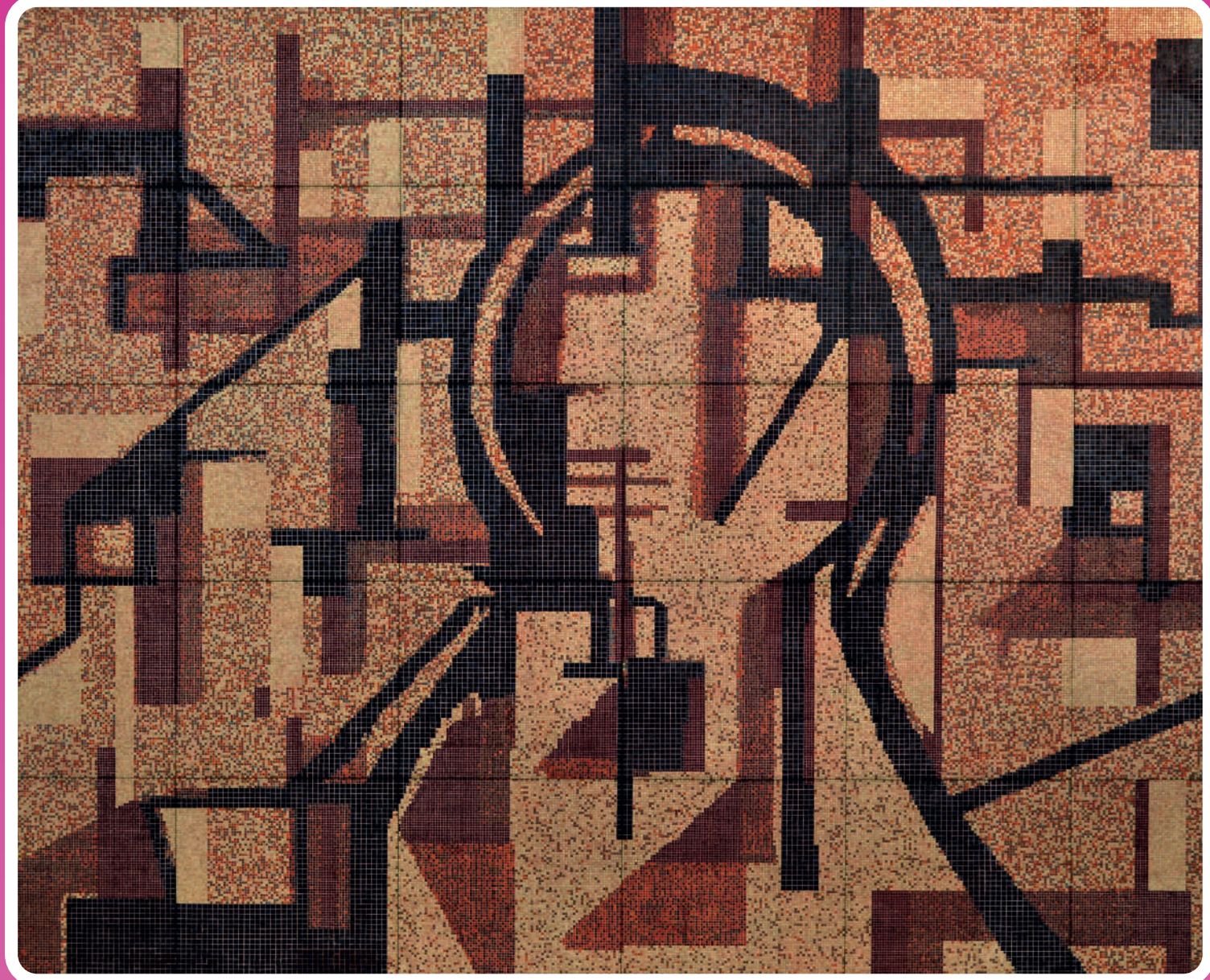
RECIF
Año 5 No. 2

REVISTA DIGITAL DE CIENCIA FORENSE

ISSN: 3061-7588



MURAL: LA RAZÓN DEL HOMBRE Y EL CUERPO HUMANO, AUTOR: GABRIEL MACOTELA

REVISTA DIGITAL DE CIENCIA FORENSE

ESCUELA NACIONAL DE CIENCIAS FORENSES
UNAM

Rector
Dr. Leonardo Lomelí Vanegas

Directora
Dra. Zoraida García Castillo

Secretaria General
Dra. Ana María Sosa Reyes

Editor General
Dr. Vicente Torres Zúñiga

Consejo editorial
Dra. Zoraida García Castillo, Dra. María Elena Bravo Gómez, Dr. Vicente Torres Zúñiga, Dra. Alexa Villavicencio Queijeiro, Dra. Anahy Rodríguez González.

REVISTA DIGITAL DE CIENCIA FORENSE,
Año. 5, No. 2, octubre 2026 - marzo 2027. Publicación semestral editada por la Universidad Nacional Autónoma de México, Avenida Universidad 3000, Alcaldía Coyoacán, C.P. 04510, Ciudad de México, a través de la Escuela Nacional de Ciencias Forenses (ENaCiF), Circuito de la Investigación Científica s/n, Ciudad Universitaria, Col. Ciudad Universitaria, Alcaldía Coyoacán, C.P. 04510, Ciudad de México, Teléfono 56-23-23-00 ext. 24210, http://recif.unam.mx/, correo electrónico: recif@enacif.unam.mx. Editor responsable: Dr. Vicente Torres Zúñiga. Certificado de Reserva de Derechos al uso exclusivo No. 04-2023-101812092200-102, ISSN 3061-7588. Responsable de la última actualización de este número: Dr. Vicente Torres Zúñiga, Circuito de la Investigación Científica s/n, Ciudad Universitaria, Col. Ciudad Universitaria, Alcaldía Coyoacán, C.P. 04510, Ciudad de México, fecha de la última modificación 30 de octubre de 2026.

La responsabilidad de los textos publicados en Revista Digital de Ciencia Forense recae exclusivamente en las personas autoras y su contenido no refleja necesariamente el criterio de la Institución. Se autoriza la reproducción total o parcial de los textos aquí publicados siempre y cuando se cite la fuente completa y la dirección electrónica de la publicación.

Producción editorial: Vicente Torres Zúñiga
Diseño y maquetación: Vicente Torres y Reyes Farfán Sánchez
Portal Web: Diego Uriel Álvarez Almanza y Vicente Torres Zúñiga

Diseño de portada: Emir Romero Borboya.
Fotografía: Gabriela Ochoa Rivera
Diseño de logo de la revista: Emir Romero Borboya.

ÍNDICE

a Editorial

1 Principios edafológicos y su relación con la degradación de los elementos óseos
De la Paz Peña, Víctor Daniel.

15 Farmacoeconomía de adicciones
Quijano-Mateos, Alejandra; Rosiles Tapia, Luis Fernando; Castillo Alanis, Luz Alejandra; Bravo Gómez, María Elena.

26 Tu ADN puede revelar tu edad. Una herramienta genética para la identificación forense
Cano-Ravell, Alan; Moreno-Ortiz, José Miguel; Flores-López, Beatriz Armida.

36 Rugoscopía: protocolo para la enseñanza en ciencia forense, a partir de una revisión documental
Gil-Chavarría, Ivet; Loyzance, Chantal; Huerta Pacheco, N. Sofía.

49 Imágenes multiespectrales aplicadas al análisis forense de documentos
Narcotti, Gaston Gerardo.

68 Análogos del fentanilo en México: vacíos normativos y desafíos periciales en la construcción del objeto material del delito
González Lozano, Rafael Uriel; Rebollar López, Erika Jazmín; Hernández Valois, Solcamiri.

ÍNDICE

78 Análisis forense de imágenes digitales, fotografías y video: marco normativo y metodológico internacional (2013-2025) Estudio exploratorio-descriptivo
Guzman Soto, Marco Antonio.

88 Grafoscopía forense: análisis comparativo y desafíos de validación científica del software NEGA en la pericia caligráfica
Rocha Yucra, Rodolfo Bruno.

101 Displasia alveolocapilar con mala alineación de venas pulmonares en una muerte perinatal investigada por presunta mala praxis: relevancia médico-legal
Martínez Gómez, José Steven.

108 Autenticación de fragmentos óseos humanos mediante el complejo mayor de histocompatibilidad clase I
Morales Malagón, Uziel.

EDITORIAL

Año 5, Número 2

La investigación forense contemporánea atraviesa un periodo de transformación, impulsado por el desarrollo tecnológico, la incorporación de nuevas herramientas analíticas y la creciente interacción entre distintas áreas del conocimiento. Lejos de constituir un campo aislado, la ciencia forense representa un espacio de convergencia disciplinaria en el que la biología molecular, la química, la medicina, las ciencias de la computación y las ciencias sociales, entre muchas otras, contribuyen a responder preguntas de relevancia científica y jurídica. Sin embargo, esta evolución también plantea una reflexión fundamental: el avance de la ciencia forense no depende únicamente de nuestra capacidad para desarrollar e incorporar nuevas tecnologías, sino también de la solidez científica de los métodos empleados y de la manera en que se interpretan los resultados.

La diversidad temática de los trabajos que integran este número de la Revista Digital de Ciencia Forense permite reconocer distintas dimensiones de este desafío. Desde el estudio de los procesos que afectan la conservación de elementos óseos hasta la aplicación de herramientas moleculares para la caracterización de indicios biológicos, las investigaciones muestran cómo la integración de conocimientos procedentes de diferentes disciplinas amplía las posibilidades del análisis forense. Al mismo tiempo, ponen de manifiesto que la información obtenida no puede interpretarse de manera descontextualizada, o sin contemplar las características de los materiales examinados, así como las limitaciones inherentes a cada aproximación metodológica.

La incorporación de herramientas tecnológicas constituye otro de los ejes de transformación de la práctica forense. El desarrollo de sistemas de adquisición de imágenes multiespectrales, las herramientas digitales para el análisis documental y los métodos moleculares ofrecen nuevas posibilidades para examinar características que pueden resultar inaccesibles mediante procedimientos convencionales. No obstante, la sofisticación instrumental o la automatización de un procedimiento no garantizan, por sí mismas, la confiabilidad de sus resultados. La evaluación del desempeño de los métodos, el reconocimiento de las fuentes de error y la definición de sus alcances y limitaciones son condiciones indispensables para sustentar su aplicación en contextos forenses.

Esta necesidad adquiere particular relevancia frente a la creciente presencia de evidencia digital y al desarrollo de tecnologías capaces de modificar o generar contenidos audiovisuales. La autenticación, la integridad y la trazabilidad de los materiales examinados demandan procedimientos transparentes y técnicamente fundamentados. Sin embargo, estos principios no son exclusivos del ámbito digital: también resultan esenciales en disciplinas tradicionales que buscan fortalecer sus fundamentos científicos mediante la revisión crítica de sus procedimientos, la estandarización de criterios y la incorporación de herramientas informáticas.

Más allá de la obtención de resultados analíticos, uno de los mayores desafíos de la ciencia forense reside en su interpretación. La identificación de una característica, la detección de una sustancia o el reconocimiento de una alteración en un indicio; no conducen necesariamente a una conclusión inequívoca sobre su origen, significado o relación con los hechos investigados. Distinguir entre observación e inferencia, reconocer explicaciones alternativas y establecer conclusiones proporcionales a la evidencia disponible, son componentes esenciales del razonamiento científico. En este sentido, la incertidumbre no debe entenderse como una debilidad del conocimiento forense, sino como una dimensión que debe reconocerse, valorarse y comunicarse adecuadamente.

Las contribuciones reunidas en este número nos recuerdan que la investigación forense se desarrolla en estrecha relación con problemáticas sociales, de salud pública y jurídicas. El estudio de sustancias emergentes y sus implicaciones normativas, la evaluación económica de intervenciones relacionadas con las adicciones y la investigación médico-legal de posibles responsabilidades profesionales, evidencian la importancia de integrar distintas perspectivas para abordar problemas complejos. Estos trabajos invitan a reflexionar sobre las consecuencias que puede tener la aplicación del conocimiento científico en procesos de toma de decisiones que trascienden el trabajo realizado en el laboratorio.

En este escenario, la formación de profesionales capaces de cuestionar críticamente los fundamentos de los métodos empleados, comprender las limitaciones de sus intervenciones y comunicar los resultados obtenidos con rigor, constituye una responsabilidad central de la comunidad académica y científica. La innovación requiere acompañarse de procesos de evaluación, validación y revisión continua, pero también de una cultura científica abierta al diálogo interdisciplinario y al cuestionamiento de sus propios supuestos.

Los artículos que integran este número reflejan la diversidad de aproximaciones y desafíos que caracterizan a la ciencia forense. En conjunto, invitan a reflexionar sobre el significado del progreso científico en este campo: avanzar no consiste únicamente en desarrollar nuevas herramientas o ampliar la información que podemos obtener de un indicio, sino también en fortalecer nuestra capacidad para formular preguntas pertinentes, evaluar críticamente los métodos disponibles y construir interpretaciones sustentadas en evidencia.

En este sentido, el verdadero desafío no radica solamente en ampliar las posibilidades de la investigación forense, sino en asegurar que estas se traduzcan en conocimiento científicamente fundamentado, cuyas fortalezas y limitaciones puedan reconocerse y comunicarse con claridad. Una ciencia forense sólida no es aquella que pretende ofrecer respuestas absolutas, sino aquella que reconoce los alcances de su conocimiento y mantiene una disposición permanente a cuestionarlo, revisarlo y fortalecerlo.

