



UNIVERSITAT ROVIRA i VIRGILI

Trabajo final de máster

***Tatuajes en cadáveres: herramienta de identificación en
genética forense***

Máster en genética, física y química forense

Facultad de química

Alumna: Marta Armijo Cabedo

Tutora: Esther Rodríguez Gallego

Convocatoria: Junio 2025

Índice

1. Resumen	4
2. Contextualización	5
2.1. Prevalencia de los tatuajes en la sociedad	5
2.2. Relevancia de los tatuajes en el contexto forense actual	5
2.3. Objetivo y alcance del trabajo.	7
3. Fundamentos químicos y biológicos de los tatuajes	8
3.1. Composición química de las tintas de tatuaje	8
3.2. Biología del tatuaje: respuesta inmunológica y localización del pigmento.	10
4. Utilidad forense de los tatuajes en cadáveres	12
4.1. Conservación y recuperación de tatuajes en cadáveres deteriorados	13
4.2. Métodos de documentación y comparación de tatuajes	14
4.3. Limitaciones interpretativas de los tatuajes	14
4.4. Software de identificación asistida.	15
4.4.1. Uso de inteligencia artificial para la clasificación de tatuajes	16
5. Importancia de los pigmentos del tatuaje en el análisis genético forense	19
5.1. La reacción en cadena polimerasa (PCR)	19
5.2. Efectos de los pigmentos de tatuaje sobre la extracción y amplificación del ADN	20
5.2.1. Interacción con el ADN	20
5.2.2. Competencia con el magnesio y efectos en la actividad enzimática	22
5.2.3. Efectos sobre la extracción y cuantificación del ADN	23
5.3. Alternativas y soluciones propuestas en genética forense	24
6. Conclusiones	25
7. Bibliografía	27

1. Resumen

Los tatuajes representan un elemento de creciente relevancia en el ámbito forense, sobre todo en una sociedad donde su presencia es cada vez más común. Se trata de una herramienta auxiliar de gran utilidad en la identificación de cadáveres, especialmente en contextos donde no se pueden llevar a cabo los métodos tradicionales (comparación de huellas dactilares, registros dentales etc.). Se caracterizan por ser permanentes, simbólicos y, en algunas ocasiones, únicos, por lo que permiten establecer asociaciones con individuos o actos delictivos.

Sin embargo, los tatuajes plantean algunos retos técnicos en el análisis genético llevado a cabo durante el protocolo de identificación. Las tintas utilizadas para realizar estos diseños pueden estar formadas por pigmentos inorgánicos ricos en metales pesados. Estos metales pueden comprometer la integridad del ADN de una muestra o incluso interferir en métodos de gran relevancia como la reacción en cadena polimerasa (PCR), dificultando la obtención de perfiles genéticos fiables.

Además, los procesos de deterioro *post mortem* que sufren los cuerpos afectan a la visibilidad de los tatuajes distorsionándolos o, incluso, haciendo que desaparezcan con el paso del tiempo. Con tal de solventar este problema, se han desarrollado protocolos de rehidratación tisular, así como métodos de documentación empleando fotografía infrarroja que han permitido la recuperación de los tatuajes en cadáveres deteriorados.

Por otro lado, el desarrollo de bases de datos estructuradas es fundamental para la estandarización del uso de los tatuajes como característica biométrica en investigaciones forenses. En este proceso ha sido fundamental el uso de la inteligencia artificial, especialmente de las redes neuronales convencionales, capaces de detectar, segmentar y comparar tatuajes.

Por todo esto, los tatuajes representan una fuente de información forense de gran utilidad en investigaciones policiales. Sin embargo, su aplicación todavía debe superar algunas limitaciones técnicas, éticas y legales.

2. Contextualización

2.1. Prevalencia de los tatuajes en la sociedad

Desde un punto de vista histórico, el arte del tatuaje siempre ha estado ligado con civilizaciones como la egipcia, la nativa americana o la polinesia. Las evidencias más antiguas halladas hasta la fecha, como los restos momificados de Ötzi, un cazador de hace unos 5300 años, confirman que el ser humano lleva tatuándose desde tiempos remotos (Torres, 2007). En estas culturas antiguas, los tatuajes adquirirían un significado religioso tomándose como una expresión de identidad, historia e, incluso, estatus social.

Con el desarrollo del lenguaje y el comportamiento, los tatuajes se extendieron por nuevos territorios adquiriendo distintos significados. Por ejemplo, en los años 60 y 70, esta práctica se popularizó como símbolo de rebeldía (Pierrat, Guillon, Joly, & Lesven, 2000). Posteriormente, con la profesionalización del tatuaje, aparecieron estudios especializados que consolidaron el uso de los tatuajes como forma de expresión dando lugar al inicio de su masificación (Visión, 2002).

Hoy en día, los tatuajes siguen utilizándose como marca de identidad, aunque también son una forma de expresar ideas o emociones, consolidándose como un marcador distintivo y dejando una huella imborrable en el cuerpo humano (Manca, 2011). Esta transformación ha ido de la mano de la creciente aceptación del tatuaje. Estudios recientes muestran que aproximadamente el 10% de la población adulta en poblaciones desarrolladas tiene, al menos, un tatuaje. Dicho porcentaje es todavía mayor entre los jóvenes (Birngruber et al., 2020; Bäumlner, 2016; Breuner and Levine, 2017; Tighe *et al.*, 2017).

2.2. Relevancia de los tatuajes en el contexto forense actual

Debido al aumento global de la población tatuada en las últimas décadas, los tatuajes han adquirido una gran relevancia en el estudio forense de cuerpos sin identificar. Especialmente en aquellos casos en los que los métodos tradicionales de identificación, tales como el uso de huellas dactilares o el análisis de DNA, no pueden

aplicarse debido a las condiciones en las que se encuentra el cuerpo (Birngruber *et al.*, 2020).

Más allá de su fácil reconocimiento por parte de familiares y conocidos, en algunos casos, los tatuajes también pueden ofrecer información relevante sobre la identidad física, social y cultural del individuo. De tal forma, el estudio de los tatuajes presentes en un cuerpo permite conocer si pertenece a un grupo determinado (como por ejemplo grupos supremacistas o incluso grupos criminales organizados), su historial carcelario e incluso la presencia de enfermedades lo cual puede ser de gran utilidad para su identificación (Ibrahim *et al.*, 2024).

Históricamente, los tatuajes han tenido un papel importante en la descripción de los grupos criminales organizados. El tatuaje y sus características físicas, como el diseño general, la ubicación y el número, pueden indicar el rango y la jerarquía dentro de un determinado marco grupal, así como detalles como el estatus dentro de su estructura organizativa, como el número de muertes, los crímenes cometidos etc. En cuanto al sistema penal, el simbolismo de un tatuaje basado en el diseño, color y ubicación puede ser el único identificador que defina a un individuo. Estas características permiten conocer algunos detalles sobre su historial delictivo como por ejemplo el tiempo que ha servido, su estatus social dentro y fuera del sistema o su afiliación a una banda (Miranda, 2020).

Hasta hace relativamente poco tiempo, no existían bases de datos que permitieran una clasificación de los tatuajes con fines forenses. Por ello, se utilizaba un sistema tradicional de clasificación en función de si se trataban de: nombres o palabras, figuras, objetos, animales, símbolos religiosos, símbolos ideológicos y figuras abstractas (Öztürk *et al.*, 2025). Además, se documentaban de forma manual empleando descripciones escritas y fotografías en papel. Más adelante, el Instituto Nacional de Estándares y Tecnología (NIST) estableció un sistema de clasificación más sofisticado para la descripción de tatuajes con el objetivo de aumentar su utilidad en la identificación humana con fines forenses. Este sistema, además de incorporar una codificación más precisa y mejor estructurada, también estandarizaba las bases de datos con el fin de facilitar la búsqueda y aumentar la eficiencia de la comparación.

Gracias a esto, la INTERPOL pudo desarrollar su sistema de gestión de víctimas de desastres *PlassData DVI*. Este sistema es capaz de recopilar y comparar datos ante mortem y post mortem como por ejemplo: imágenes, descripciones físicas, objetos personales etc. Entre esta información se encuentran los tatuajes, los cuales se clasifican siguiendo criterios internacionalmente aceptados, como los propuestos por el NIST (Ibrahim et al., 2024).

Sin embargo, el desarrollo de estas bases de datos está lejos de finalizarse. De forma regular, el NIST lanza iniciativas cuyo objetivo es la evaluación de los sistemas automáticos de reconocimiento de tatuajes midiendo la precisión con la que los diferentes algoritmos son capaces de identificar tatuajes en contextos forenses (Ngan et al., 2018).

