunidades. La necesidad de métodos automáticos, objetivos y más precisos es un desafío clave para la identificación humana. En la actualidad, muchas tareas manuales son tediosas, requieren mucho tiempo y son propensas a errores, como la localización de *landmarks* o el proceso de SCC.

Una limitación significativa es la calidad y cantidad de datos disponibles. Las fotografías antiguas, por ejemplo, carecen de metadatos (como el modelo de cámara o la distancia focal), tienen baja calidad o presentan oclusiones, lo que complica la aplicación de la SCF. La falta de conjuntos de datos públicos amplios y abiertos para fines de investigación en AF es una barrera importante para el desarrollo y la validación de técnicas de IA, que requieren grandes volúmenes de datos diversos para entrenar modelos robustos.

A pesar de estos desafíos, la visión es que las máquinas no reemplacen a los humanos, sino que los complementen, ayuden y asistan en tareas que los expertos no desean o necesitan realizar más rápidamente. La IA puede automatizar tareas, integrar y estructurar información, y reducir el tiempo necesario para las identificaciones forenses, permitiendo abordar un mayor número de casos y realizar comparaciones múltiples.

El Proyecto Osteo-Forense, al combinar la antropología forense y la visión por computador para estandarizar imágenes, extraer rasgos faciales y crear *embeddings* para comparaciones automáticas, se alinea directamente con la vanguardia de la investigación en IA aplicada a la identificación humana. El uso de *embeddings* es un claro ejemplo de la aplicación del aprendizaje profundo para crear representaciones numéricas de rostros, permitiendo comparaciones eficientes y robustas en grandes bases de datos.

Bibliografía

1. Antropología Forense. (s.f.). *Identidad e Identificación Antropológica Forense: El cráneo humano*.
2. Bajnoczky, I., & Kiralyfalvi, L. (1995). A new approach to computer-aided comparison of skull and photograph. *Int. J. Leg. Med.*, 108(3), 157-161.
3. Ballerini, L., Cordon, Ó., Damas, S., Santamaría, J., Aleman, I., & Botella, M. (2009). Craniofacial Superimposition in Forensic Identification using Genetic Algorithms. In *Information Assurance and Security, 2007. IAS 2007. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)*, pp. 429-434.
4. Ibáñez, O. (2010). *Forensic Identification by craniofacial superimposition using Soft Computing*. Tesis doctoral. Universidad de Santiago de Compostela.
5. Ibáñez, O., Alemán, I., Bermejo, E., Corbal, I., Cordon, O., Damas, S., Gómez, G., Gómez, I., Gómez, O., González, A., Macías, M., Martos, R., Mesejo, M., Panizo,

- M., Prada, K., & Valsecchi, A. (2020). El proyecto Skeleton-ID: hacia una identificación humana más rápida, objetiva y precisa. *Revista Internacional de Antropología y Odontología Forense*, 3(2).
6. Ibáñez, O., Ballerini, L., Cordón, O., Damas, S., & Santamaria, J. (2009). An experimental study on the applicability of evolutionary algorithms to craniofacial superimposition in forensic identification. *Information Sciences*, 179(23), 3998-4028.
 7. Ibáñez, O., Cordón, O., Damas, S., & Santamaria, J. (2008). Craniofacial Superimposition Based on Genetic Algorithms and Fuzzy Location of Cephalometric Landmarks. In *Hybrid Artificial Intelligence Systems. HAIS 2008. Lecture Notes in Computer Science*. Heidelberg: Springer.
 8. Ibáñez, O., Martos, R., & Mesejo, P. (2020). Inteligencia artificial en antropología forense: estado del arte, retos y oportunidades. *Revista Internacional de Antropología y Odontología Forense*, 3(2).
 9. Martos, R., Ibáñez, O., Valsecchi, A., Bermejo, E., Navarro, F., Kisielius, G., & Jankauskas, R. (2020). Identificación de los líderes rebeldes ejecutados durante el levantamiento polaco-lituano contra el Imperio Ruso de 1863-64 mediante superposición craneofacial usando Skeleton-ID. *Revista Internacional de Antropología y Odontología Forense*, 3(2).
 10. Navarro Merino, F. J. (2011). *Superposición Craneofacial para Identificación Humana. Un Estudio en Población Mediterránea*. Tesis doctoral. Universidad de Granada.
 11. Santamaría, J., Cordón, O., Damas, S., Aleman, I., & Botella, M. (2007). A scatter search-based technique for pair-wise 3D range image registration in forensic anthropology. *Soft Comput.*, 11(9), 819-828.
 12. Santamaría, J., Cordón, O., Damas, S., & Ibáñez, O. (2009). 3D-2D Image Registration for Craniofacial Superimposition in Forensic Medicine Using Covariance Matrix Adaptation Evolution Strategy. In *9th International Conference on Information Technology and Applications in Biomedicine*, pp. 1-4.
 13. Srisinghasongkram, J., Arunorat, J., Singsuwan, P., & Mahakkanukrauh, P. (2022). Development of craniofacial superimposition: A review. *Int. J. Morphol.*, 40(6), 1552-1559.
 14. Yoshino, M., Iamizumi, K., Miyasaka, S., & Sueshige, S. (1995). Evaluation of anatomical consistency in cranio-facial superimposition images. *Forensic Sci. Int.*, 74(1-2), 125-134.