Dra. Alexa Villavicencio Queijeiro
Comité Editorial
Revista Digital de Ciencia Forense (ReCiF)

Principios edafológicos y su relación con la degradación de los elementos óseos

De la Paz Peña Víctor Daniel[1]✉
[1]Universidad de la Policía y Ciencias de la Seguridad de Aguascalientes.
✉ victordelapaz9294@gmail.com

Datos del artículo
Cita
De la Paz-Peña V.D. Principios edafológicos y su relación con la degradación de los elementos óseos ReCiF. 2026;(2):01–14.

Editor
Henrik Bernhard Lindskoug

Revisión por pares
Uno

Recibido
10/abril/2025

Aceptado
27/abril/2026

Publicado
30/octubre/2026

Creative Commons CC-BY-NC-SA 4.0 Internacional

Resumen

La identificación humana en contextos forenses enfrenta grandes desafíos, especialmente cuando los elementos óseos se encuentran sometidos a condiciones ambientales adversas. La Edafología, entendida como la ciencia que estudia la composición y características del suelo, constituye una herramienta auxiliar para comprender los procesos de degradación ósea. En este trabajo se analizan los principios edafológicos y su relación con la descomposición cadavérica y la diagénesis del tejido óseo, con especial énfasis en la influencia del pH y de la composición química del suelo. Para ello, se revisaron estudios arqueológicos y forenses que comparan distintos tipos de suelos y su impacto en la conservación de los huesos y del ADN. Los resultados muestran que los suelos ácidos aceleran la desmineralización y fragilidad de los elementos óseos, mientras que los suelos alcalinos favorecen su preservación. Se concluye que la incorporación de la Edafología a los análisis forenses aporta información complementaria que mejora la interpretación del estado de los elementos óseos y aumenta la fiabilidad de los procesos de identificación humana.

Palabras clave: Suelo, descomposición cadavérica, pH, identificación humana, personas desaparecidas.

Abstract:

Human identification in forensic contexts faces significant challenges, especially when bone elements are exposed to adverse environmental conditions. Edaphology, understood as the science that studies the composition and characteristics of soil, constitutes an auxiliary tool to understand bone degradation processes. This work analyzes edaphological principles and their relationship with cadaveric decomposition and bone tissue diagenesis, with special emphasis on the influence of soil pH and chemical composition. For this purpose, archaeological and forensic studies comparing different soil types and their impact on the preservation of bones and DNA were reviewed. The results show that acidic soils accelerate bone demineralization and fragility, while alkaline soils favor their preservation. It is concluded that the incorporation of Edaphology into forensic analyses provides complementary information that improves the interpretation of bone elements condition and increases the reliability of human identification processes.

Keywords: Soil, cadaveric decomposition, pH, human identification, missing persons.

Introducción

México vive una crisis de desaparición de personas. "*Hay un México lleno de carteles de búsqueda, de rostros que miran desde los afiches pegados. Están en las farolas, en las paredes de cualquier local, en las entradas del metro. Hay un México lleno de ojos que buscan. Están desperdigados en las principales ciudades, en los destinos turísticos, en los pueblos de las sierras, en los barrios pobres, en las fronteras*"(1).

La Comisión Nacional de Búsqueda de Personas (CNB), a través del Registro Nacional de Personas Desaparecidas y No Localizadas (RNPDNO)[1], al 24 de junio de 2025, informó que existen

[1] El Registro Nacional de Personas Desaparecidas y No Localizadas (RNPDNO) es una herramienta prevista en la Ley General en Materia de Desaparición Forzada de Personas, Desaparición Cometida por particulares y del Sistema Nacional de Búsqueda

365,812 personas reportadas como desaparecidas, el 97% de ellas a partir de 2007[2]. Antes del 2019 no se contaba con un registro sólido de personas desaparecidas y no localizadas; había información que contenía múltiples archivos con estructuras diferentes, los datos eran inconsistentes, existía multiplicidad de información, registros nulos y sin homologación de información, además de duplicidad de los mismos. Esta realidad ha sido reconocida por el Estado Mexicano tanto a nivel nacional como internacional, a partir del 17 de noviembre de 2017, fecha en que se expide la Ley General en Materia de Desaparición Forzada de Personas, Desaparición Cometida por Particulares y del Sistema Nacional de Búsqueda de Personas. Esta crisis ha obligado al Estado Mexicano a establecer bases generales, políticas públicas y procedimientos entre las autoridades orientados a la búsqueda, localización, e identificación de Personas Desaparecidas y No Localizadas. Tal es el caso de la implementación del Protocolo Homologado para la Búsqueda de Personas Desaparecidas y No Localizadas (2).

En este sentido, Ansolabehere, citada en el Manual sobre desaparición de Personas (3), propone analizar este fenómeno a través de una comprensión de sus contextos, es decir, conociendo las dinámicas espaciales y temporales en las que las desapariciones suceden. Al mismo tiempo, la autora, es enfática cuando explica cómo es que las dos causas concretas, identificadas por ellas, se convierten en factores determinantes para que el fenómeno de las desapariciones se siga repitiendo: la falta de información y la práctica generalizada. Es decir, uno de los objetivos de desaparecer a una persona es ocultar su paradero, y toda aquella información que guarde relación con su ubicación. Consecuentemente, las desapariciones se han convertido en una práctica generalizada, en la que se observan patrones generales, más allá de las particularidades locales.

Ahora bien, uno de los patrones generales existentes en el fenómeno de la desaparición es el *modus operandi* de ciertos grupos delictivos, ya que, el crimen organizado, de quien se presume es el principal responsable de la desaparición de personas en nuestro país, ha utilizado técnicas de ocultamiento de cadáveres más convencionales y menos atípicas que, en años pasados, tal es el caso de la inhumación de cadáveres en fosas clandestinas.

Un ejemplo muy ilustrativo sobre las nuevas técnicas de ocultamiento de cadáveres e inhumación clandestina es el caso Citlali Valeria (2024). El sábado 9 de noviembre de 2024 fueron vistos por última vez en una comunidad del municipio de Jesús María Aguascalientes Citlali Valeria Ávila Dávalos de 20 años y sus dos menores hijos Jonathan Alexander de cuatro años y Neithan de un año de edad, siendo reportados como desaparecidos. No fue hasta el mes de diciembre de ese mismo año que los cuerpos de Citlali Valeria y los dos menores de edad fueron localizados enterrados en una fosa, misma que fue hallada en el patio trasero de una casa ubicada en la colonia Paseos de la Providencia, en el municipio de San Francisco de los Romo. La particularidad de este hecho es que en tal lugar se localizaron diversas herramientas y material para la construcción, entre ellos carretillas, montículos de tierra y una plancha de concreto que cubría la fosa (4).

Este caso se suma a otros tantos casos acontecidos en México en los cuales el modo de ocultamiento y desaparición de cadáveres se ha realizado con una mayor conciencia forense. Entendiendo por conciencia forense a la capacidad del delincuente para planificar y adaptar su modo de operación, así como para tomar precauciones específicas con la finalidad de persuadir a la autoridad o distraerla durante los actos de investigación, como, por ejemplo: limpiar la escena, uso de algún material para dejar el menor rastro posible, el ocultamiento del cadáver, entre otros. De manera particular, los casos de

de Personas (LGD), cuya administración y coordinación corresponde a la Comisión Nacional de Búsqueda de Personas (CNB).

[2] Cifras obtenidas de la Consulta Pública del Registro Nacional de Personas Desaparecidas y No Localizadas. https://consultapublicarnpdno.segob.gob.mx/consulta

desaparición de personas en el Estado de Aguascalientes han aumentado considerablemente en los últimos años, ejemplo de ello es que la Fiscalía General de Estado de Aguascalientes informó que durante el periodo comprendido del 1 de enero de 2020 al 13 de abril de 2024 se encontraron 41 fosas clandestinas, dentro de estas fosas se han recuperado por lo menos 34 cadáveres y diversos elementos óseos, de los cuales aún no se ha determinado el número total de víctimas[3].

La localización de cuerpos y elementos óseos de personas desaparecidas representan un reto para las autoridades responsables de la identificación de personas desaparecidas, ya que, la integración de la ficha de identificación humana debe realizarse desde una perspectiva interdisciplinaria, en la que cada área forense aporte los elementos suficientes para obtener el mayor grado de certeza posible y así lograr su completa identificación. En el proceso de identificación humana intervienen distintas disciplinas forenses tales como la medicina legal, la genética, la odontología, la antropología y el análisis lofoscópico. Sin embargo, en contextos de inhumación clandestina y exposición prolongada a condiciones ambientales adversas, la degradación del tejido óseo puede limitar el alcance de estos análisis. En este escenario surge una interrogante central para la presente investigación: ¿la desmineralización de los elementos óseos es consecuencia del tipo de suelo en el que son sepultados? A partir de esta pregunta se desarrolla el análisis de los principios edafológicos y su influencia en los procesos de degradación postmortem, con el propósito de aportar elementos científicos complementarios que fortalezcan la interpretación forense y la identificación humana. Por tanto, este artículo tiene como objetivo difundir la posible relación que pueda existir entre los principios edafológicos y su vínculo con la degradación de los elementos óseos, a partir de la comparación de la composición química del suelo y su interacción con los componentes químico-biológicos de los huesos; con la finalidad de aportar datos complementarios para la identificación humana de las osamentas de personas desaparecidas localizadas sin vida.

Principios edafológicos

¿Qué es la edafología?

La Edafología es la ciencia que estudia la composición y naturaleza del suelo en su relación con las plantas y el entorno que le rodea. Mientras que el suelo es el resultado del material madre producido por la transformación química y mecánica de las rocas de la superficie terrestre. A esta materia madre se agregan el agua, los gases, sobre todo el dióxido de carbono, el tiempo transcurrido, los animales y las plantas que descomponen y transforman el humus, dando por resultado una compleja mezcla de materiales orgánicos e inorgánicos (5).

Boulaine y Albert, citados en Barrios (6), definen al suelo como el *"producto de la alteración, de la reestructuración y de la organización de las capas superiores de la corteza terrestre bajo la acción de la vida, de la atmósfera y de los intercambios de energía que en ellas se manifiestan." Sin embargo, el suelo es un concepto difícil de definir en razón de las transferencias dinámicas, cíclicas continuas o alternadas que lo van constituyendo; es decir, el suelo se origina a partir de una roca o sedimento que no tiene por qué estar consolidado. A este proceso se le conoce como edafogénesis"* (6).

En otras palabras, podemos establecer que el suelo es el resultado de la interacción de cinco elementos constitutivos: clima, roca madre, tiempo, relieve, seres vivos, y en ocasiones el agua libre presente en los mantos freáticos. Ahora bien, es importante destacar los elementos químicos que

[3] Datos obtenidos mediante solicitud de acceso a la información pública. Plataforma Nacional de Transparencia.

constituyen el suelo. Estos elementos proceden del dinamismo que existe entre la atmósfera, la hidrósfera y la litosfera. En el primero de los casos existe la transferencia de agua, nitrógeno y carbono; mientras que para el segundo de ellos se transfiere sodio, potasio, cloro, sulfatos, entre otros; y por último, existe una transferencia de fósforo, oligoelementos, calcio, magnesio, etc. (6). Adicionalmente, la vegetación, la fauna, los microorganismos y el hombre son factores biológicos que influyen en la evolución de los suelos.

Formación osteológica y composición química

Una vez que hemos abordado los conceptos básicos de la edafología es necesario entender qué son y cómo se componen los huesos humanos. La osteología es la rama de la morfología que estudia la forma y la estructura de los huesos. Esta ciencia define a los huesos como tejidos vivos compuestos por tres tipos de tejidos: el tejido compacto que es el más rígido y externo del hueso; el tejido esponjoso que se encuentra dentro de los huesos; y el tejido suave que se encuentra al final de los huesos y que está cubierto por cartílago. En palabras de Lagunas y Hernández (7) los huesos son las partes blanquecinas claras y resistentes que en conjunto forman el esqueleto, características de los vertebrados. Los huesos tienen un conducto central donde se encuentra la médula amarilla. Los huesos esponjosos, como la clavícula y el esternón, contienen además la médula roja u ósea formada de células sanguíneas en etapas inmaduras, células grasas y macrófagos. El desarrollo de los huesos está determinado por el proceso de osificación según el tipo de hueso del que se trate. Este proceso consiste en la creación de un nuevo tejido óseo a partir de los osteoblastos. Existen dos centros de osificación: el centro de osificación primario, el cual aparece antes del nacimiento y el centro de osificación secundario, mismo que inicia en el periodo posnatal (8).