2.3. Objetivo y alcance del trabajo

En una sociedad donde los tatuajes son cada vez más frecuentes y están presentes en un elevado porcentaje de la población, su análisis durante la identificación de restos humanos se presenta como un indicador biométrico complementario de creciente relevancia en el ámbito forense.

Este trabajo no solo pretende evaluar el potencial de los tatuajes como herramienta de identificación cadavérica, sino también estudiar los retos que plantea su análisis a nivel técnico. En particular, se analiza cómo la composición química de las tintas – frecuentemente ricas en metales pesados – puede interferir en técnicas de biología molecular, como la inhibición de la PCR, comprometiendo la recuperación y análisis del ADN en tejidos tatuados.

3. Fundamentos químicos y biológicos de los tatuajes

3.1. Composición química de las tintas de tatuaje

El análisis de los componentes químicos presentes en la tinta de los tatuajes es fundamental para entender su comportamiento en el cuerpo humano y las implicaciones que tienen en el contexto forense actual. Pese a lo que puede parecer a simple vista, la composición de estas tintas no está regulada a nivel mundial lo que se traduce en una gran variabilidad en su formulación (Kiszla *et al.*, 2023). Es por ello, que cada tinta se comporta de forma diferente en el periodo *post mortem* y tienen un potencial inhibidor característico en los análisis genéticos.

Numerosos estudios han analizado la composición química de las tintas utilizadas para realizar los tatuajes modernos. Desde una perspectiva forense, estos análisis son fundamentales ya que los restos de tinta hallados en el escenario del crimen pueden ser cotejados con perfiles químicos previamente establecidos. La comparación con estándares de referencia permite determinar la procedencia de la tinta, vincularla a una marca comercial o, en los casos más específicos, incluso asociarla a un estudio de tatuaje en concreto. En las investigaciones policiales, esta información permite establecer conexiones entre víctimas y sospechosos que pueden ser claves para su resolución (Miranda, 2012; Miranda, 2020).

Generalmente, las tintas utilizadas para realizar tatuajes son de mezclas complejas formadas fundamentalmente por tres componentes: pigmentos, vehículos o disolventes y aditivos. Los pigmentos suelen ser compuestos insolubles que necesitan de un vehículo para poder ser inyectado desde la aguja hasta la piel. De hecho, este vehículo está formulado para mejorar el transporte del pigmento desde la aguja hasta la dermis y, posteriormente, ser absorbido por el tejido (Miranda, 2015a). Entre los vehículos más utilizados se encuentran el etanol, el polietilenglicol (PEG) y la glicerina. Estos compuestos permiten mantener el pigmento en suspensión, mejorando la penetración cutánea y reduciendo la formación de burbujas o coágulos durante el proceso de tatuado.

Por otra parte, los aditivos realizan funciones específicas según su formulación. Algunos de ellos son agentes humectantes, como el propilenglicol, que evitan la evaporación excesiva del vehículo. Los conservantes evitan el crecimiento bacteriano evitando infecciones durante el proceso de curación del tatuaje. Los estabilizantes y espesantes regulan la homogeneidad y viscosidad de la tinta; mientras que los reguladores de pH se encargan de mantener la mezcla en un rango de pH compatible con la piel humana. (Miranda, 2012). Los principales componentes de las tintas de los tatuajes aparecen representados en la Figura 1.

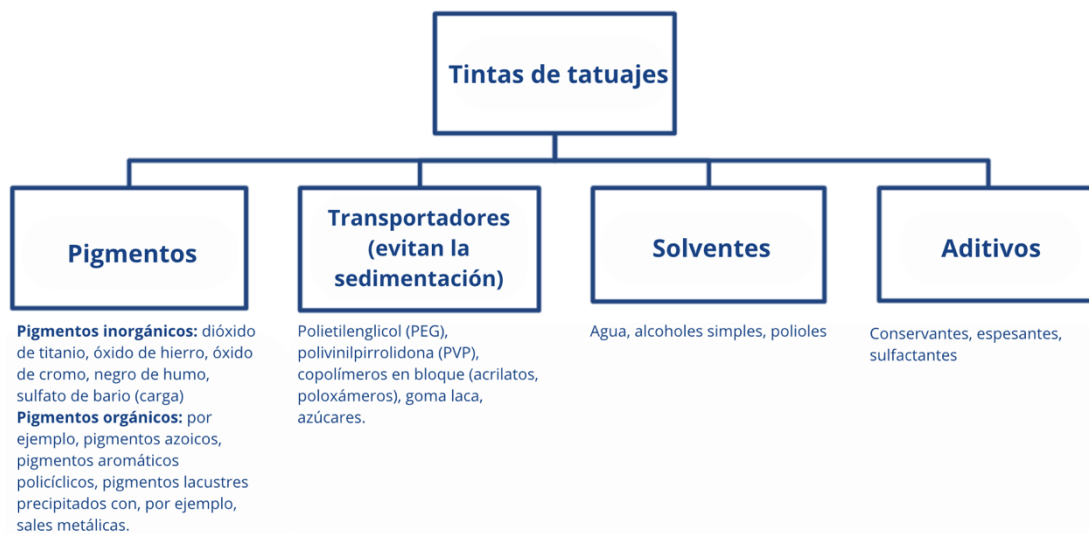


Figura 1. Principales componentes de las tintas de los tatuajes (imagen adaptada de Giulbudagian *et al.*, 2020).

En cuanto al pigmento, el componente principal de la tinta, puede ser negro con base de carbono, coloreado natural y coloreado sintético. Dentro de este último grupo, se pueden dividir en aquellos con una base química orgánica o inorgánica (Miranda, 2015a). Aunque en los inicios del tatuaje se empleaban pigmentos naturales, cada vez es más común que los artistas empleen pigmentos sintéticos. Los compuestos orgánicos son de base policíclica que contienen grupos funcionales cromóforos, capaz de causar la coloración de una sustancia mediante la absorción de energía. Serán estos grupos funcionales, junto a los formadores de sales, los encargados de dotar a un pigmento con su colorimetría y propiedades fisicoquímicas características. A su vez, los cromóforos se pueden clasificar en cromógenos, grupos funcionales que

generan color, y auxocromos, grupos funcionales que intensifican el color (Shindy, 2016; Miranda, 2020).

Los pigmentos presentes en las tintas actuales suelen ser orgánicos entre los que se suelen utilizar: compuestos azoicos, oxazinas, ftalocianinas, quinacridonas, aminas policíclicas y arilidas. Aunque, en algunos casos también se emplean pigmentos inorgánicos que, en función del metal pesado que contengan dará lugar a una coloración diferente (Miranda, 2020; Poon, Dadour y McKinley, 2008). El negro está formado por óxido de hierro o materiales de carbono. El azul, por ftalocianina de cobre o cobalto y silicato de cobre. El amarillo contiene cadmio, el blanco tiene dióxido de titanio mientras que el rojo tiene sulfuro de mercurio, selenio, óxidos de hierro o azo compuestos (Domínguez, s.f.). El TiO_2 es un pigmento blanco que suele mezclarse con los colorantes para crear una paleta de tonos más variados. En función de su estructura cristalina, el dióxido de titanio tiene una toxicidad característica siendo la estructura más dañina la de anatasa fotocatalíticamente activa. En este caso, su estructura tetragonal le permite absorber la luz UV con mayor facilidad dando lugar a la formación de especies reactivas del oxígeno (ROS) capaces de dañar estructuras biológicas (Schreiver *et al.*, 2017).

Al tratarse de una mezcla química compleja, es posible que las tintas contengan impurezas en su composición. Entre ellas se encuentran los metales pesados tales como cromo, cobalto, plomo, antimonio, arsénico, berilio, así como níquel y mercurio los cuales están considerados por la Agencia Internacional para la Investigación sobre el Cáncer (IARC) como compuestos cancerígenos o potencialmente cancerígenos (Charuta *et al.*, 2023).

3.2. Biología del tatuaje: respuesta inmunológica y localización del pigmento.

Tal y como se ha expuesto en el apartado anterior, los metales pesados presentes en las tintas de tatuajes suelen encontrarse en forma de óxidos dentro de su formulación. No obstante, una vez entran en el organismo, son susceptibles a sufrir procesos de degradación que conducen a la liberación de iones metálicos. Entender

cómo ocurre esta descomposición y sus posibles consecuencias sobre las células humanas es de vital importancia en el ámbito forense.

La piel humana puede dividirse en varias capas desde un punto de vista biológico: la epidermis (la capa más externa y fina), la dermis (la capa más interna y de mayor grosor) y la hipodermis. Una vez inyectado el pigmento, este queda retenido en la dermis a una distancia suficiente para que la radiación de la luz visible pueda penetrar la capa epidérmica y reflejarse siendo así percibido para el ojo humano. Sin embargo, la profundidad a la que se deposita debe ser suficiente como para que el pigmento permanezca en la dermis durante un tiempo prolongado y no se desprenda como resultado del recambio continuo que sufren las células epidérmicas (Miranda, 2015a; Miranda, 2020).

Una vez localizados en la zona dérmica, las partículas pigmentarias se encapsulan en lisosomas secundarios (Domínguez *et al.*, 2008) los cuales serán captados por macrófagos dérmicos y podrán ser transportados hasta los ganglios linfáticos de drenaje (Sperry 1991; Miranda 2020; Schreiver *et al.*, 2017).

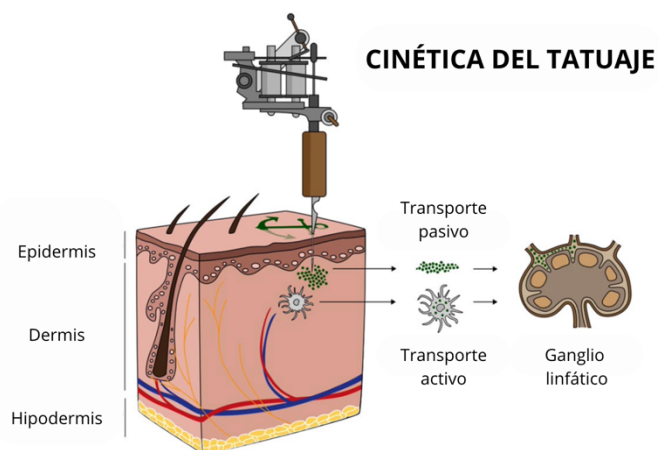


Figura 2. Esquema general de la cinética de la tinta del tatuaje (imagen modificada de Schreiver *et al.*, 2017)

Aunque los mecanismos de absorción, distribución, metabolismo y excreción de los ingredientes de las tintas de tatuaje son materia de estudio, algunos artículos muestran la posibilidad de que haya un transporte sistémico de los mismos pudiendo llegar a afectar a órganos de vital importancia como el hígado, el bazo y el riñón. Esto

se entiende por el hecho de que la tinta para tatuar está formada por nanopartículas de entre 60-800nm (Høgsberg *et al.*, 2011). La filtración glomerular llevada a cabo por los riñones es incapaz de eliminar partículas con un tamaño superior a 10 nm. De tal forma, estas no podrán ser excretadas por la orina y entrarán en el torrente sanguíneo por donde viajarán hasta el hígado para ser detoxificadas (Sepehri *et al.*, 2017).

Supuestamente, las partículas con un tamaño superior quedan retenidas en la dermis. Sin embargo, la piel está continuamente expuesta a la luz solar la cual induce un proceso de descomposición de las moléculas del pigmento del tatuaje dando lugar a la liberación de iones metálicos. Esta descomposición se ve aumentada como consecuencia de los mecanismos de acción enzimática y la activación continua de los macrófagos dérmicos. Esto supone que el transporte de los componentes de las tintas puede producirse vía sistémica incluso años después de realizarse el tatuaje (Bäumler, 2015).

4. Utilidad forense de los tatuajes en cadáveres

En el ámbito forense, los tatuajes representan una herramienta muy valiosa para la identificación de restos, especialmente en cadáveres sin documentación, en estado muy avanzado de deterioro o en catástrofes masivas. Con tal de explotar su valor identificativo, es necesaria su correcta documentación mediante técnicas de fotografía estandarizada, análisis y comparación en bases de datos. Además, el desarrollo de software de reconocimiento asistido por inteligencia artificial ha introducido una mejora significativa de la capacidad de recuperación y comparación de imágenes tatuadas, permitiendo incluso la identificación parcial en imágenes de baja calidad. No obstante, la interpretación de los tatuajes puede verse limitada por factores como la subjetividad del observador, la ambigüedad cultural del simbolismo y la posibilidad de modificaciones voluntarias (como *cover-ups*), lo que implica un análisis cuidadoso y contextualizado.

4.1. Conservación y recuperación de tatuajes en cadáveres deteriorados

Tras el fallecimiento de un ser humano, el cuerpo sufre una serie de cambios tanto físicos, químicos como biológicos que afectan, entre otros tejidos, a la piel. Tal y como se ha expuesto en este trabajo, la piel es el principal soporte de los tatuajes, ya que es donde se queda retenida la mayor parte de tinta. Es por ello por lo que procesos como la descomposición, la deshidratación o la momificación pueden dificultar de forma significativa el estudio de los tatuajes en restos humanos.

En base a esta información, algunos estudios, como el de Probert *et al.* (2021), han estudiado el impacto que tiene la descomposición en las características de los tatuajes. Determinaron que el tatuaje sufre el mayor cambio en tamaño durante la fase enfisematosa del proceso de descomposición, también conocida como fase de hinchazón temprana. En esta etapa, las bacterias anaerobias presentes en el organismo comienzan a generar gases que provocan un aumento notable del tamaño corporal. En esta fase, los tejidos blandos se expanden, principalmente la piel, lo que explica el aumento de tamaño que sufren los tatuajes. A partir de este momento, su tamaño se mantiene más o menos estable, aunque con el paso del tiempo se vuelve progresivamente menos reconocible. Entre los días 294 y 333 post-mortem, los tatuajes dejan de servir como identificadores secundarios ya dejan de ser visibles.

Ante estas limitaciones, se han intentado desarrollar nuevas técnicas con tal de poder mejorar la visualización de los tatuajes en cuerpos en avanzado estado de descomposición. Por ejemplo, se puede emplear peróxido de hidrógeno (H_2O_2) al 3%. El H_2O_2 reacciona con los pigmentos oscuros que derivan de la descomposición y que se acumulan en la zona subcutánea. Al hacerlo, los elimina temporalmente, aclarando temporalmente la piel y haciendo visibles los tatuajes con tal de poder ser fotografiados (Haglund & Sperry, 1993). Sin embargo, esta técnica presenta ciertas limitaciones y es que, para poder aplicarla correctamente, se necesita tener información previa sobre la localización de los tatuajes. Además, es una técnica limitada en el tiempo ya que el tatuaje solamente será visible durante un periodo corto de tiempo (el suficiente para poder ser fotografiado) y también está limitado

por el número de repeticiones que se pueden aplicar de forma efectiva (Starkie *et al.*, 2011).

4.2. Métodos de documentación y comparación de tatuajes

Una de las áreas más importantes dentro de la medicina forense es la identificación de los fallecidos. Tradicionalmente, se usa la comparación de las huellas dactilares, registros dentales o incluso análisis de ADN. Sin embargo, en aquellos casos donde los cadáveres presentan un estado de descomposición muy avanzado, estos métodos pueden ser inviables (Fields & Molina, 2008).

Asimismo, se pueden emplear otras técnicas menos costosas que las mencionadas anteriormente para la identificación de ciertos cadáveres. Por ejemplo, el uso de la fotografía infrarroja (IR) para la visualización de tatuajes. La luz infrarroja es una forma de radiación electromagnética cuyas longitudes de onda oscilan entre los 800 nm y 1 mm. Una de sus principales ventajas es que es capaz de penetrar la piel humana y mostrar características que no serían detectables bajo la iluminación del espectro visible – como la presencia de tatuajes degradados –, por lo que es de gran utilidad en el ámbito forense (Oliver & Leone, 2012).

Actualmente es muy sencillo realizar fotografías con luz infrarroja ya que solamente se necesita modificar una cámara fotográfica con un filtro y un objetivo adaptado al espectro IR (Cain *et al.*, 2016). Mediante el uso de estas cámaras modificadas, se pueden visualizar tatuajes en cuerpos momificados, así como tatuajes que han sido tapados o borrados.