Fernández (8) explica que el proceso de la osificación u osteogénesis se da desde la etapa embrionaria hasta la edad adulta, y durante éste los huesos se van conformando a partir de tejido embrionario que se osifica, es decir se transforma en hueso. Tal transformación se da de dos maneras: la osificación conjuntiva y la osificación encondral. En la primera de ellas, las células conjuntivas embrionarias de la mesénquima, derivadas de la región del esclerotomo adquieren la capacidad de producir matriz ósea y formar así al hueso. Mientras que, en la segunda, las células mesenquimatosas embrionarias forman un molde de tejido cartilaginoso que posteriormente se osifican; siendo éste el proceso más común. Sobre este proceso Fernández (8) precisa que la osificación se da de forma progresiva a partir de puntos, centros o focos de osificación de cada hueso, que van creciendo uniéndose entre sí hasta que forman el hueso adulto. Cada hueso a lo largo del desarrollo y maduración ósea tienen sus centros de osificación en un estado distinto. Estas diferencias en los lapsos de maduración serán de gran apoyo al momento de pretender establecer la edad ósea de las personas, que en condiciones normales coinciden con la edad cronológica.

Los tejidos óseos se componen principalmente de proteínas, colágeno y minerales. El colágeno permite la incorporación de minerales al hueso, primordialmente el fosfato de calcio, dándole dureza y firmeza al hueso. Los 206 huesos que componen el esqueleto humano se encuentran recubiertos por una membrana rígida y fina llamada periostio. A esta membrana se unen los músculos, ligamentos y tendones. De los diferentes tipos de colágenos presentes en el cuerpo humano el colágeno tipo I es el que se encuentra en los huesos. La composición principal de este tipo de colágeno está sintetizada en fibroblastos, condroblastos y osteoblastos; permitiendo con ello la resistencia y el estiramiento de los tejidos. Por su parte, el calcio (Ca) es un elemento químico del orden de los cationes divalentes, lo cual le permite interactuar con otros dos elementos químicos: el fósforo (P) y el oxígeno (O_2); formando el fosfato de calcio ($Ca_3(PO_4)_2$), siendo éste el material que constituye la mayor parte de los huesos y los dientes. El Ca representa el 2% del peso corporal representando un 1.000 g aproximadamente. En los

huesos se encuentra más del 98% corporal, y un 1% es intercambiable de forma libre con el líquido extracelular (9).

Delgadillo refiere que *"el balance del Ca^{2+} en el organismo está dado a nivel sérico y la forma más común de almacenaje de este mineral en el organismo son los huesos; aquí se concentra aproximadamente 99 por ciento del total de Ca^{2+} asociado con otros iones formando cristales de hidroxiapatita. El restante 1 por ciento del Ca^{2+} presente en los huesos está libre y, por lo tanto, disponible para ser tomado por las células."* (10). Al respecto Carral San Laureano *et al* explica que si bien, del Ca^{2+} depende en gran medida la formación del tejido óseo, existen diversos factores endógenos que afectan la homeostasis mineral y con ello la resorción ósea, entendiendo por homeostasis mineral al almacenamiento en el tejido óseo de Ca y P para ayudar tanto a la contracción muscular como en otras funciones, y que son liberados a la sangre para ser distribuidos en otras partes del organismo. Mientras que la resorción ósea es el proceso por el que los osteoclastos eliminan tejido óseo liberando minerales desde la matriz ósea hacia la sangre. Estos factores deberán considerarse al momento de evaluar si los huesos presentan una patología ósea (9).

La descomposición cadavérica

¿Qué sucede con el cuerpo humano, y en particular con los huesos, después de la muerte? La muerte se define como el "*cese de la actividad integrada del organismo, resultante de la incapacidad orgánica de sostener la homeostasis". Este acontecimiento desencadena una serie de procesos físicos, químicos y biológicos, que, en circunstancias típicas, dan paso a la descomposición cadavérica. Serrano Valenciano señala que "la muerte es un proceso constituido por fases de desintegración sucesiva del funcionamiento total y coordinado de todas las unidades celulares e hísticas, que configuran, todas juntas, el cuerpo humano y cuyo funcionamiento integrado es la vida* (11)."

El proceso de descomposición cadavérica consiste en una serie de procesos naturales, los cuales dependen entre sí por el tipo de transformación y el orden cronológico de aparición. Estos fenómenos serán de suma importancia al momento de determinar la data de muerte, o mejor conocido como cronotanatodiagnóstico. Peña, Bustos y Verdín (12) explican la importancia de que tanto el personal de la salud e incluso el personal de la administración y procuración de justicia, tenga los conocimientos básicos para realizar un diagnóstico de tiempo post mortem precoz, sin la necesidad de esperar hasta que el cuerpo sea valorado por un médico forense o patólogo. Diagnóstico que se basa principalmente en la etapa de descomposición del mismo cuerpo y la presencia de fenómenos cadavéricos. Según la Ley General de Salud, la pérdida de la vida ocurre cuando se presentan la muerte encefálica o el paro cardiaco irreversible.[4] Este proceso de transición marca el inicio de los fenómenos cadavéricos, tanto tempranos como tardíos. Gisbert, citado en Peña, Bustos y Verdín (12), clasifica a los fenómenos cadavéricos como fenómenos cadavéricos abióticos y bióticos. Los primeros son el resultado de la desaparición de toda clase de vida y no obedecen más que a las leyes físicas que gobiernan los cuerpos sin vida entre ellos se mencionan la deshidratación, hipóstasis y enfriamiento. Por otra parte, los fenómenos cadavéricos bióticos son diferentes formas de expresión de los de naturaleza fisicoquímica que se producen en el cuerpo después de la muerte, se menciona como ejemplo de ello la rigidez cadavérica debido a la

[4] Ley General de Salud. Artículo 343. Para efectos de este Título, la pérdida de la vida ocurre cuando se presentan la muerte encefálica o el paro cardíaco irreversible. La muerte encefálica se determina cuando se verifican los siguientes signos:
I. Ausencia completa y permanente de conciencia;
II. Ausencia permanente de respiración espontánea, y
III. Ausencia de los reflejos del tallo cerebral, manifestado por arreflexia pupilar, ausencia de movimientos oculares en pruebas vestibulares y ausencia de respuesta a estímulos nocioceptivos. Se deberá descartar que dichos signos sean producto de intoxicación aguda por narcóticos, sedantes, barbitúricos o sustancias neurotrópicas. Disponible en: https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LGS.pdf

degradación del ATP a AMP. Aun y cuando existen diferentes clasificaciones de estos fenómenos, los autores coinciden en agruparlos a partir de la aparición de los cambios, alteraciones o modificaciones que sufre el cadáver a partir del momento mismo en que se pierde la vida, sin importar el motivo por el cual se extingue la existencia. Tales cambios son el resultado de la combinación de procesos bioquímicos y factores ambientales.

Peña, Bustos y Verdín (12) aciertan al afirmar que: "*La mayoría de las veces, no solo es importante encontrar e identificar las características físicas del cuerpo en el momento del hallazgo, donde un problema constante es identificar la causa probable de muerte; el agente de la causa; si fue mutilado de alguna extremidad o fue mutilado con agentes físico-químicos, así como identificar los factores ambientales que pudieron haber influido en la evolución de los fenómenos cadavéricos, pudiéndolo acelerar o retardar dicho proceso."*(12).

Lo anterior resulta evidente cuando hablamos de casos de inhumaciones clandestinas, ya que el proceso natural de descomposición cadavérica, incluso la tafonomía de los elementos óseos se ven alterados por diversos factores debido a la teleología de esta acción delictiva, es decir, a través de este hecho se busca el ocultamiento o la desaparición parcial o total de un cadáver, para lo cual se utilizan distintas técnicas que alteran o aceleran la descomposición cadavérica, por ejemplo, la disección, la disolución en ácidos, la incineración del cadáver utilizando distintos tipos de combustible, el enterramiento a poca profundidad lo cual permite la proliferación de fauna cadavérica o el cubrir el cadáver con hidróxido de calcio u otras compuestos. Zanetti (13) explica que la tafonomía forense generalmente se relaciona con procesos de tiempo corto que ocurren luego de la muerte y durante la descomposición. Es decir, que la tafonomía forense examina como las variables bióticas y abióticas (condiciones climáticas, estado del cadáver, proliferación de algas, vegetación, acción de animales, etc.) pueden alterar cadáveres o elementos óseos animales o humanos, y por lo tanto cambiar la evidencia en investigaciones legales (13). Por esta razón, la composición química del suelo (lugar del enterramiento) se convierte en un factor determinante para establecer la relación de causa-efecto que éste tiene sobre la degradación y/o conservación de los tejidos óseos.

Degradación ósea postmortem

Pérez Martínez (14) argumenta que: "*la degradación ósea se considera que se produce principalmente por dos procesos; uno mediado por microorganismos y hongos denominado biodegradación o bioerosión (...) El otro proceso mucho más lento, lo forma la degradación química que engloba el deterioro químico de la fracción orgánica y el deterioro químico de la fracción mineral. Se ha observado que la presencia de moléculas orgánicas en la superficie mineral, disminuirá la velocidad de reacción en solución mineral. Por el contrario, la disolución de la fase mineral expondrá al colágeno a la biodegradación, aumentando así la tasa de su descomposición. Estas tres vías son útiles en términos de la comprensión de las complejas cuestiones relacionadas con la diagénesis del hueso*." (14).

Por tanto, dos son los principales procesos de degradación ósea: la bioerosión (nivel macroscópico) y la degradación química (nivel microscópico). Sin embargo, estos procesos son determinados en gran medida por la actividad microbiana, mismo que da inicio a la degradación ósea una vez ocurrida la muerte. Asimismo, la actividad microbiana se verá influenciada por factores como las altas temperaturas y los niveles de pH. Ahora bien, los huesos, al ser tejidos vivos contienen cristales de hidroxiapatita termodinámicamente inestables, por lo tanto, los cambios en la cristalinidad después del entierro son probables. Las alteraciones minerales que se producen como resultado de la acción del medio ambiente de entierro, se traducen en recristalización, producción de cristales más grandes a través del proceso de maduración de Ostwald (14).

Zona de estudio

Aguascalientes es uno de los treinta y un estados que conforman México; se ubica en la región Centro norte de México y parte del Bajío mexicano. Se divide en once municipios. Datos geográficos de Aguascalientes, coordenadas geográficas extremas: Al norte 22°27', al sur 21°38' de latitud norte, al este 101°53', al oeste 102°52' de longitud oeste. Superficie: Aguascalientes tiene una extensión de 5 616 kilómetros cuadrados (Km^2), ocupando el lugar 29 a nivel nacional entre las 32 entidades federativas. Porcentaje territorial: El Estado de Aguascalientes representa aproximadamente el 0.3% de la superficie del país. Colindancias: El estado de Aguascalientes colinda al norte, noreste y oeste con el estado de Zacatecas; al sureste y sur con el estado de Jalisco.



Figura 1. *Mapa de la ubicación del estado de Aguascalientes dentro del territorio mexicano.*

El Instituto Nacional de Estadística y Geografía INEGI presentó en el 2007 el mapa edafológico de México, en el que se describen las características morfológicas, físicas y químicas de los suelos del país, así como información sobre la textura superficial dominante y en su caso las limitantes químicas sal, sodio o físicas roca, tepetate, pedregosidad que más afectan el uso y manejo del suelo. (15)

En este sentido, se presenta a continuación el Mapa Edafológico del estado de Aguascalientes (Figura 2), del que se señalan los tipos de suelo más predominantes en esta región geográfica, con lo que se puede iniciar una comparación de los procesos de descomposición asociados al tipo de suelo predominante.

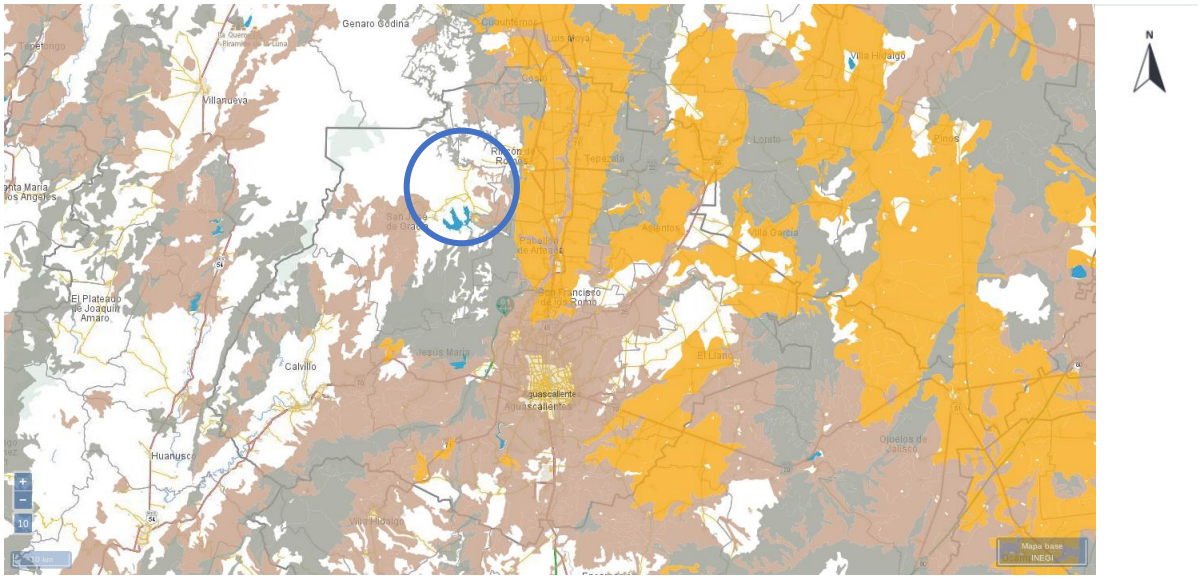


Figura 2 *Mapa edafológico de la región centro del país. Fuente: INEGI, Mapa Edafológico, Conjunto de Datos Vectorial Edafológico. Escala 1:250 000 Serie II Continuo Nacional Aguascalientes (10). Descripción: Mapa edafológico del estado de Aguascalientes en el que se pueden apreciar los tipos de suelo predominante en la región norte del estado, lugar con mayor incidencia en el descubrimiento de fosas clandestinas (círculo azul), abarcando los municipios de Rincón de Romos, San José de Gracia y Tepezalá.*

Para la interpretación de los diferentes tipos de suelo es necesario analizar la figura 3.