4.3. Limitaciones interpretativas de los tatuajes

Dado que las bases de datos tradicionales empleadas para la búsqueda de tatuajes se basan en la descripción de los mismos, hay un elevado componente subjetivo involucrado. La evaluación de los tatuajes depende en gran medida del observador de tal forma que, tatuajes con formas ambiguas o deteriorados pueden suponer una clasificación poco precisa. Brookes y Thompson (2019) realizaron un estudio con 211 participantes cuyo objetivo era evaluar si la percepción personal tiene un impacto

real en la identificación de tatuajes. Los resultados mostraron que la interpretación de los tatuajes presenta un gran margen de error y tiene asociado un elevado componente subjetivo. Estos hallazgos refuerzan la necesidad de implementar de forma general bases de datos que utilicen criterios objetivos y estandarizados, con el fin de mejorar la precisión y fiabilidad en la clasificación forense de tatuajes.

Por otra parte, los tatuajes pueden tener asociado un simbolismo cuyo significado dependerá del contexto cultural o geográfico. Por ejemplo, se conoce que tatuarse un dragón puede significar sabiduría y poder en algunas culturas asiáticas mientras que está relacionado con determinadas pandillas en contextos urbanos de Latinoamérica. Por lo tanto, es de vital importancia tener el contexto apropiado a la hora de realizar interpretaciones *post-mortem* sobre el posible origen de los tatuajes con tal de obtener información verídica y útil en el contexto forense (Byard, 2025c).

En el ámbito forense, el estudio de los tatuajes puede verse comprometido por lo que se conoce como “*covered-up tattoos*”. Esta práctica se basa en tatuajes cuyo fin es ocultar, total o parcialmente, la existencia de tatuajes previos. Es muy común encontrarlos en individuos que buscan ocultar símbolos identificativos como miembros de bandas u organizaciones criminales. Aunque el uso de la fotografía infrarroja ha dado buenos resultados en la recuperación de tatuajes en cuerpos muy deteriorados, su rendimiento se reduce significativamente cuando se trata de tatuajes ocultos bajo otros diseños. La calidad de la visualización depende del color del pigmento, el dibujo, la densidad de la tinta y la calidad del tatuaje. Aquellos tatuajes densamente cubiertos con tinta negra no pueden ser recuperables con esta técnica (Holz *et al.*, 2020).

4.4. Software de identificación asistida

El avance de las tecnologías digitales ha permitido introducir herramientas informáticas al proceso de identificación forense. La inteligencia artificial (IA) ha emergido como una herramienta poderosa para superar algunas de las limitaciones tradicionales en el análisis de tatuajes, como la subjetividad en la interpretación y la dificultad para reconocer patrones complejos o degradados.

Por ejemplo, los programas informáticos de identificación asistida juegan cada vez un papel cada vez más relevante en ámbitos forenses como la identificación y comparación de tatuajes en cadáveres. Estos programas son capaces de almacenar, organizar y generar patrones de búsqueda mediante el uso de algoritmos de reconocimiento de imágenes. De esta forma, se puede realizar la asociación entre tatuajes observados en cadáveres con registros previos de personas desaparecidas o delincuentes.

Empresas como *Face Forensics* han desarrollado sistemas biométricos centrados en la identificación de víctimas para lograr una mayor precisión en la comparación de rostros, cicatrices, marcas distintivas y tatuajes. El software de reconocimiento facial f2 se centra en el rostro de los cadáveres, centrándose en la zona de alrededor de los ojos ya que es la más distintivas de los individuos. Además, se ha añadido una tecnología de coincidencia de marcas o tatuajes lo que permite utilizar una gama de identificadores más amplia. De esta forma, el sistema es capaz de identificar a una víctima por su rostro, cicatrices, marcas o tatuajes, completos o parciales, viva o muerta (Burt, 2022). Este sistema tiene un módulo de reconocimiento de tatuajes que está diseñado para poder buscar un tatuaje desconocido en una base de datos con el fin de identificar su propietario. Pero, además, también permite comparar imágenes parciales (por tatuajes parcialmente cubiertos o degradados) de forma que los resultados de muestran como miniaturas de tatuajes potencialmente coincidentes en orden descendente de % de coincidencia. De esta forma, se establece que los tatuajes son un sistema biométrico similar a las huellas dactilares, rostro o iris (SketchCop®, 2022b).

4.4.1. Uso de inteligencia artificial para la clasificación de tatuajes

Los tatuajes, a diferencia de otras características biométricas como las huellas dactilares, no pueden utilizarse para establecer directamente la identidad de un sujeto. Sin embargo, sí que se pueden utilizar como características biométricas blandas si se analizan junto a otras características como el sexo, la edad, la etnia etc. para apoyar la identificación de individuos. Además, resultan de gran utilidad en el rastreo de miembros de bandas u organizaciones criminales (Ngan & Grother, 2015).

Antiguamente, las búsquedas de imágenes de tatuajes se realizaban a partir de palabras clave. Es decir, las agencias policiales asignaban a cada imagen de un tatuaje una palabra clave para guardarla en su base de datos. Sin embargo, este enfoque estaba limitado por el vocabulario insuficiente para describir diferentes patrones de tatuajes. Esto llevó a desarrollar nuevas técnicas basadas en la descripción del tatuaje centrándose en la textura, apariencia o color del mismo (Han & Jain, 2013; Lee & Tong, 2011).

La aparición de redes neuronales profundas (DNN) —modelos inspirados en el funcionamiento del cerebro humano capaces de aprender patrones visuales complejos— ha supuesto un gran avance en este campo. Estas redes neuronales han demostrado ser de gran utilidad en diversas aplicaciones de reconocimiento de patrones y visión por ordenador, centrándose en la localización, detección o segmentación de los tatuajes. De forma que, analizan los tatuajes extrayendo propiedades únicas (curvas, textura, color etc.) guardando la información en vectores de características (también llamados *embeddings*), una representación numérica del tatuaje. Estos vectores son los que se almacenan en las bases de datos de tal forma que, cuando hay que cotejar un nuevo tatuaje, el programa informático compara su vector con los existentes para dar lugar a una lista con los resultados que presentan una mayor similitud (Han *et al.*, 2018; González-Soler *et al.*, 2024).

Los sistemas de clasificación utilizados por la IA suelen utilizar redes neuronales convolucionales (CNN), las cuales se pueden entrenar con el fin de aprender a identificar patrones visuales complejos identificando formas específicas, estilos artísticos, temática, localización anatómica del tatuaje etc.

Se ha detectado que una de las principales limitaciones de las bases de datos actuales es el uso de imágenes donde el tatuaje se observa de forma centrada, nítida y bien iluminada. Sin embargo, esta no es la realidad del trabajo policial donde, la mayoría de las imágenes se obtienen de vídeos o de fotografías en las que el tatuaje es un elemento más del conjunto.

Basándose en esta información, Han *et al.*, (2018) diseñaron una red convolucional multi-tarea (CNN) capaz de detectar tatuajes dentro de imágenes generales, así como de generar vectores de información característica para cada uno de ellos. Esta red, además de ser efectiva en una galería de 300.000 imágenes, generó una base de datos adicional que permite encontrar coincidencias a partir de bocetos.

Por su parte, González-Soler *et al.* (2024) construyeron un modelo de redes neuronales profundas que, además de crear los embeddings para cada tatuaje, reconstruía una “plantilla ideal” del tatuaje a partir de la imagen real mejorando así la discriminación de los diferentes diseños. Este enfoque permite una mejora de la generación de los vectores característicos para los tatuajes permitiendo que la recuperación de tatuajes similares sea más robusta.

Sin embargo, el uso de la inteligencia artificial en este campo solo está empezando a ser estudiada. Hay numerosas limitaciones en su uso como que las redes neuronales requieren grandes conjuntos de datos para poder realizar el análisis de forma correcta. Pero, además, estas bases de datos suelen estar centradas en una población específica lo que puede sesgar los resultados (Chooan, 2024).

Además, hay consideraciones éticas y legales que hay que tener en cuenta. En concreto, el uso de la inteligencia artificial en contextos forenses supondría el uso masivo de datos personales y biométricos, aumentando la preocupación sobre la privacidad y vigilancia desproporcionada ejercida por los cuerpos policiales. Asimismo, la validez de las pruebas ante un tribunal sigue siendo objeto de debate ya que existen retos con respecto a transparencia, trazabilidad y validez de los resultados. Por lo tanto, es un campo que sigue en desarrollo y requiere de estudios más robustos y marcos regulatorios bien definidos para poder ser implantado en los protocolos policiales (Solanke, 2022).

5. Importancia de los pigmentos del tatuaje en el análisis genético forense

5.1. La reacción en cadena de la polimerasa (PCR)

La reacción en cadena de la polimerasa (PCR) es una técnica de gran importancia en el análisis genético forense ya que permite la identificación de restos humanos. Se basa en la amplificación de regiones específicas del ADN mediada por una enzima denominada ADN polimerasa. En el contexto de la identificación genética, juega un papel fundamental ya que permite obtener un perfil genético de muestras degradadas, muy comunes en escenarios criminales.

La PCR consiste en la repetición cíclica de tres pasos, tal y como se muestra en la Figura 3, que permite la obtención de un gran número de copias de material genético a partir de una pequeña cantidad de muestra original (ADN molde). La PCR comienza por una fase de desnaturalización donde la muestra se somete a una elevada temperatura que permitirá la separación de las dos hebras del ADN. A continuación, se alinean los cebadores a partir de los cuales la enzima podrá comenzar a añadir los nucleótidos complementarios a los de la cadena original (McDonald *et al.*, 2024). Esta técnica puede estar dirigida a regiones específicas del ADN que contienen repeticiones cortas en tándem (STRs), caracterizadas por ser altamente variables en los seres humanos. Por ello, el análisis de un número elevado de estos STRs permite obtener un perfil genético prácticamente único para cada individuo de la población (Romsos & Vallone, 2015).

La PCR en tiempo real (qPCR) es una variante avanzada de la PCR que permite amplificar el ADN y, además, cuantificarlo de forma precisa. Esto permite conocer la cantidad exacta de material genético presente en una muestra recuperada de un escenario del crimen antes de proceder a la amplificación de STRs (Swango *et al.*, 2006).

Para comprender su importancia, es necesario contextualizar esta técnica dentro del protocolo completo de identificación genética. La identificación genética suele comenzar con una extracción del ADN a partir de la muestra biológica, ya sea una prenda manchada de sangre, un isopo bucal etc. A continuación, se procede a la

cuantificación del ADN lo que permite asegurar que hay suficiente cantidad de material genético para continuar con el procedimiento. Posteriormente, se lleva a cabo la PCR dirigida a loci específicos de STR seguida de una electroforesis capilar. Finalmente, se realiza un análisis de perfil genético basado en la comparación de la muestra con las bases de datos de referencia (Udogadi *et al.*, 2020).

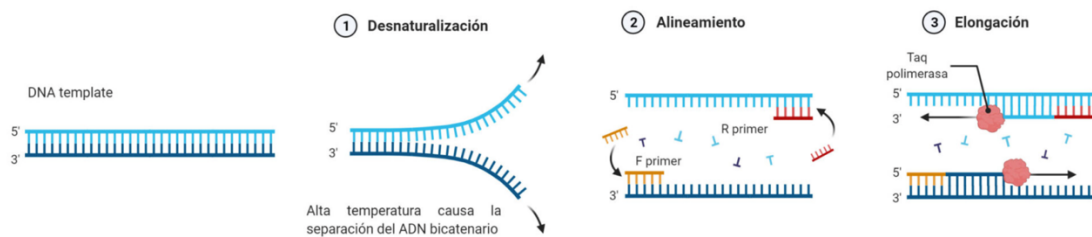


Figura 3. Pasos básicos de la reacción en cadena polimerasa (PCR). Imagen de Labbox (s.f.)

5.2. Efectos de los pigmentos de tatuaje sobre la extracción y amplificación del ADN

Es bastante común encontrar metales pesados en muestras que tienen que ser analizadas con fines forenses. Los iones metálicos pueden ser endógenos en el tipo de muestra, como los huesos, o pueden introducirse en ella a partir de fuentes ambientales (Combs *et al.*, 2015). Sin embargo, como ya se ha mencionado en el presente trabajo, la proporción de metales pesados puede aumentar en muestras biológicas que contengan tinta de tatuajes formada, sobre todo, por pigmentos inorgánicos.

5.2.1. Interacción con el ADN

Se ha comprobado que la presencia de metales pesados en las muestras a analizar puede degradar el ADN o inhibir la PCR aplicada su cuantificación (tanto la PCR en tiempo real como la qPCR), así como la amplificación de STR (*short tandem repeats*), lo que puede derivar en la obtención de perfiles genéticos parciales no aptos para la identificación (Bonsu *et al.*, 2023).

Esto se debe, en parte, a que los metales pesados de transición actúan como importantes catalizadores de reacciones de reducción-oxidación (redox), lo que les permite interactuar con biomoléculas generando especies reactivas como iones superóxido (O_2^-), peróxido de hidrógeno (H_2O_2) y radicales hidroxilos ($\cdot OH$), compuestos altamente tóxicos para las células humanas (Miller *et al.*, 1990).

Además, los cationes metálicos pueden interactuar, de forma directa o indirecta, con dos sitios específicos de la molécula de ADN: por un lado, con el sitio de los residuos cargados negativamente de los grupos fosfatos; y por otro, los sitios característicos de alta densidad electrónica presentes en el nitrógeno y el oxígeno de las bases nitrogenadas (D. O. M. Bonsu *et al.*, 2020).

Como consecuencia, estos metales de transición, al generar cationes con diferentes cargas iónica, son capaces de unirse a varias posiciones del ADN, generando alteraciones en la estructura de la doble hélice (Kruszewski *et al.*, 1999) así como daño oxidativo *in vivo* al ADN a través de radicales generados por peróxido de hidrógeno tal y como aparece representado en la Figura 4 (Miller *et al.*, 1990).

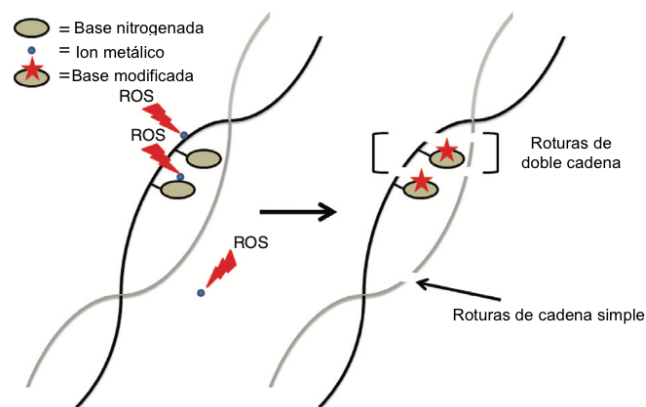


Figura 4. Alteración de las bases nitrogenadas y de la estructura de la doble hélice de ADN mediada por iones metálicos (imagen adaptada de Morris (2014)).

El daño generado por los metales pesados al DNA puede producirse también de forma indirecta. Algunos compuestos como el níquel, el cadmio o el cobalto - presentes en algunas tintas de tatuajes - son capaces de interferir en el correcto funcionamiento de los mecanismos de reparación del ADN por escisión de nucleótidos (NER) y bases

(BER), incluso cuando se encuentran en concentraciones consideradas como no citotóxicas (Hartwig *et al.*, 2002b).

En términos generales, la presencia de iones metálicos impide el reconocimiento del daño en el ADN mediado por el sistema NER como la escisión de las bases incorrectas realizada por el sistema BER. La inhibición de estos mecanismos conlleva que los daños generados por factores ambientales, como la radiación ultravioleta, se vuelvan permanentes, incrementando la posibilidad de formación de tumores y elevando la tasa de mutaciones en el material genético (Hartwig, 1998).

Además, se ha estudiado como algunos iones divalentes - como Zn^{2+} , Co^{2+} o Ni^{2+} - pueden unirse al DNA formando unos complejos denominados M-DNA. La presencia de estos complejos da lugar a picos anchos y baja intensidad de fluorescencia durante el análisis por electroforesis capilar, lo que dificulta de forma significativa el proceso de genotipado de algunas muestras de ADN (Hartzell & McCord, 2005b).

5.2.2. Competencia con el magnesio y efectos en la actividad enzimática

Como se ha comentado anteriormente, la unión de los cationes metálicos al ADN se explica por la presencia de la cadena de grupos fosfatos, así como por los átomos de oxígeno y nitrógeno presentes en la estructura de las bases nitrogenadas. Algunos iones metálicos, como el Mg^{2+} o el Zn^{2+} , son esenciales para el correcto funcionamiento de diversas reacciones enzimáticas, actuando como cofactores. Concretamente, se conoce que el Mg^{2+} puede unirse a la doble hélice del ADN y estabilizar su estructura al neutralizar la carga negativa de los grupos fosfato (Morris, 2014).