Figura 3: *Grupos de suelo en el estado de Aguascalientes. Para una interpretación más amplia se recomienda revisar la Carta Edafológica Serie II, 1:250 000. Aguascalientes F13-9.*
Disponible en: https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825234577

Es importante señalar que, según datos estadísticos de la Plataforma Ciudadana de Fosas[5], desde el 2006 al 2024 en el municipio de Rincón de Romos, Aguascalientes, se han encontrado 14 fosas clandestinas. Mientras que en el municipio de Aguascalientes fueron detectadas 16 fosas. Sin embargo, aun y cuando el municipio de Aguascalientes presenta un mayor número de fosas clandestinas, los lugares de hallazgo de éstas no son los más viables para el presente estudio de éstas, ya que la mayoría de las fosas clandestinas fueron encontradas en entornos urbanos o semi urbanos, en los qué las condiciones del suelo presentan una notable alteración, como en el caso de Citlali Valeria. Por otro lado, a partir del análisis de los rasgos edafológicos de los suelos mexicanos, se observó que los principales tipos de suelo en el estado de Aguascalientes, así como sus características propias (Tabla 1). Destacando que el Municipio de Rincón de Romos comparte los mismos tipos de suelos predominantes en el estado. Al conocer las características edafológicas del suelo es posible establecer una estimación de los niveles de pH. Tanto el Phaeozem, como el Durisol y el Leptosol mantienen un nivel de pH entre un 5.5 y 7.5, es decir, estos suelos son ligeramente ácidos a neutros. Estos datos permiten tener una aproximación de los cambios mineralógicos presentes en los elementos óseos a partir de las condiciones del suelo, en particular de la composición de éstos y del nivel de pH. Fenómenos que se manifiestan en el proceso de corrosión superficial y de la fragilidad de los elementos óseos, como consecuencia de la descalcificación (desmineralización) de estos, como se explica en la próxima sección.

Tipo de suelo	Características	Porcentaje %
Phaeozem (PH)	Suelos de clima semiseco y subhúmedo, tipos BS1, (A)C y Aw0, de color superficial pardos a negro, fértiles en magnesio, potasio, aunque sin carbonatos en el subsuelo. El relieve donde se desarrollan estos suelos es generalmente plano o ligeramente ondulado.	30.59
Durisol (DU)	Suelos con acumulación aluvial o coluvial de sílice y que en México presentan una capa endurecida conocida regionalmente como tepetate. Son muy susceptibles a la erosión hídrica.	18.64
Leptosol (LP)	Anteriormente se conocían como Litosoles, del griego Lithos, piedra. Actualmente representan a suelos con menos de 25 cm de espesor o con más de 80% de su volumen ocupado por piedras o gravas. Son muy susceptibles a la erosión por las diversas actividades humanas.	18.45

Tabla 1: *Principales tipos de suelo en el estado de Aguascalientes. Para una interpretación más amplia se recomienda revisar la Carta Edafológica Serie II, 1:250 000. Aguascalientes F13-9. Disponible en: https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825234577*

[5] La Plataforma Ciudadana de Fosas registra hallazgos en todos los estados del país. Es una herramienta dirigida a los cientos de familias y colectivos de búsqueda en México, así como a la sociedad en general.
La Plataforma reúne documentación de los hallazgos de fosas clandestinas en México reportadas por 1) prensa internacional, nacional y local; 2) fiscalías, procuradurías locales y servicios forenses; y 3) Fiscalía General de la República (FGR), estas últimas obtenidas vía Transparencia y Acceso a la Información Pública. Recopila los datos de fosas clandestinas de fuentes oficiales y de fuentes abiertas desde el año 2006 hasta diciembre de 2024. Esta herramienta ciudadana muestra el número de fosas clandestinas por entidad y por municipio; el número de cuerpos, de elementos y/o fragmentos óseos de personas desaparecidas y, en los casos que logramos obtener la información, el sexo de las víctimas. Disponible en: https://plataformaciudadanadefosas.org/

Cambios mineralógicos de los elementos óseos a consecuencia del pH del suelo

A partir del hecho de que en la mayoría de excavaciones de enterramientos megalíticos la ausencia de elementos humanos es predominante, Nieto, *et al* (17) realizó un estudio en dos yacimientos: el Dolmen de La Paloma y el Dolmen de La Venta, España, y que, a partir de las excavaciones realizadas en ellos se pudieron recuperar un pequeño número de fragmentos óseo. Esto orilló a realizar un análisis de las condiciones físico-químicas del suelo, así como el estudio tanto macroscópico como microscópico de los mismos. De lo anterior se obtuvieron diversos resultados significativos, por ejemplo, se realizó la medida del pH del suelo circundante de donde se recuperaron los fragmentos óseos, para el caso del Dolmen de La Paloma el pH era de 5.95, por lo que se considera un suelo moderadamente ácido, mientras que para el Dolmen de La Venta el valor obtenido fue de 5.52, es decir, un suelo fuertemente ácido.

Ahora bien, a fin de establecer un criterio de comparación aceptable, se llevó a cabo el cotejo de los resultados obtenidos con elementos óseos recuperados de otros contextos geológicos con suelos con pH de 8.25 y 8.31, respectivamente, es decir, en suelos moderadamente alcalinos. Esta comparación demostró que en suelos ácidos los elementos óseos sufren un proceso de disolución parcial, en relación al pH del suelo y del tiempo transcurrido desde el enterramiento. Este proceso ocurre debido a la inestabilidad del hidroxiapatito presente en los elementos óseos en combinación con suelos ácidos a moderadamente ácidos. Caso contrario, los elementos óseos encontrados en suelos alcalinos muestran un buen estado de conservación, a tal grado que presentan un proceso de "calcificación" del hueso por el reemplazo parcial del hidroxiapatito original por calcita en formación. Por tanto, este estudio tiene particular relevancia ya que *"el estudio de las condiciones edafoquímicas del suelo en algunos enterramientos carentes de elementos óseos, o donde éstos aparecen en pequeñas proporciones, han permitido establecer que la ausencia de estos elementos estaría asociada a las condiciones adversas del medio para su conservación."* (17).

A lo anterior podemos añadir las observaciones morfológicas que realiza Pérez Martínez (14):
"*a) En entierros en suelos ácidos, el hueso pierde su color debido a los iones de metales de transición y ácidos húmicos, que pasan a ser soluble e invaden el tejido óseo.*
b) En entierros en suelos alcalinos, el hueso se vuelve de color crema debido a la fijación de los iones metálicos, carbonatos insolubles y oxihidróxidos" (14).

La edafología forense y su relación con la geología forense

La geología forense es una disciplina dentro de las Ciencias de la Tierra que, a través de la recolección y análisis de minerales, suelo, agua, etc., puede aportar valiosas pruebas para la resolución de problemas planteados por la justicia. Sagripanti *et al* (18), hace referencia al uso de las técnicas y métodos propios de la geología aplicados a la investigación judicial sobre enterramientos ilegales. En ese sentido, los autores señalan que las primeras investigaciones en geología forense trataban solamente sobre el uso del suelo o los sedimentos que se adhirieron a los zapatos de un sospechoso y que se pueden relacionar con la escena de un delito. Sin embargo, en la actualidad, la aplicación de las diversas disciplinas de la geología incluye otros elementos, no sólo el estudio del suelo o de la roca, sino también, la utilización de técnicas analíticas para establecer la culpabilidad o inocencia de los sospechosos. En este sentido, los autores refieren la situación contextual de la República Argentina vivida entre los años de 1976 a 1983, tiempo en el cual este país estuvo bajo un gobierno de facto denominado "dictadura militar", mismo que trajo como consecuencia que miles de personas fueran arrestadas y desaparecidas. Sagripanti *et al* (18), hace referencia a que durante el tiempo de la dictadura Argentina se dividió en cinco regiones geográficas en las cuales se instalaron alrededor de 340 Centros Clandestinos de

Detención (CCD); lugares indispensables dentro de la política de desaparición de personas. Y continúa diciendo que, a partir de ello, durante los años 2007-2009 el Equipo Argentino de Antropología Forense (EAAF), ha dirigido los trabajos de inspección y excavaciones realizadas en cementerios y CCD, de donde rescataron elementos óseos de 181 personas desaparecidas. Derivado de ello, los arqueólogos y antropólogos forenses dedicados a la búsqueda e identificación de personas desaparecidas en la dictadura militar advirtieron la necesidad de la participación de geólogos durante la etapa de exploración del subsuelo, para la ubicación de sitios potenciales de enterramientos clandestinos.

En este sentido es necesario considerar algunos criterios importantes al momento de llevar a cabo la prospección, localización, excavación y análisis de materiales, ya que, la temporalidad de las fosas clandestinas es un factor determinante al momento de realizar tales tareas, es decir, un lugar de enterramiento con más antigüedad que otro requerirá de la aplicación de ciertas técnicas que permitan, por ejemplo, reconocer huellas y cambios en la superficie del suelo, variaciones en la vegetación propia del lugar, ubicar las zonas menos compactas del suelo utilizadas para rellenar la fosa a través del uso de una sonda metálica, entre otras. De manera general, la metodología seguida en la investigación de fosas clandestinas se divide en cuatro etapas: 1) etapa de inventario e investigación preliminar, 2) etapa de exploración del subsuelo, 3) etapa de exhumación, y 4) etapa identificación. Etapas en las cuales participan profesionales de diferentes especialidades forenses.

Discusión

Sin duda alguna la desaparición de personas en México es un fenómeno que durante los últimos años ha ido en aumento, y en el que el hallazgo de fosas clandestinas por parte de las Fiscalías o de las asociaciones dedicadas a la búsqueda de personas se ha convertido en un actividad cotidiana, logrando recuperar, en el mejor de los casos, cadáveres en fase de descomposición que aún hacen viable su identificación, y en no pocas ocasiones, logran recuperar elementos óseos expuestos a condiciones adversas. Estos elementos óseos representan un reto para el equipo forense responsable de su identificación. En consecuencia, tanto el análisis forense de este tipo de elementos óseos, así como los productos periciales que de ello resulte deberán realizarse bajo una perspectiva interdisciplinaria, en donde las diferentes ciencias y técnicas forenses aporten elementos suficientes que garanticen y den certeza de la probabilidad de que éstos correspondan con alguno de los perfiles genéticos de las personas desaparecidas no localizadas. Los elementos óseos no deben analizarse únicamente bajo una perspectiva antropológica, sino que se deberá atender tanto a su naturaleza propia como el contexto ambiental del cual fueron recuperados.

Por tanto, el estudio de las condiciones edafoquímicas del suelo, es decir: el contenido en fosfatos, materia orgánica, pH, entre otros factores ambientales, a las cuales son sometidos los cadáveres o elementos óseos de las personas inhumadas clandestinamente, son factores que deben considerarse para establecer las condiciones adversas del medio que favorecen la destrucción de los elementos óseos. La descomposición cadavérica es el conjunto de procesos naturales que inician en el instante de la muerte y concluye cuando los componentes orgánicos del cuerpo humano son reintegrados a los ciclos bioquímicos de la naturaleza. Durante este proceso se presentan cambios tanto a nivel macroscópico como microscópico, en los que, los factores ya señalados intervienen de manera particular. Es decir, la descomposición del tejido epitelial expone los elementos óseos, los cuales se someten a un proceso de desmineralización, ya que pasan de estar protegidos por este tejido a unas condiciones adversas. Estas alteraciones minerales resultan de la interacción entre el suelo (lugar de entierro) y los cristales de hidroxiapatita. Tales condiciones favorecen la proliferación de enzimas nucleasas, las cuales degradan el ADN de las células muertas, tal como lo refieren Jiménez-Arce y Morera-Brenes (19).

Por tanto, los factores de conservación del ADN están estrechamente relacionados con las condiciones edafológicas del lugar de enterramiento, teniendo en consideración que la preservación del ADN tiene una mayor concentración en huesos y dientes. Por otro lado, el uso de la caracterización del ADN a partir de evidencias biológicas ha demostrado que los huesos aun y cuando estén sometidos a condiciones ambientales extremas éstos llegan a conservar material genético que puede ser analizado a través del uso de técnicas de biología molecular, como la PCR y la secuenciación de micro regiones (STR´s). Sin embargo, este material genético, denominado como ADN antiguo, presenta problemas técnicos, de manera particular en la amplificación de trazas de ADN moderno introducido como contaminante y su amplificación inadvertida en vez del ADN antiguo, por lo que se requieren rigurosas prácticas de laboratorio, personal calificado, experimentos control y pruebas de verificación en todos los pasos (19). Los elementos óseos recuperados enterrados en condiciones adversas (o huesos antiguos), aun y cuando contienen ADN, pueden obtenerse perfiles parciales o incompletos, lo cual, al ser cotejados con los perfiles de referencia, por ejemplo, de los familiares, puede generar una falsa o incorrecta identificación al establecer relaciones familiares inexistentes o equívocas (falsos perfiles).