Además, el Mg^{2+} es un cofactor fundamental para todas las ADN polimerasas ya que es capaz de formar complejos Mg-dNTP con los nucleótidos simples, que sirven como sustrato para la actividad polimerasa en la PCR (Turel & Kljun, 2011). La concentración de magnesio, por tanto, es vital para el correcto funcionamiento de la ADN polimerasa necesaria para la PCR. Cuando dicha concentración es demasiado baja, no se logra la correcta unión de los dos iones metálicos divalentes catalíticos necesarios para la

actividad óptima de la polimerasa, provocando una disminución significativa del rendimiento de la enzima (Wang & Konigsberg, 2022).

Por otro lado, una interacción competitiva entre el magnesio y otros cationes metálicos divalentes más electropositivos puede alterar la concentración óptima de Mg^{2+} , comprometiendo así la activación de la ADN polimerasa y afectando negativamente el rendimiento de la PCR (D. N. O. Bonsu, Higgins, Simon, Henry, et al., 2023).

Asimismo, se ha documentado que algunos iones metálicos, como el cadmio - presente en las tintas de pigmentos inorgánicos amarillos- ejercen un efecto directo sobre las ADN polimerasas al interactuar con los grupos tiol (-SH) de las cadenas laterales de las cisteínas. Estas interacciones pueden inducir la desnaturalización de la enzima, así como la inhibición de su actividad catalítica (Wu et al., 2011).

5.2.3. Efectos sobre la extracción y cuantificación del ADN

Además de su impacto directo sobre el material genético a amplificar, los iones metálicos también pueden interferir de forma significativa en los ensayos de qPCR utilizados para estimar la cantidad de ADN presente en una muestra determinada. Esta interferencia puede suponer tanto una sobreestimación como una subestimación del material genético, comprometiendo así la precisión del análisis genético posterior.

A esto se suma el hecho de que, durante la fase de extracción del ADN - especialmente cuando se emplean kits basados en perlas magnéticas -, algunos metales, como el hierro(II), pueden saturar los sitios de unión de las perlas, reduciendo la eficiencia de purificación y dejando residuos metálicos en la muestra (D. N. O. Bonsu, Higgins, Simon, Henry, et al., 2023b; Frégeau & De Moors, 2012).

Numerosos estudios han analizado el efecto de diferentes iones metálicos sobre la cuantificación de ADN en el contexto forense. Algunos de ellos han sido capaces de demostrar que los controles internos positivos (IPC), empleados en la PCR para detectar inhibiciones, no siempre son fiables para detectar algunos inhibidores

metálicos. En concreto, se demostró que iones como el hierro, cobre o zinc, que inhiben la amplificación del DNA, no alteran significativamente la señal IPC. Esta discrepancia puede conducir a una sobreestimación de la cantidad de DNA útil, dando lugar a errores en la preparación de muestras para el análisis por STRs (D. N. O. Bonsu, Higgins, Simon, Henry, et al., 2023b).

5.3. Alternativas y soluciones propuestas en genética forense

Tal y como se ha visto anteriormente, la presencia de iones metálicos en muestras de interés forense, como los presentes en las tintas de los tatuajes, supone una dificultad añadida para su correcto procesamiento. Frente a esta problemática, se han propuesto varias estrategias para intentar minimizar sus efectos inhibitorios y mejorar así la calidad de los perfiles obtenidos.

Aunque la mayoría de los metales iónicos se eliminan durante el proceso de purificación del ADN (Czado et al., 2022), ciertos métodos de extracción, como los basados en perlas magnéticas, pueden no ser ideales para muestras contaminadas con iones ferrosos. De hecho, algunos autores proponen que esta técnica no es capaz de garantizar una eliminación eficaz de dichos contaminantes. Esto afectaría negativamente a la recuperación de ADN y, por lo tanto, a la posterior calidad del perfil genético. Por ello, es necesario seguir explorando procedimientos alternativos como el uso de columnas de membrana de sílice o de aditivos quelantes combinados con técnicas basadas en perlas magnéticas (D. N. O. Bonsu, Higgins, Simon, Henry, et al., 2023b).

Una de las estrategias más utilizadas para eliminar los iones catiónicos se basa en el uso de quelantes como el EDTA. Se ha demostrado que son capaces de aumentar tanto la cantidad de ADN recuperado como el número de loci STR identificables (Czado et al., 2024). Sin embargo, se ha observado que, el uso de estos quelantes en concentraciones elevadas durante la extracción del ADN mediante el uso de perlas magnéticas puede conllevar efectos adversos. El EDTA es capaz de extraer iones de Fe^{3+} del núcleo de magnetita de las perlas, lo que puede interferir en la cuantificación precisa del ADN y en la eficiencia de la amplificación (Szymczyk et al., 2022).

El uso de ADN polimerasas modificadas junto con sistemas tampón optimizados, ha demostrado ser otra de las estrategias más eficaces empleadas en la reducción de la inhibición de la PCR en muestras biológicamente complejas, como las contaminadas por iones metálicos. Empleando técnicas de mutagénesis dirigida, se han desarrollado variantes de la polimerasa con mayor tolerancia a inhibidores comunes. Según Sidstedt *et al.* (2020), esta mejora podría explicarse por una velocidad enzimática modificada, así como por una mayor afinidad de la enzima hacia la plantilla de ADN, lo que facilita una amplificación más robusta incluso en condiciones desfavorables.

6. Conclusiones

Además de ser una herramienta clave en la identificación de restos humanos, se ha demostrado que los tatuajes también pueden interferir en alguno de los análisis moleculares implicados en la misma. Trabajar con tejido tatuado en un contexto forense implica una dificultad añadida que tiene que ser tenida en consideración por los peritos.

En primer lugar, los tatuajes, tradicionalmente considerados como una forma de expresión corporal, poseen gran relevancia como dato biométrico complementario en casos donde los métodos tradicionales de identificación no pueden ser aplicados. Sin embargo, hay que tener en cuenta ciertas limitaciones que pueden afectar a su interpretación como el simbolismo cultural que tienen asociado o las posibles modificaciones a las que están sujetos en el periodo post-mortem.

En base a los datos analizados, la composición química de las tintas de tatuaje, especialmente su elevado contenido en metales pesados representa un factor de riesgo clave en el análisis genético forense, ya que se ha estudiado que es capaz de comprometer tanto la integridad del ADN como la eficacia de su amplificación mediante técnicas como la PCR. Además, se ha señalado que el uso de métodos de extracción como las perlas magnéticas, pueden verse afectados por la presencia de estos compuestos. Por lo tanto, es necesario la implementación de protocolos que

tengan en cuenta los iones metálicos que pueden estar presentes en determinadas muestras como el tejido tatuado o muestras recuperadas de un arma de fuego.

En todo este contexto, parece de gran importancia considerar el deterioro que sufren los tatuajes durante el periodo post-mortem como uno de los factores limitantes en su visualización. Fases como la hinchazón temprana o la momificación pueden alterar las formas y los colores de los diseños, limitando así su utilidad para la identificación. Sin embargo, técnicas especializadas como la fotografía infrarroja o la rehidratación química con peróxido de hidrógeno han demostrado ser métodos eficaces para recuperar parcialmente esta información.

Sobre las perspectivas de futuro, la aplicación de la inteligencia artificial para la clasificación y comparación de los tatuajes parece ser una innovación prometedora. Las redes neuronales profundas tienen una gran eficiencia en la detección y organización de los tatuajes en bases de datos amplias, incluso en condiciones de mala calidad o visibilidad reducida. Sin embargo, todavía presentan importantes limitaciones relacionadas con los sesgos en los datos de entrenamiento, la privacidad y la validez legal de los resultados en un contexto judicial.

En conjunto, estos resultados muestran la necesidad de continuar investigando para optimizar los protocolos de análisis genético de aquellas muestras que contengan elevadas concentraciones de iones metálicos, así como para desarrollar herramientas que permitan incorporar de forma segura, ética y eficaz la información derivada de los tatuajes en la identificación humana durante los procedimientos forenses.