En relación a lo anterior, los suelos de la región norte del estado de Aguascalientes, en particular del municipio de Rincón de Romos, son suelos ligeramente ácidos (Figura 3), por lo que, estas condiciones edafológicas harán que los elementos óseos recuperados de enterramientos clandestinos se tornen en un color crema a ligeramente blanco, como se ha indicado anteriormente. Estos fenómenos cromáticos se convierten en una fuente de información para el agente de investigación, ya que, una vez que conoce el pH del suelo de donde se encontraron los elementos óseos, así como los posibles cambios físicos que éstos pueden sufrir, podrá orientar a determinar si el lugar del hallazgo corresponde al lugar del hecho a partir del análisis de las condiciones específicas del suelo. De lo anterior, se puede inferir la necesidad de crear equipos interdisciplinarios de investigación dedicados a la búsqueda y procesamiento de fosas clandestinas, en los que intervengan personal especializado en las distintas ramas forenses involucradas en el procesamiento de fosas clandestinas, tales como la geología, edafología, arqueología, antropología, genética, entre otras.

Conclusión

Si bien la Edafología no tiene como objetivo principal la identificación humana, como ciencia auxiliar de las ciencias forenses puede aportar muchos elementos para llevar a cabo el reconocimiento de los elementos óseos encontrados en fosas clandestinas a partir del análisis de los procesos fisicoquímicos a los cuales éstos fueron sometidos. Por tanto, las condiciones edafológicas del suelo, es decir: los factores fisicoquímicos del suelo, los procesos de degradación del hueso, así como la diagénesis del tejido óseo producido por la interacción de la hidroxiapatita, el calcio y algunos sulfatos, son factores que influyen en la conservación y/o degradación del tejido óseo, tanto a nivel macroscópico como microscópico. Y consecuentemente, la edafología del lugar de enterramiento resulta determinante para la posible extracción de ADN de los elementos óseos, así como de su análisis y posible cotejo con el ADN de los familiares de las víctimas facilitando su identificación. Por ende, la edafología forense aporta conocimientos esenciales para la detección, delimitación y análisis de fosas clandestinas, ya que el enterramiento ilegal de cuerpos humanos genera alteración en los horizontes edáficos, cambios en color, compactación, humedad y composición química del suelo, así como modificaciones en la biota microbiana, y presencia de elementos orgánicos (cabello, tejidos, fluidos) mezclados con el sedimento. Estos indicadores permiten identificar zonas de inhumación clandestina aun cuando no hay marcadores visibles en superficie, lo cual es central en contextos de desaparición forzada o ejecuciones.

En este sentido, los indicadores edafoquímicos, como el pH, la composición mineral y la textura del suelo, no solo permiten explicar los procesos de degradación postmortem del tejido óseo, sino que pueden constituir variables relevantes dentro del modelo interpretativo del contexto de inhumación. Si bien la edafología no debe entenderse como un mecanismo autónomo de localización, su integración sistemática en los análisis forenses podría contribuir a la identificación de patrones territoriales asociados a la preservación diferencial de elementos óseos. Bajo esta perspectiva, el estudio de las características del suelo puede incorporarse como un elemento complementario en modelos probabilísticos de análisis espacial orientados a delimitar áreas con mayor potencial de inhumación clandestina siempre en articulación con otras disciplinas y técnicas de investigación criminal. No obstante, la construcción de modelos predictivos requeriría estudios empíricos comparativos y validación estadística en distintos contextos geográficos. En consecuencia, es necesaria la intervención de un equipo multidisciplinario en las investigaciones derivadas de la localización y prospección de fosas clandestinas; por lo que es importante lograr la concientización de las instancias responsables de la investigación y de procuración de justicia, sobre la importancia que requieren las investigaciones de los lugares de inhumación ilegales, a fin de garantizar un manejo adecuado y responsable de los recursos humanos, materiales y presupuestarios, destinados a la búsqueda, localización y procesamiento de fosas clandestinas.

Referencias

1. Flores PSJ, Guillen B. México, el país que desaparece: sin rastro de 125000 personas [Internet]. El País; 2025 mar 23 [citado 2026 feb 20]. Disponible en: https://elpais.com/mexico/2025-03-23/mexico-el-pais-que-desaparece-sinrastro-de-125000-personas.html
2. Gobierno de México. Protocolo homologado para la búsqueda de personas desaparecidas y no localizadas [Internet]. 2020 [citado 2025 jun 20]. Disponible en: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/551671/PPHB_Versi_n_para_fortalecimiento_5may2020__2_.pdf
3. *Tapia, E., coord. Manual sobre desaparición de personas* [Internet]. Ciudad de México: Suprema Corte de Justicia de la Nación; 2022 [citado 2026 abr 25]. Disponible en: https://www.scjn.gob.mx/derechoshumanos/sites/default/files/Publicaciones/archivos/2024-01/Manual%20sobre%20desaparicio%CC%81n%20de%20personas.pdf
4. Milenio Digital. (2024, diciembre 10). *Caso Citlali Valeria: hallan cuerpo de madre y sus dos hijos enterrados en casa de Aguascalientes*. Grupo Milenio. [citado 2026 abr 25]. Disponible en: https://www.milenio.com/estados/caso-citlali-valeria-hallan-mujer-hijos-fosa-aguascalientes
5. Universidad de Buenos Aires. Cátedra de Edafología [Internet]. Buenos Aires: UBA; 2024 [citado 2024 jul 28]. Disponible en: https://www.agro.uba.ar/catedras/edafologia
6. Barrios I. La edafología: origen, desarrollo y conceptos. Vasconia: Cuadernos de historia - geografía [Internet]. 1985 [citado el 27 de abril de 2026]. Disponible en: https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4873678
7. Hernández Espinoza PO, Lagunas Rodríguez Z. *Manual de osteología*. 3a ed. Ciudad de México: ENAH-INAH; 2015. Disponible en: https://clasesgilbertoperezroldan.wordpress.com/wpcontent/uploads/2018/03/manual-de-osteologc3ada.pdf
8. Universidad de los Andes. Osteología [Internet]. 2019 [citado 2024 jul 28]. Disponible en: https://www.uandes.cl/macroscopico/osteologia
9. Carral San Laureano F, Olveira Fuster G, Aguilar Diosdado M. Homeostasis del calcio, fósforo y magnesio. *Med Integral*. 2000;36(7):261–6. Disponible en: https://pesquisa.bvsalud.org/portal/resource/pt/ibc-31663
10. Delgadillo DM. El calcio en la vida humana. Casa del Tiempo [Internet]. 2003 [citado 2024 jul 28]. Disponible en: https://www.uam.mx/difusion/revista/dic02ene03/delgadillo.html
11. Serrano Valenciano J. La muerte y la descomposición cadavérica [Internet]. Valencia: Universidad de Valencia; 2004 [citado 2024 jul 28]. Disponible en: https://www.uv.es/gicf/4A1_Serrano_GICF_29.pdf
12. Peña JA, Bustos Saldaña R, Verdín G O. Fenómenos cadavéricos y el tanatocronodiagnóstico. *Gac Int Cienc Forenses*. 2019;(31):10–37. [citado 2026 feb 20]. Disponible en: https://www.uv.es/gicf/3R1_Pen%CC%83a_GICF_31.pdf

13. Zanetti NI. Tafonomía forense. En: Ayón MR, editora. *Biología Forense*. Tucumán: Fundación Miguel Lillo; 2019. p. 129–147. Disponible en: https://ri.conicet.gov.ar/bitstream/handle/11336/112849/CONICET_Digital_Nro.488a3745-a60a-4681-9e9d-772e4c67cfef_r.pdf
14. Pérez Martínez C. Diagénesis y degradación de restos óseos en contextos arqueológicos [Internet]. Murcia: Universidad de Murcia; 2016 [citado 2024 jul 28]. Disponible en: http://hdl.handle.net/10201/55258
15. INEGI. Conjunto de datos vectorial edafológico. Escala 1:250 000. Serie II Continuo Nacional Aguascalientes [Internet]. 2007 [citado 2024 jul 28]. Disponible en: https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825235604
16. Plataforma Ciudadana de Fosas. Plataforma Ciudadana de Fosas [Internet]. [fecha desconocida] [citado 2026 feb 23]. Disponible en: https://plataformaciudadanadefosas.org/
17. Nieto J, et al. Estudio edafoquímico de enterramientos megalíticos en Salamanca. *Geogacetas*. 2002;31:163–6. Disponible en: https://sge.usal.es/archivos/geogacetas/Geo31/Art46.pdf
18. Sagripanti GL, Villalba D, Aguilera D, Giaccardi A. Geología forense: métodos aplicados en la búsqueda de desaparecidos en la región central de Argentina. *Rev Asoc Geol Argent*. 2013;70(1):150–60. Disponible en: https://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0004-48222013000100012
19. Jiménez-Arce G, Morera-Brenes B. Revisión sobre la extracción de ADN a partir de huesos humanos. *Med Leg Costa Rica* [Internet]. 1999 [citado 2024 jul 28];16(1-2):11–4. Disponible en: https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1409-00151999000200004
20. Fernández-Jalvo Y, Andrews P. Tafonomía [Internet]. Madrid: CSIC; 2020 [citado 2024 jul 28]. Disponible en: https://www.mncn.csic.es/sites/default/files/2020-05/nm07_09tafonomia.pdf
21. Vivero C, Vivero JF. Anatomía humana I: morfología general y miembros [Internet]. Cádiz: Universidad de Cádiz; 2020. [citado 2026 feb 20]. Disponible en: https://medicina.uca.es/wp-content/uploads/2023/08/Anatomia-Humana-2022-1.pdf
22. Bass WM. *Human osteology: a laboratory and field manual*. 5th ed. Columbia (MO): Missouri Archaeological Society; 2005. [citado 2026 feb 20]. Disponible en: https://missouriarchaeologicalsociety.org/product/human-osteology-a-laboratory-and-field-manual-by-william-bass/
23. Schaefer M, Black S, Scheuer L. The osteology of infants and children [Internet]. Texas: Texas A&M University Press; 2009 [citado 2026 feb 20]. Disponible en: https://www.tamupress.com/book/9781585444281/the-osteology-of-infants-and-children/
24. Nielsen-Marsh C, Gernaey A, Turner-Walker G, Hedges R, Pike AWG, Collins M. The chemical degradation of bone. En: Cox M, Mays S, editores. *Human osteology in archaeology and forensic science*. Cambridge: Cambridge University Press; 2000. p. 439–54.

Farmacoeconomía de adicciones

Quijano-Mateos, Alejandra[1]✉, Rosiles Tapia, Luis Fernando[2], Castillo Alanis, Luz Alejandra[1] y Bravo Gómez, María Elena[1]

[1]Escuela Nacional de Ciencias Forenses, Universidad Nacional Autónoma de México. Circuito de la Investigación Científica S/N, Ciudad Universitaria, Coyoacán. C.P. 04510, Ciudad de México.

[2]Facultad de Química, Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad Universitaria, Coyoacán. C.P. 04510, Ciudad de México.

✉ alejandra.quijano@enacif.unam.mx

Datos del artículo

Cita

Quijano-Mateos, A., Rosiles-Tapia, L.F., Castillo-Alanis, L.A. y Bravo-Gómez, M.E., Farmacoeconomía de Adicciones, Recif, 2026 (2) 15-25.

Editor

Marco Antonio Sotomayor Sobrino

Revisión por pares

Uno

Recibido

4/07/25

Aceptado

25/05/2026

Publicado

30/10/2026

Creative Commons CC-BY-NC-SA 4.0 Internacional.

Resumen

Este artículo presenta una revisión bibliográfica para describir las tendencias metodológicas de la farmacoeconomía aplicada al tratamiento de adicciones. La investigación incluyó el análisis de conceptos clave en farmacoeconomía, la adicción como enfermedad y los modelos empleados para su atención. Se revisaron 31 estudios que abarcan distintos enfoques farmacoeconómicos: análisis del coste de la enfermedad (COI), coste-efectividad (CE), coste-beneficio (CBA) y coste-utilidad (CU). Los resultados revelaron importantes desafíos, como la ausencia de estandarización en la cuantificación de costos y la variabilidad en los resultados de diferentes modelos. Estas limitaciones dificultan la comparación entre estrategias de tratamiento y la toma de decisiones fundamentadas. Pese a estas dificultades, se identificaron avances significativos, incluyendo el empleo de la farmacoeconomía para optimizar recursos y maximizar beneficios sociales y sanitarios. Este enfoque permite identificar tratamientos coste-efectivos que mejoran la calidad de vida de los pacientes, reducen el impacto económico del consumo de sustancias y fortalecen la sostenibilidad de los sistemas de salud. Finalmente, se destaca la necesidad de desarrollar metodologías homogéneas y recopilar datos globales sobre el costo y la eficacia de los tratamientos para facilitar comparaciones más precisas y mejorar la toma de decisiones en políticas de salud pública relacionadas con las adicciones.

Palabras clave: Farmacoeconomía, adicciones, tratamiento.

Abstract

This article presents a bibliographic review of pharmacoeconomics applied to addiction treatment with the aim of describing methodological trends. The study included an analysis of key pharmacoeconomic concepts, the conceptualization of addiction as a disease, and the models used for its treatment. A total of 31 studies were reviewed, encompassing different pharmacoeconomic approaches: cost-of-illness (COI) analysis, cost-effectiveness (CE) analysis, cost-benefit (CBA) analysis, and cost-utility (CU) analysis. The results revealed significant challenges, such as the lack of standardization in cost quantification and the variability of outcomes across different models. These limitations hinder comparisons between treatment strategies and evidence-based decision-making. Despite these difficulties, significant progress was identified, including the use of pharmacoeconomics to optimize resources and maximize social and healthcare benefits. This approach helps identify cost-effective treatments that improve patients' quality of life, reduce the economic impact of substance use, and strengthen the sustainability of healthcare systems. Finally, the need to develop standardized methodologies and compile global data on the cost and effectiveness of treatments is emphasized to facilitate more precise comparisons and improve decision-making in public health policies related to addictions.

Keywords: Pharmacoeconomics, addictions, treatment.

Adicciones

La adicción es una enfermedad crónica que se manifiesta a través del uso reiterado de sustancias o la realización de conductas que activan el sistema de recompensa cerebral, incluso cuando generan consecuencias negativas (1). Esta condición implica la pérdida de control sobre el consumo o la conducta, así como la persistencia en estas actividades a pesar de sus efectos perjudiciales para el individuo y la sociedad. Sus características principales incluyen dependencia psicológica, tolerancia y dependencia física, además de un impacto profundo en diversos aspectos de la vida de la persona (2). El consumo de sustancias se clasifica en función del grado de dependencia y la frecuencia de uso, identificándose cuatro tipos: experimental, social, funcional y disfuncional (3-5).

Según la Organización Mundial de la Salud, la adicción suele desarrollarse de manera progresiva en cinco fases (4). Primero aparece el enamoramiento, cuando el primer contacto con la sustancia se percibe como algo positivo e inofensivo. Luego ocurre la luna de miel, etapa en la que el consumo aumenta mientras la persona cree tener control y niega el problema. En la fase de transición comienzan a surgir consecuencias negativas que afectan relaciones y ámbitos como el laboral, académico o familiar. Posteriormente llega la ruina, cuando la persona reconoce su adicción y experimenta culpa, remordimiento y deterioro emocional. Finalmente, en la fase de aprisionamiento, la búsqueda de la sustancia domina la vida del individuo, generando dependencia extrema, pérdida de control y abandono de responsabilidades y vínculos importantes (1-5).

Este proceso progresivo no se explica únicamente por factores conductuales o sociales, sino también por cambios neurobiológicos que ocurren en el cerebro. Las sustancias de abuso activan el sistema de recompensa cerebral, especialmente el sistema dopaminérgico, provocando la liberación de dopamina, un neurotransmisor asociado con la sensación de placer y el refuerzo para repetir conductas(5). Este circuito involucra diversas estructuras interconectadas, como el área tegmental ventral, el núcleo accumbens, la amígdala, el hipocampo, el núcleo dorsal del rafe y la corteza prefrontal, que participan en la motivación, el aprendizaje y la toma de decisiones (6). En condiciones normales, este sistema permite asociar ciertos estímulos con experiencias gratificantes que favorecen la supervivencia; sin embargo, el consumo repetido de sustancias puede desregular estos circuitos y "secuestrar" sus mecanismos de recompensa. Con el tiempo, el cerebro se adapta y requiere estímulos cada vez mayores para producir el mismo efecto, lo que favorece el desarrollo de dependencia. Paralelamente, la corteza prefrontal, responsable del autocontrol, reduce su capacidad reguladora, mientras que estructuras como la amígdala se vuelven más reactivas ante el estrés o señales asociadas al consumo, aumentando el deseo por la sustancia. Estos cambios ayudan a explicar por qué la adicción debe entenderse como una enfermedad con bases neurobiológicas, y no únicamente como el resultado de un consumo prolongado (7).

La adicción es una condición compleja que surge de la interacción entre factores genéticos, ambientales, psicológicos y de salud. Estos elementos influyen tanto en su desarrollo como en su gravedad, en las opciones de tratamiento y en las probabilidades de recuperación. Estudios de epidemiología genética han demostrado que las adicciones presentan un alto grado de heredabilidad; se estima que hasta el 50 % de la vulnerabilidad puede atribuirse a factores genéticos (8). Sin embargo, los factores ambientales también desempeñan un papel importante. El entorno familiar y social, la calidad de la educación, el acceso a sustancias de abuso y la presión del grupo pueden favorecer el inicio y el mantenimiento del consumo. Asimismo, ciertos rasgos psicológicos aumentan la susceptibilidad a desarrollar adicción. Entre ellos se han identificado el neuroticismo (10), la impulsividad y la presencia

de comorbilidades psiquiátricas como la ansiedad generalizada, la depresión o el trastorno por déficit de atención e hiperactividad. Estas condiciones se asocian con mayor riesgo y con una mayor severidad del trastorno, lo que puede complicar su tratamiento y aumentar el sufrimiento del paciente (11).

Diagnóstico de los trastornos por uso de sustancias

El diagnóstico de los trastornos por uso de sustancias ha evolucionado significativamente (12). La edición más reciente, el DSM-V (13), identifica tres categorías principales de trastornos por uso de sustancias: intoxicación, abstinencia y trastorno por uso de sustancias. Además, establece cinco estándares clave para el diagnóstico que son:

1. Problemas derivados del consumo.
2. Patrones recurrentes de uso.
3. Impacto clínico significativo.
4. Malestar o disfunción resultantes.
5. Interferencia con las actividades diarias y la calidad de vida del paciente.

Este enfoque permite identificar con mayor precisión a las personas afectadas, facilitando la implementación de estrategias de tratamiento personalizadas. Además, el DSM-V ha inspirado el desarrollo de herramientas específicas de evaluación, como el Índice de Gravedad de la Adicción (ASI) (14) y la Evaluación Semiestructurada para la Dependencia de Drogas y Alcohol (SSADDA) (15), entre otras. Estas herramientas ofrecen metodologías robustas para medir la severidad de la adicción, los factores de riesgo y el impacto en la vida del individuo, contribuyendo a una planificación terapéutica más efectiva.

Tratamiento de las adicciones

El tratamiento de las adicciones es un proceso integral que no solo busca interrumpir el consumo de sustancias, sino también abordar las comorbilidades médicas y psiquiátricas asociadas, conocidas como trastorno dual. Este enfoque es esencial debido a que la presencia de comorbilidades complica tanto el diagnóstico como el tratamiento, incrementando la gravedad psicosocial y psicopatológica del paciente, además de elevar el riesgo de recaídas y conductas suicidas (11). El tratamiento normalmente incluye una parte farmacológica y paralelamente una terapia psicosocial. El tratamiento farmacológico tiene como objetivos principales aliviar los síntomas de abstinencia, reducir la autoadministración y apoyar la rehabilitación. Para ello, se emplean medicamentos específicos adaptados a la sustancia de abuso, como metadona o buprenorfina para los opioides, benzodiacepinas para el síndrome de abstinencia alcohólica, o antagonistas del receptor de nicotina para la adicción al tabaco. Estos fármacos permiten un manejo más seguro de la desintoxicación y una transición hacia la recuperación sostenida. Por su parte, la terapia psicosocial constituye un pilar fundamental del tratamiento, abordando las dimensiones emocionales, sociales y conductuales de la adicción. Entre las intervenciones más utilizadas se encuentran las terapias individuales, motivacionales, grupales, familiares y expresivas, como la arteterapia (16).

En México, la Norma Oficial Mexicana NOM-028-SSA2-2009 (17) establece un marco para la atención de las adicciones, diferenciando entre tratamientos ambulatorios y residenciales. Los tratamientos ambulatorios son indicados para casos moderados y permiten al paciente continuar con sus

actividades diarias mientras recibe atención médica y psicológica. Por otro lado, los tratamientos residenciales están diseñados para casos severos, ofreciendo un entorno controlado donde los pacientes pueden recibir atención médica, terapias intensivas y apoyo integral adaptado a sus necesidades específicas.

Farmacoeconomía

La farmacoeconomía surge como una disciplina indispensable en el ámbito de la salud, destinada a optimizar el gasto farmacéutico y maximizar los beneficios tanto para los pacientes como para la sociedad. Su importancia radica en su capacidad para informar la toma de decisiones en políticas de medicamentos y tratamientos, proporcionando un marco analítico para evaluar la eficiencia de diferentes opciones terapéuticas y determinar cuáles deberían implementarse de manera rutinaria (18). Mediante estudios farmacoeconómicos, se analiza la relación entre costos y beneficios de las intervenciones médicas, contribuyendo a mejorar la asignación de recursos en sistemas de salud cada vez más exigidos. Las metodologías utilizadas en estos estudios incluyen enfoques retrospectivos, prospectivos y predictivos, adaptándose a las necesidades específicas de evaluación. Existen cinco tipos principales de análisis farmacoeconómicos, cada uno con un enfoque único para valorar la relación entre costos y resultados:

1. Análisis del coste de la enfermedad (COI): Este método cuantifica todos los recursos monetarios que una enfermedad requiere en un periodo específico, generalmente un año. Incluye costos directos, como hospitalización y medicamentos, e indirectos, como pérdida de productividad laboral.

2. Análisis coste-beneficio (CBA): Este análisis traduce tanto los costos como los resultados clínicos a unidades monetarias, permitiendo comparar tratamientos para identificar aquellos con la mayor relación coste/beneficio. Es especialmente útil para priorizar inversiones en salud pública.

3. Análisis coste-efectividad (CE): Se enfoca en medir los costos en unidades monetarias, mientras que los resultados se expresan en unidades físicas, como vidas salvadas o años de vida ganados. Es ampliamente utilizado para comparar la efectividad relativa de diferentes intervenciones médicas.

4. Análisis coste-utilidad (CU): Evalúa los resultados clínicos en términos de años de vida ajustados por calidad (QALYs), empleando escalas numéricas que reflejan los estados de salud. Este análisis permite evaluar la utilidad de las intervenciones no solo por su impacto en la supervivencia, sino también en la calidad de vida de los pacientes.

5. Análisis de minimización de costos (CMC): Compara los costos de dos o más alternativas terapéuticas que generan los mismos resultados clínicos. Su objetivo es identificar la opción más económica cuando la efectividad de los tratamientos es equivalente.

En este contexto, la farmacoeconomía constituye una herramienta útil para analizar las adicciones como una enfermedad desde una perspectiva económica. Tradicionalmente, los estudios farmacoeconómicos se han enfocado en evaluar el valor económico del uso terapéutico de los fármacos; sin embargo, su aplicación al estudio de las adicciones ha sido limitada y con frecuencia se ha centrado más en los costos asociados al uso indebido de sustancias que en el análisis económico del tratamiento y manejo de la enfermedad. Esta distinción es relevante, ya que muchas de las sustancias implicadas no son propiamente fármacos, sino drogas de abuso legales o ilegales. Analizar la adicción desde la farmacoeconomía permite estimar los costos sanitarios y sociales asociados, así como generar evidencia para el diseño de estrategias de atención y políticas públicas más eficientes.

Metodológicamente, estos estudios pueden clasificarse según el momento de obtención de los datos. Los estudios retrospectivos analizan información previamente registrada en expedientes o bases de datos. Los estudios prospectivos siguen a los pacientes hacia el futuro a partir del inicio del estudio para registrar su evolución y los recursos utilizados. Finalmente, los estudios ambispectivos combinan ambos enfoques, utilizando datos históricos y continuando el seguimiento de los pacientes hacia adelante. Sin embargo, este no es el único aspecto metodológico que debe considerarse para comprender cómo se aplica la farmacoeconomía al estudio de las adicciones. Con el fin de identificar tendencias metodológicas en este campo, se realizó una revisión bibliográfica exhaustiva en diversas bases de datos. Mediante el uso de términos clave combinados con operadores booleanos se identificaron 150 referencias relevantes, las cuales fueron clasificadas según el tipo de análisis farmacoeconómico, incluyendo costo de la enfermedad (COI), costo efectividad (CEA), costo beneficio (CBA), costo utilidad (CU) y costo minimización de costos (CMC), además de otras variables como tipo de sustancia, tipo de intervención y políticas públicas relacionadas.

Estudios farmacoeconómicos enfocados en la estimación del coste de enfermedad

De los 150 artículos revisados, se identificaron 20 estudios centrados en la estimación del coste de la enfermedad (COI), cuyos principales hallazgos se presentan en la tabla 1. Estos estudios se caracterizan por su enfoque en la contención de costos, predominando los diseños prospectivos, seguidos de ambispectivos, y utilizando mayoritariamente muestreos por prevalencia. En cuanto a su temporalidad, los estudios se distribuyen entre análisis transversales y longitudinales. Las herramientas más empleadas incluyen análisis estadísticos específicos para COI (8 de 20 estudios) que destacan por ser la categoría con mayor bibliografía disponible, lo que permite una comparación más robusta entre sus resultados. Estos análisis integran herramientas como la búsqueda en bases de datos específicas y metodologías estadísticas avanzadas, aportando una visión amplia y detallada del impacto económico de las enfermedades relacionadas con el abuso de sustancias. Sin embargo, una de sus principales limitaciones radica en las discrepancias metodológicas entre estudios, así como en la considerable extensión temporal y de recursos que requieren, lo que puede dificultar su ejecución y comparación directa. A pesar de estas limitaciones, los estudios de COI representan una base sólida para comprender los costos asociados al abuso de sustancias y diseñar estrategias de intervención más eficientes.