7. Bibliografía

- Bäumler W. (2015). Absorption, distribution, metabolism and excretion of tattoo colorants and ingredients in mouse and man: the known and the unknown. *Current problems in dermatology*, 48, 176–184. <https://doi.org/10.1159/000369222>
- Bäumler, W. (2016). Tattoos and their potential health consequences. *Deutsches Ärzteblatt International*, 113(40), 663.
- Birngruber, C. G., Martínez Peña, E. G., Corrales Blanco, L., & Holz, F. (2020). The use of tattoos to identify unknown bodies. *Rechtsmedizin*, 30(4), 219-224.
- Bonsu, D. N. O., Higgins, D., Simon, C., Goodwin, C. S., Henry, J. M., & Austin, J. J. (2023). Quantitative PCR overestimation of DNA in samples contaminated with tin. *Journal of forensic sciences*, 68(4), 1302–1309. <https://doi.org/10.1111/1556-4029.15312>
- Bonsu, D. N. O., Higgins, D., Simon, C., Henry, J. M., & Austin, J. J. (2023b). Metal–DNA interactions: Exploring the impact of metal ions on key stages of forensic DNA analysis. *Electrophoresis*, 45(9-10), 779-793. <https://doi.org/10.1002/elps.202300070>
- Bonsu, D. O. M., Higgins, D., & Austin, J. J. (2020). Forensic touch DNA recovery from metal surfaces - A review. *Science & justice : journal of the Forensic Science Society*, 60(3), 206–215. <https://doi.org/10.1016/j.scijus.2020.01.002>
- Breuner, C. C., Levine, D. A., & COMMITTEE ON ADOLESCENCE (2017). Adolescent and Young Adult Tattooing, Piercing, and Scarification. *Pediatrics*, 140(4), e20163494. <https://doi.org/10.1542/peds.2017-1962>
- Burt, C. (2022b, agosto 11). Face Forensics launches victim identification system with biometrics and tattoo recognition. *Biometric Update | Biometrics News, Companies And Explainers*. <https://www.biometricupdate.com/202208/face-forensics-launches-victim-identification-system-with-biometrics-and-tattoo-recognition>
- Byard R. W. (2025). Learning to read and interpret tattoos. *Forensic science, medicine, and pathology*, 10.1007/s12024-025-00940-w. Advance online publication. <https://doi.org/10.1007/s12024-025-00940-w>
- Cain, M. D., Roper, D., & Atherton, D. S. (2016). Use of Infrared Photography to Visualize a Tattoo for Identification in Advanced Decomposition. *Academic forensic pathology*, 6(2), 338–342. <https://doi.org/10.23907/2016.035>
- Charuta, A., Wegner, R., Charuta, K. M., Hanusek, K., & Paziewska, A. (2023). Types of colourants used in tattoo and permanent make-up techniques, legal regulations, health, and psychological aspects of tattooing. *Health science reports*, 6(9), e1360. <https://doi.org/10.1002/hsr2.1360>

- Choochan, M. A. (2024). Limitations of artificial intelligence in forensic science . *Forensic Insights and Health Sciences Bulletin*, 2(1). Retrieved from <https://ammanif.com/journal/fi/index.php/home/article/view/119>
- Combs, L. G., Warren, J. E., Huynh, V., Castaneda, J., Golden, T. D., & Roby, R. K. (2015). The effects of metal ion PCR inhibitors on results obtained with the Quantifiler(®) Human DNA Quantification Kit. *Forensic science international. Genetics*, 19, 180–189. <https://doi.org/10.1016/j.fsigen.2015.06.013>
- Czado, N., Houston, R., & Hughes, S. (2022). Comparison of metal ions recovered during DNA analysis of brass ammunition and effects of copper and zinc ions on DNA profiling. *Forensic Science International: Genetics Supplement Series*, 8, 162-164. <https://doi.org/10.1016/j.fsigss.2022.10.021>
- Czado, N., Houston, R., & Hughes, S. (2024). Evaluation of metal ions and DNA recovery from the surface of fired and unfired brass ammunition to improve STR profiling. *International journal of legal medicine*, 138(4), 1265–1272. <https://doi.org/10.1007/s00414-024-03200-8>
- Domínguez E. (s.f.). *Tatuajes vistos desde la química*. Ciencia UNAM. <https://ciencia.unam.mx/leer/1477/tatuajes-vistos-desde-la-quimica>
- Dominguez, E., Alegre, V., García-Melgares, M. L., Laguna, C., Martín, B., Sánchez, J. L., & Oliver, V. (2008). Tattoo pigment in two lymph nodes in a patient with melanoma. *Journal of the European Academy of Dermatology and Venereology : JEADV*, 22(1), 101–102. <https://doi.org/10.1111/j.1468-3083.2007.02112.x>
- Fields, R., & Molina, D. K. (2008). A novel approach for fingerprinting mummified hands. *Journal of forensic sciences*, 53(4), 952–955. <https://doi.org/10.1111/j.1556-4029.2008.00768.x>
- Frégeau, C. J., & De Moors, A. (2012). Competition for DNA binding sites using Promega DNA IQ™ paramagnetic beads. *Forensic science international. Genetics*, 6(5), 511–522. <https://doi.org/10.1016/j.fsigen.2011.12.003>
- Giulbudagian, M., Schreiber, I., Singh, A. V., Laux, P., & Luch, A. (2020). Safety of tattoos and permanent make-up: a regulatory view. *Archives of toxicology*, 94(2), 357–369. <https://doi.org/10.1007/s00204-020-02655-z>
- Gonzalez-Soler, L. J., Salwowski, M., Rathgeb, C., & Fischer, D. (2024). TattTRN: Template Reconstruction Network for Tattoo Retrieval. *arXiv (Cornell University)*. <https://doi.org/10.48550/arxiv.2405.07571>
- Haglund, W. D., & Sperry, K. (1993). The use of hydrogen peroxide to visualize tattoos obscured by decomposition and mummification. *Journal of forensic sciences*, 38(1), 147–150.
- Han, H., & Jain, A. K. (2013). Tattoo based identification: sketch to image matching. *International Conference On Biometrics (ICB)*, 1-8. <https://doi.org/10.1109/icb.2013.6613003>

- Han, H., Li, J., Jain, A. K., Shan, S., & Chen, X. (2018). Tattoo Image Search at Scale: Joint Detection and Compact Representation Learning. *arXiv (Cornell University)*. <https://doi.org/10.48550/arxiv.1811.00218>
- Hartwig A. (1998). Carcinogenicity of metal compounds: possible role of DNA repair inhibition. *Toxicology letters*, 102-103, 235–239. [https://doi.org/10.1016/s0378-4274\(98\)00312-9](https://doi.org/10.1016/s0378-4274(98)00312-9)
- Hartwig, A., Asmuss, M., Ehleben, I., Herzer, U., Kostelac, D., Pelzer, A., Schwerdtle, T., & Bürkle, A. (2002b). Interference by toxic metal ions with DNA repair processes and cell cycle control: molecular mechanisms. *Environmental Health Perspectives*, 110(suppl 5), 797-799. <https://doi.org/10.1289/ehp.02110s5797>
- Hartzell, B., & McCord, B. (2005). Effect of divalent metal ions on DNA studied by capillary electrophoresis. *Electrophoresis*, 26(6), 1046–1056. <https://doi.org/10.1002/elps.200406193>
- Høgsberg, T., Loeschner, K., Löf, D., & Serup, J. (2011). Tattoo inks in general usage contain nanoparticles. *The British journal of dermatology*, 165(6), 1210–1218. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2133.2011.10561.x>
- Holz, F., Birngruber, C. G., Ramsthaler, F., & Verhoff, M. A. (2020). Beneath cover-up tattoos: possibilities and limitations of various photographic techniques. *International journal of legal medicine*, 134(2), 697–701. <https://doi.org/10.1007/s00414-019-02007-2>
- Ibrahim, E., Canal, R., Silva, R. F., Heit, O. F. J., & Franco, A. (2024). On the forensic value of tattoos for human identification—a literature review. *Revista Brasileira de Odontologia Legal*, 11(1). <https://doi.org/10.21117/rbol-v11n12024-531>
- Kate Brookes, G., & Thompson, T. (2019). The impact of personal perception on the identification of tattoo pattern in human identification. *Journal of forensic and legal medicine*, 64, 34–41. <https://doi.org/10.1016/j.jflm.2019.03.002>
- Kiszla, B. M., Elmets, C. A., & Mayo, T. T. (2023). Quantitative analysis of restricted metals and metalloids in tattoo inks: A systematic review and meta-analysis. *Chemosphere*, 313, 137291. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.137291>
- Kruszewski, M., Iwaneńko, T., Bouzyk, E., & Szumiel, I. (1999). Chelating of iron and copper alters properties of DNA in L5178Y cells, as revealed by the comet assay. *Mutation research*, 434(1), 53–60. [https://doi.org/10.1016/s0921-8777\(99\)00016-6](https://doi.org/10.1016/s0921-8777(99)00016-6)
- Labbox España. (2024, octubre 30). LA TÉCNICA DE LA PCR (INTRODUCCIÓN y PRINCIPIOS BÁSICOS). <https://labbox.es/la-tecnica-de-la-pcr-introduccion-y-principios-basicos-2/>
- Lee, J., Jain, A., & Tong, W. (2011). Image retrieval in forensics: tattoo image database application. *IEEE MultiMedia*, 19(1), 40-49. <https://doi.org/10.1109/mmul.2011.59>