Por otro lado, 3 estudios de 20 emplearon el Drug Abuse Treatment Cost Analysis Program **(DATCAP)**, que es una herramienta metodológica diseñada para estimar de manera estandarizada los costos de los programas de tratamiento para trastornos por consumo de sustancias. Se emplea mediante la recopilación sistemática de información sobre los recursos utilizados en los centros de atención, como personal, infraestructura, servicios clínicos, materiales y gastos administrativos, con el fin de calcular el costo real de los servicios ofrecidos, ya sea por paciente o por programa. Su uso permite identificar cómo se distribuyen los recursos dentro de un tratamiento y comparar los costos entre distintas modalidades de intervención, como programas ambulatorios o residenciales. Entre sus principales ventajas se encuentran la estandarización del análisis de costos, la posibilidad de obtener una estimación integral de los recursos utilizados y la generación de información comparable entre diferentes estudios o centros de tratamiento, lo que facilita la evaluación económica de las intervenciones y contribuye a la toma de decisiones en la gestión de servicios y en el diseño de políticas públicas relacionadas con las adicciones.

SUSTANCIA DE INTERÉS	TIPO DE ESTUDIO	TÉCNICAS DE COSTEO	OBSERVACIONES	REFERENCIA
ALCOHOL	Prospectivo Longitudinal Muestreo por incidencia Estudio de contención con enfoque institucional	Estimación de costos directos e indirectos de los pacientes	País: Estados Unidos 218,018 pacientes	Rice et al., 1991 (19)
COCAÍNA	Ambispectivo Longitudinal Muestreo por incidencia Estudio de contención con enfoque al paciente	Estadística de los 400 pacientes	País: Estados Unidos 127 pacientes	Ayvaci, 2005 (20)
DROGAS EN GENERAL	Prospectivo Longitudinal Muestreo por incidencia Estudio de contención con enfoque institucional	Costos directos e indirectos de las instituciones	País: Chile Sin datos de pacientes	Fernández, 2013 (21)
	Prospectivo Longitudinal Muestreo por prevalencia Estudio de contención con enfoque al paciente	DATCAP	País: Estados Unidos 678 pacientes	McCollister y French, 2003 (22)
	Ambispectivo Longitudinal Muestreo por incidencia Estudio de contención con enfoque institucional	Costos directos e indirectos relacionados y no relacionados con la salud de los pacientes	País: España Sin datos de pacientes	Rivera et al., 2017 (23)
	Ambispectivo Longitudinal Muestreo por incidencia Estudio de contención con enfoque institucional	DATCAP, SASCAP y TCAT	País: Estados Unidos Sin datos de pacientes	Duffy, 2013 (24)
	Prospectivo Transversal Muestreo por incidencia Estudio de contención con enfoque institucional	Método del capital humano Método del costo por fricción Método de disposición a pagar	País: Estados Unidos Sin datos de pacientes	Jo, 2014 (25)
	Ambispectivo Transversal Muestreo por incidencia Estudio de contención con enfoque institucional	Análisis estadístico de micro y macro costos	País: Estados Unidos Sin datos de pacientes	Lipscomb et al., 2009 (26)
	Prospectivo Transversal Muestreo por incidencia Estudio de contención con enfoque al paciente	Cuestionario sobre costos del hogar y comportamiento de búsqueda de tratamiento	País: Estados Unidos Sin datos de pacientes	Hansen & Yeung, 2009 (27)
	Retrospectivo Transversal Muestreo por incidencia Estudio de contención con enfoque institucional	Revisión bibliográfica en Pubmed	País: Estados Unidos Sin datos de pacientes	Cartwright, 2008 (28)
	Prospectivo Transversal Muestreo por incidencia Estudio de contención con enfoque al paciente	Cuestionarios estadísticos de los pacientes	País: Reino Unido Sin datos de pacientes	Thompson, S, 2001 (29)
	Prospectivo Transversal Muestreo por incidencia Estudio de contención con enfoque al paciente	Ensayo controlado aleatorio	País: Estados Unidos 592 pacientes	Weisner,C, 2001 (30)
	Prospectivo Transversal Muestreo por prevalencia Estudio de contención con enfoque institucional	DATCAP STATA	País: Estados Unidos Sin datos de pacientes	French, M, 2008 (31)
	Prospectivo Longitudinal Muestreo por prevalencia Estudio de contención con enfoque institucional	Recopilación de cuestionarios y datos en Croacia	País: Croacia Sin datos de pacientes	Švaljek, S, 2014 (32)
	Prospectivo Transversal Muestreo por prevalencia Estudio de contención con enfoque al paciente	Uso de bases de datos con información del costo del tratamiento y de los pacientes y uso de análisis estadísticos	País: Estados Unidos Sin datos de pacientes	Substance Abuse and Mental Health Services Administration (SAMHSA) 2003 (33)
	Prospectivo Transversal Muestreo por prevalencia Estudio de contención con enfoque institucional	Recolección de datos y análisis estadísticos	Continente: Europa Sin datos de pacientes	EMCDDA, 2017 (35)

	Prospectivo Transversal Muestreo por prevalencia Estudio de contención con enfoque institucional	Recolección de datos y análisis estadísticos	Continente: Europa Sin datos de pacientes	Pacula, R, 2009 (36)
	Prospectivo Longitudinal Muestreo por prevalencia Estudio de contención con enfoque institucional	Recolección de información de fuentes de salud y análisis estadístico	Países: República Checa, Italia, Portugal. España Sin datos de pacientes	Vopravil, 2013 (37)
	Retrospectivo Longitudinal Muestreo por prevalencia Estudio de contención con enfoque institucional	Análisis estadístico con bases de datos	País: Portugal Sin datos de pacientes	Gonçalves & Barros, 2009 (38)
	Retrospectivo Transversal Muestreo por prevalencia Estudio de contención con enfoque institucional	Revisión bibliográfica de COI en Google Scholar, Scopus y Pubmed	País: España Sin datos de pacientes	Alberto Vella et al., 2018 (39)

Tabla 1. *Estudios farmacoeconómicos enfocados en COI.*

Estudios farmacoeconómicos enfocados en la estimación coste-efectividad

Los estudios de CEA destacan por la aplicabilidad de sus metodologías, lo que facilita su reproducibilidad incluso cuando los análisis tienen varios años de diferencia. Se identificaron 5 estudios centrados en la estimación de coste-efectividad (CEA), cuyas características principales se resumen en la tabla 2. La mayoría de estos estudios se clasifica como investigaciones de contención (un tipo de análisis económico que se enfoca en identificar estrategias para reducir o controlar los costos asociados a una enfermedad o intervención) con diseños ambispectivos y muestreos por prevalencia. En términos de temporalidad, abarcan tanto análisis transversales como longitudinales, lo que permite evaluar la relación entre costos y efectividad en diferentes horizontes de tiempo. Una de las herramientas más empleadas en este tipo de estudios es el WHO-CHOICE analysis (empleado en 2 de los 5 estudios), que proporciona un marco metodológico establecido para realizar evaluaciones consistentes. Sin embargo, aunque las metodologías utilizadas presentan similitudes entre sí, existe una necesidad imperante de actualizarlas y estandarizarlas para garantizar la precisión y la relevancia de los análisis farmacoeconómicos en contextos actuales. Estas mejoras permitirían obtener una comprensión más detallada de la relación coste-efectividad de los tratamientos y fortalecer su utilidad en la toma de decisiones de políticas de salud.

SUSTANCIA DE INTERÉS	TIPO DE ESTUDIO	TÉCNICAS DE COSTEO	OBSERVACIONES	REFERENCIA
ALCOHOL	Ambispectivo Transversal Muestreo por prevalencia Estudio de contención con enfoque institucional	WHO-CHOICE	País: México Sin datos de pacientes	Medina-Mora, 2010 (40)
COCAÍNA Y ALCOHOL	Ambispectivo Longitudinal Muestreo por prevalencia Estudio de contención con enfoque al paciente	Intervención estándar del NIDA (Instituto Nacional sobre el Abuso de Drogas)	País: Estados Unidos 420 pacientes	Ruger et al., 2012 (41)
DROGAS EN GENERAL	Prospectivo Longitudinal Muestreo por incidencia Estudio de contención con enfoque institucional	DATCAP ASI	País: Estados Unidos 431 pacientes	Sindelar et al., 2004 (42)
	Ambispectivo Longitudinal Muestreo por prevalencia Estudio de contención con enfoque al paciente	Análisis WHO-CHOICE, análisis de coste-efectividad DISMOD	País: Suiza Sin datos de pacientes	Tan-Torres et al., 2003 (43)
	Ambispectivo Transversal Muestreo por prevalencia Estudio de contención con enfoque institucional	Ensayos aleatorizados por conglomerados	País: Estados Unidos Sin datos de pacientes	Gomes et al., 2012 (44)

Tabla 2. *Estudios farmacoeconómicos enfocados en CEA.*

Estudios farmacoeconómicos enfocados en la estimación coste-beneficio

Se identificaron 5 estudios de estimación de coste-beneficio (CBA), cuyas principales características se presentan en la tabla 3. La mayoría de estos estudios son de contención con diseños prospectivos y muestreo por prevalencia, abarcando tanto análisis transversales como longitudinales. 2 de los 5 estudios emplearon la herramienta DATCAP.

Sin embargo, 3 estudios optaron por otras metodologías centradas en la búsqueda de información en bases de datos y análisis estadísticos. Estos enfoques, aunque complementarios, evidenciaron discrepancias significativas entre sus resultados para la estimación de costos, atribuibles en parte a la ambigüedad en sus metodologías y a una revisión insuficiente de las bases de datos consultadas. Estas limitaciones plantean dudas sobre la solidez de los resultados obtenidos y subrayan la necesidad de estandarizar los procedimientos para garantizar la calidad y fiabilidad de los análisis de coste-beneficio en futuros estudios.

SUSTANCIA DE INTERÉS	TIPO DE ESTUDIO	OBSERVACIONES	REFERENCIA
MARIHUANA	Retrospectivo Transversal Muestreo por prevalencia Estudio de contención con enfoque al paciente	Revisión de 8 bases de datos médicas y económicas País: Estados Unidos Sin datos de pacientes	Herzog, S, 2018 (45)
METADONA	Prospectivo Longitudinal Muestreo por incidencia Estudio de contención con enfoque institucional	País: Estados Unidos Sin datos de pacientes	Schwartz, R, 2014 (46)
DROGAS EN GENERAL	Prospectivo Longitudinal Muestreo por prevalencia Estudio de contención con enfoque institucional	DATCAP ASI País: Estados Unidos 178 pacientes	French, M, 2002 (47)
	Prospectivo Longitudinal Muestreo por prevalencia Estudio de contención con enfoque institucional	DATCAP SASCAP País: Estados Unidos Sin datos de pacientes	Cartwright, W, 2008 (48)
	Prospectivo Transversal Muestreo por prevalencia Estudio de contención con enfoque institucional	Análisis de costo-beneficio País: Estados Unidos Sin datos de pacientes	Kim, S, 1995 (49)

Tabla 3. *Estudios farmacoeconómicos enfocados en CBA.*

Estudios farmacoeconómicos enfocados en la estimación del coste utilidad

Se identificó un único estudio de estimación de coste utilidad (CU), cuyos detalles se resumen en la tabla 4. Este estudio, clasificado como de contención, utilizó un diseño ambispectivo con una epidemiología basada en incidencia y una temporalidad longitudinal. Para su desarrollo se emplearon herramientas como análisis estadísticos y una revisión bibliográfica exhaustiva. No obstante, la disponibilidad de un solo estudio de este tipo limita la posibilidad de establecer comparaciones amplias o identificar tendencias metodológicas claras en el uso de estas herramientas. Aunque esta situación no invalida los resultados ni las conclusiones del estudio analizado, sí indica la necesidad de contar con más investigaciones similares que permitan contextualizar mejor los hallazgos y fortalecer la evidencia disponible sobre los análisis de coste utilidad en el tratamiento de las adicciones.

SUSTANCIA DE INTERÉS	TIPO DE ESTUDIO	OBSERVACIONES	REFERENCIA
ALCOHOL Y OPIOIDES	Ambispectivo Longitudinal Muestreo por incidencia Estudio de contención con enfoque institucional	Revisión bibliográfica y análisis estadísticos País: Estados Unidos Sin datos de pacientes	Gastfriend, D, 2014(50)

Tabla 4. *Estudio farmacoeconómico enfocados en coste-utilidad (CU).*

Conclusión

La presente revisión tuvo como objetivo describir las principales tendencias metodológicas en los estudios farmacoeconómicos aplicados al tratamiento de las adicciones, sin pretender evaluar la calidad o validez de las metodologías utilizadas. A partir del análisis de la literatura disponible, se identificó que los enfoques más frecuentes corresponden a estudios de coste de la enfermedad (COI), seguidos por análisis de coste-efectividad (CEA) y coste-beneficio (CBA), mientras que los análisis de coste-utilidad (CU) son escasos. En términos de diseño, predominan los estudios prospectivos y ambispectivos, con muestreos basados principalmente en prevalencia y, en menor medida, en incidencia. Asimismo, se observó el uso recurrente de enfoques de contención de costos y de herramientas metodológicas específicas como DATCAP y WHO-CHOICE, así como el empleo de análisis estadísticos y bases de datos institucionales para la estimación de costos. Estas tendencias reflejan una diversidad metodológica considerable, lo que en algunos casos dificulta la comparación entre estudios y la interpretación conjunta de sus resultados.