- Manca, M. (2011). Agresiones al cuerpo en la adolescencia: ¿redefinición de los límites del cuerpo o desafío evolutivo? *Psicoanálisis: Revista de la Asociación Psicoanalítica de Buenos Aires*, 33(1).
- McDonald, C., Taylor, D., & Linacre, A. (2024). PCR in Forensic Science: A Critical Review. *Genes*, 15(4), 438. <https://doi.org/10.3390/genes15040438>
- Miller, D. M., Buettner, G. R., & Aust, S. D. (1990). Transition metals as catalysts of "autoxidation" reactions. *Free radical biology & medicine*, 8(1), 95–108. [https://doi.org/10.1016/0891-5849\(90\)90148-c](https://doi.org/10.1016/0891-5849(90)90148-c)
- Miranda, M. D. (2012). *The chemical analysis of modern tattoo inks* (Doctoral dissertation, City University of New York).
- Miranda, M. D. (2015a). *Forensic analysis of tattoos and tattoo inks*. Crc Press.
- Miranda, M. D. (2020). Tattoos and tattoo inks: Forensic considerations. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Forensic Science*, 2(1). <https://doi.org/10.1002/wfs2.1360>
- Morris D. L., Jr (2014). DNA-bound metal ions: recent developments. *Biomolecular concepts*, 5(5), 397–407. <https://doi.org/10.1515/bmc-2014-0021>
- Ngan, M. , Grother, P. and Hanaoka, K. (2018), Tattoo Recognition Technology - Evaluation (Tatt-E): Performance of Tattoo Identification Algorithms, NIST Interagency/Internal Report (NISTIR), National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, [online], <https://doi.org/10.6028/NIST.IR.8232>
- Ngan, M., & Grother, P. (2015). Tattoo recognition technology - challenge (Tatt-C): an open tattoo database for developing tattoo recognition research. *EEE International Conference On Identity, Security And Behavior Analysis (ISBA 2015)*. <https://doi.org/10.1109/isba.2015.7126369>
- Nwawuba Stanley, U., Mohammed Khadija, A., Bukola, A. T., Omusi Precious, I., & Ayevbomwan Davidson, E. (2020). Forensic DNA Profiling: Autosomal Short Tandem Repeat as a Prominent Marker in Crime Investigation. *The Malaysian journal of medical sciences : MJMS*, 27(4), 22–35. <https://doi.org/10.21315/mjms2020.27.4.3>
- Oliver, W. R., & Leone, L. (2012). Digital UV/IR photography for tattoo evaluation in mummified remains. *Journal of forensic sciences*, 57(4), 1134–1136. <https://doi.org/10.1111/j.1556-4029.2012.02101.x>
- Öztürk, H. K. A., Acar, K., & Dereli, A. K. (2025). Identification and Classification of tattoos in autopsies; a retrospective study. *Gazi Medical Journal*, 36(1), 28–37. <https://doi.org/10.12996/gmj.2024.4136>
- Pierrat, J., Guillon, É., Joly, M., & Lesven, D. (2000). Les Hommes illustrés: le tatouage des origines á nos jours. (*No Title*).

- Poon, K. W. C., Dadour, I. R., & McKinley, A. J. (2008). In situ chemical analysis of modern organic tattooing inks and pigments by micro-Raman spectroscopy. *Journal Of Raman Spectroscopy*, 39(9), 1227-1237. <https://doi.org/10.1002/jrs.1973>
- Probert, S. J., Maynard, P., Berry, R., Mallett, X., & Seckiner, D. (2021). Changes in the morphometric characteristics of tattoos in human remains. *Australian Journal of Forensic Sciences*, 55(4), 474–491. <https://doi.org/10.1080/00450618.2021.2010438>
- Romsos, E. L., & Vallone, P. M. (2015). Rapid PCR of STR markers: Applications to human identification. *Forensic science international. Genetics*, 18, 90–99. <https://doi.org/10.1016/j.fsigen.2015.04.008>
- Schreiver, I., Hesse, B., Seim, C., Castillo-Michel, H., Villanova, J., Laux, P., Drejack, N., Penning, R., Tucoulou, R., Cotte, M., & Luch, A. (2017). Synchrotron-based v-XRF mapping and μ -FTIR microscopy enable to look into the fate and effects of tattoo pigments in human skin. *Scientific reports*, 7(1), 11395. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-11721-z>
- Sepehri, M., Sejersen, T., Qvortrup, K., Lerche, C. M., & Serup, J. (2017). Tattoo Pigments Are Observed in the Kupffer Cells of the Liver Indicating Blood-Borne Distribution of Tattoo Ink. *Dermatology (Basel, Switzerland)*, 233(1), 86–93. <https://doi.org/10.1159/000468149>
- Shindy, A. H. (2016). Basics in colors, dyes and pigments chemistry: A review. *Chemistry International* 2(29), 2016.
- Sidstedt, M., Rådström, P., & Hedman, J. (2020). PCR inhibition in qPCR, dPCR and MPS-mechanisms and solutions. *Analytical and bioanalytical chemistry*, 412(9), 2009–2023. <https://doi.org/10.1007/s00216-020-02490-2>
- SketchCop®. (2022b, abril 21). *f2 Tattoo Recognition Module matches helps identify unknown tattoos*. <https://sketchcop.com/tattoo-recognition>
- Solanke, A. A. (2022). Explainable digital forensics AI: Towards mitigating distrust in AI-based digital forensics analysis using interpretable models. *Forensic Science International Digital Investigation*, 42, 301403. <https://doi.org/10.1016/j.fsidi.2022.301403>
- Sperry K. (1991). Tattoos and tattooing. Part I: History and methodology. *The American journal of forensic medicine and pathology*, 12(4), 313–319. <https://doi.org/10.1097/00000433-199112000-00008>
- Starkie, A., Birch, W., Ferllini, R., & Thompson, T. J. (2011). Investigation into the merits of infrared imaging in the investigation of tattoos postmortem. *Journal of forensic sciences*, 56(6), 1569–1573. <https://doi.org/10.1111/j.1556-4029.2011.01869.x>
- Swango, K. L., Timken, M. D., Chong, M. D., & Buoncristiani, M. R. (2006). A quantitative PCR assay for the assessment of DNA degradation in forensic samples. *Forensic science international*, 158(1), 14–26. <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2005.04.034>

- Szymczyk, A., Drozd, M., Kamińska, A., Matczuk, M., Trzaskowski, M., Mazurkiewicz-Pawlicka, M., Ziółkowski, R., & Malinowska, E. (2022). Comparative Evaluation of Different Surface Coatings of Fe₃O₄-Based Magnetic Nano Sorbent for Applications in the Nucleic Acids Extraction. *International journal of molecular sciences*, 23(16), 8860. <https://doi.org/10.3390/ijms23168860>
- Tighe, M. E., Libby, D. K., Dorn, S. K., Hosmer, J. R., & Peaslee, G. F. (2017). A survey of metals found in tattoo inks. *Journal of environmental protection*, 8(11), 1243-1253. <https://doi.org/10.4236/jep.2017.811077>
- Torres, V. (2007). Utilizando el cuerpo, una mirada antropológica al tatuaje. *Uruguay. Taller de antropología social II. Recuperado el, 26.*
- Turel, I., & Kljun, J. (2011). Interactions of metal ions with DNA, its constituents and derivatives, which may be relevant for anticancer research. *Current topics in medicinal chemistry*, 11(21), 2661–2687. <https://doi.org/10.2174/156802611798040787>
- Visión, N. (2002). La sociología del cuerpo. *Buenos Aires, Argentina, Editorial Nueva.*
- Wang, J., & Konigsberg, W. H. (2022). Two-Metal-Ion Catalysis: Inhibition of DNA Polymerase Activity by a Third Divalent Metal Ion. *Frontiers in molecular biosciences*, 9, 824794. <https://doi.org/10.3389/fmolb.2022.824794>
- Wu, X., Yalowich, J. C., & Hasinoff, B. B. (2011). Cadmium is a catalytic inhibitor of DNA topoisomerase II. *Journal of inorganic biochemistry*, 105(6), 833–838. <https://doi.org/10.1016/j.jinorgbio.2011.02.007>