Entre los aspectos que emergen de la revisión se encuentran la disponibilidad limitada y la variabilidad de los datos, así como la heterogeneidad en la estimación de costos y en los enfoques analíticos empleados. Un elemento particularmente relevante es la falta de estandarización en la cuantificación de los costos asociados al consumo de sustancias, especialmente en lo relativo al costo social de las drogas, que incluye costos públicos, privados y externos (51). Estos abarcan tanto costos tangibles, como los relacionados con la atención médica, la seguridad y la pérdida de productividad, como costos intangibles, entre ellos el dolor humano y las pérdidas emocionales derivadas de muertes prematuras asociadas al consumo de sustancias (52). La inclusión variable de estas dimensiones en los estudios revisados contribuye a la diversidad de resultados observados.

La revisión también muestra que gran parte de la evidencia disponible proviene de Estados Unidos y Europa, lo que evidencia una concentración geográfica en la producción de estudios farmacoeconómicos sobre adicciones. En el caso de México, se identificó únicamente un estudio que emplea una metodología desarrollada por la Organización Mundial de la Salud, la cual constituye una aproximación relevante para este tipo de análisis, aunque en muchos casos los procedimientos y cálculos utilizados no se describen con suficiente detalle, lo que limita su análisis metodológico y su posible replicación.

Los resultados de esta revisión permiten identificar patrones metodológicos en la forma en que se han desarrollado los estudios farmacoeconómicos sobre adicciones y evidencian áreas donde la evidencia aún es limitada. En particular, la escasa presencia de investigaciones en contextos latinoamericanos y, específicamente, en México, pone de manifiesto la necesidad de impulsar estudios locales con metodologías claras y transparentes, adaptadas a la realidad social y económica del país.

Promover este tipo de investigaciones no solo contribuiría a ampliar la base de conocimiento disponible, sino también a mejorar la comprensión del impacto económico de las adicciones y a orientar de manera más informada la asignación de recursos y el diseño de estrategias de tratamiento en el ámbito de la salud pública.

Referencias

1. Koob GF, Le Moal M. Neurobiology of addiction. London: Academic Press; 2006.
2. Caballero F. Las drogas: educación y prevención. Madrid: Editorial Síntesis; 2010.
3. Echeverría L, Carrascoza C, Reidi L. Prevención y tratamiento de conductas adictivas. Ciudad de México: UNAM Facultad de Psicología; 2007.
4. Guerra-Hernández I. Fases del proceso adictivo según la Organización Mundial de la Salud. Publicación semestral [Internet]. 2023;10(19):62-4. Disponible en: https://repository.uaeh.edu.mx/revistas/index.php/prepa3/issue/archive
5. Lüthi A, Lüscher C. Pathological circuit function underlying addiction and anxiety disorders. Nat Neurosci. 2014;17:1635-43.
6. Koob GF. Addiction: neurobiological mechanism. New York: Springer; 2009.
7. Delgado MR, Rigney A. Reward systems: human. In: Reference Module in Biomedical Sciences. Amsterdam: Elsevier; 2015.
8. Cuadrado ÁI. Genética de las adicciones. Adicciones. 2008;20.
9. Sánchez Huesca R, Templos Núñez LB. Una mirada a la genética y epigenética en adicción a sustancias. Rev Int Investig Adicciones. 2022;8(1):51-6.
10. Correa JP, Guerra VM, Puertas SN, et al. Personality traits and psychological inflexibility in alcohol addicts. Asunción (Paraguay). 2022;19(1):22-38.
11. Fernández Miranda JJ, director; Arias F, Cortés M, coordinadores. Comorbilidad psiquiátrica en adicciones: vademécum. Barcelona: Socidrogalcohol; 2019.
12. Spitzer RL, Endicott J, Robins E. Clinical criteria for psychiatric diagnosis and DSM-III. Am J Psychiatry. 1975;132(11):1187-92.
13. Morrison J. DSM-5: guía para el diagnóstico clínico. México: Manual Moderno; 2014.
14. Samet S, Waxman R, Hatzenbuehler M, Hasin DS. Assessing addiction: concepts and instruments. 2007.
15. Yang BZ, Wang LJ, Huang MC, Wang SC, Tsai MC, Huang YC, et al. Diagnostic reliability and validity of the semi-structured assessment for drug dependence and alcoholism (SSADDA) Chinese version. Complex Psychiatry. 2020;6(3-4):62-7.
16. INEFSO. ¿Qué papel juega la intervención psicosocial en el tratamiento de las adicciones? 2023.
17. Secretaría de Salud. Norma Oficial Mexicana NOM-028-SSA2-2009 para la prevención, tratamiento y control de las adicciones. Ciudad de México: Secretaría de Salud; 2009.
18. Soto Álvarez J. Estudios de farmacoeconomía: ¿por qué, cómo, cuándo y para qué?. Medifam. 2001; 11(3): 67-83.
19. Rice DP, Kelman S, Miller LS. Estimates of economic costs of alcohol and drug abuse. Public Health Rep. 1991;106(3):280-92.
20. Ayvaci ER, Pollio DE, Hong BA, North CS. Longitudinal cost of services in a homeless sample with cocaine use disorder. J Soc Distress Homeless. 2019; 28:132-8.
21. Fernández M. The socioeconomic cost of illicit drug consumption in Chile. CEPAL Rev. 2013; 107:87-105.
22. McCollister KE, French MT, Pyne JM, Booth B, Rapp R, Carr C. The cost of treating addiction from the client's perspective: results from a multi-modality application of the client DATCAP. Drug Alcohol Depend. 2009;104(3):241-8.
23. Rivera B, Casal B, Currais L. The social cost of illicit drugs use in Spain. Int J Drug Policy. 2017; 44:92-104.
24. Duffy SQ. Economic analysis of addiction treatment programs. In: Miller PM, editor. *Interventions for Addiction*. Amsterdam: Academic Press; 2013. p. 599-609. doi:10.1016/B978-0-12-398338-1.00062-2
25. Jo C. Cost-of-illness studies: concepts, scopes and methods. Clin Mol Hepatol. 2014;20(4):327-37.
26. Lipscomb J, Yabroff KR, Brown ML, Lawrence W, Barnett PG. Health care costing: data, methods, current applications. Med Care. 2009;47(Suppl 1): S1-6.
27. Hansen KS, Yeung S. ACT consortium guidance on collecting household costs: example questionnaire for household costs and treatment seeking behavior. 2009.

28. Cartwright WS. Economic costs of drug abuse: financial, cost of illness and services. J Subst Abuse Treat. 2008;34(2):224-33.
29. Thompson S, Wordsworth S. An annotated cost questionnaire for completion by patients. Health Economics Research Centre (HERC), University of Oxford; 2001.
30. Weisner C, Mertens J, Parthasarathy S, Moore C, Lu Y. Integrating primary medical care with addiction treatment: a randomized controlled trial. JAMA. 2001;286(14):1715-23.
31. French MT, Popovici I, Tapsell L. The economic costs of substance abuse treatment: updated estimates and cost bands for program assessment and reimbursement. J Subst Abuse Treat. 2008;35(4):462-9.
32. Švaljek S, Budak J. The structure of public spending on drug policy in Croatia: what are the priorities? Drustvena Istrazivanja. 2014;23(3):407-25.
33. Substance Abuse and Mental Health Services Administration. The ADSS cost study: costs of substance abuse treatment in the specialty sector. Rockville: SAMHSA; 2003.
34. Davies C. Recent trends of drug-related public expenditure. En: Department of Health. United Kingdom drug situation: annual report to the European Monitoring Centre for Drugs and Drug Addiction (EMCDDA) 2012. London: Department of Health; 2012.
35. European Monitoring Centre for Drugs and Drug Addiction. Drug treatment expenditure: a methodological overview. Luxembourg: EMCDDA; 2017.
36. Pacula RL, Hoorens S, Kilmer B, Reuter PH, Burgdorf JR, Hunt P. Issues in estimating the economic cost of drug abuse in consuming nations. Santa Monica: RAND Corporation.
37. Vopravil J. Illicit drug market and its economic impact. 2013.
38. Gonçalves R, Barros PP. Economies of scale and scope in the provision of diagnostic techniques and therapeutic services in Portuguese hospitals. 2009.
39. Vella V, García-Altes A, Segura García L, Ibáñez Martínez N, Colom Farran J. Systematic review of guidelines in estimating social costs on drugs. Gac Sanit. 2018;32:481-7.
40. Medina-Mora ME, García-Téllez I, Cortina D, Orozco R, Robles R, Vázquez-Pérez L, et al. Estudio de costo-efectividad de intervenciones para prevenir el abuso de alcohol en México. Salud Ment. 2010;33(5):373-8.
41. Ruger JP, Abdallah AB, Luekens C, Cottler L. Cost-effectiveness of peer-delivered interventions for cocaine and alcohol abuse among women: a randomized controlled trial. PLoS One. 2012;7(3).
42. Sindelar J, Jofre-Bonet M, French MT, McLellan AT. Cost-effectiveness analysis of addiction treatment: paradoxes of multiple outcomes. Drug Alcohol Depend. 2004;73(1):41-50.
43. Tan-Torres Edejer T, Baltussen R, Adam T, Hutubessy R, Acharya A, Evans DB, et al. WHO guide to cost-effectiveness analysis. Geneva: World Health Organization; 2003.
44. Gomes M, Grieve R, Nixon R, Edmunds WJ. Statistical methods for cost-effectiveness analyses that use data from cluster randomized trials: a systematic review. Med Decis Making. 2012; 32:209-20.
45. Herzog S, Shanahan M, Grimison P, Tran A, Wong N, Lintzeris N, et al. Systematic review of the costs and benefits of prescribed cannabis-based medicines for the management of chronic illness. Pharmacoeconomics. 2018; 36:67-78.
46. Schwartz RP, Alexandre PK, Kelly SM, O'Grady KE, Gryczynski J, Jaffe JH. Interim versus standard methadone treatment: a benefit-cost analysis. J Subst Abuse Treat. 2014;46(3):306-14.
47. French MT, Salomé HJ, Sindelar JL, McLellan AT. Benefit-cost analysis of addiction treatment: methodological guidelines and empirical application using the DATCAP and ASI. Health Serv Res. 2002;37(2):433-55.
48. Cartwright WS. A critical review of accounting and economic methods for estimating the costs of addiction treatment. J Subst Abuse Treat. 2008;34(3):302-10.
49. Kim S, Coletti SD, Crutchfield CC, Williams C, Hepler N. Benefit-cost analysis of drug abuse prevention programs: a macroscopic approach. J Drug Educ. 1995;25(2):111-27.
50. Gastfriend DR. A pharmaceutical industry perspective on the economics of treatments for alcohol and opioid use disorders. Ann N Y Acad Sci. 2014; 1327:112-30.
51. Reuter P. What drug policies cost: estimating government drug policy expenditures. Addiction. 2006;101(3):315-22.
52. Nutt D, King LA, Saulsbury W, Blakemore C. Development of a rational scale to assess the harm of drugs of potential misuse. Lancet. 2007; 369:1047-53.

Tu ADN puede revelar tu edad. Una herramienta genética para la identificación forense

Cano-Ravell Alan[1], Moreno-Ortiz José Miguel[2], Flores-López Beatriz Armida[3]✉

[1]Maestría en Genética Forense e identificación Humana. Centro Universitario de Ciencias de la Salud. Universidad de Guadalajara.

[2]Instituto de Genética Humana "Dr. Enrique Corona Rivera". Departamento de Biología Molecular y Genómica. Centro Universitario de Ciencias de la Salud. Universidad de Guadalajara.

[3]Departamento de Ciclo de Vida. Facultad de Medicina. Universidad Autónoma de Guadalajara.

✉beatriz.flores@edu.uag.mx

Datos del artículo
Cita

Cano-Ravell A, Moreno-Ortiz JM, Flores-López BA. Tu ADN puede revelar tu edad. Una herramienta genética para la identificación forense. ReCiF. 2026;(2):26–35.

Editor
Alexa Villavicencio Queijeiro

Revisión por pares
Dos

Recibido
17/diciembre/2025

Aceptado
28/abril/2026

Publicado
30/octubre/2026

Creative Commons Atribución: CC-BY-NC-SA 4.0 Internacional

Resumen

Imagina que el material genético (ADN) que está en las células de todos los humanos es un libro de instrucciones, donde su texto nunca cambia a lo largo de la vida, pero sí los signos de puntuación. Estos signos de puntuación son la "epigenética" y un ejemplo de ésta es la metilación del ADN. La metilación es un mecanismo que puede regular cuándo y cómo se leen esas instrucciones. Lo interesante es que, la metilación del ADN puede cambiar a lo largo de la vida de forma predecible, permitiendo calcular la edad de una persona, por ejemplo, cuando se estudian muestras de ADN provenientes de tejidos como sangre, huesos y dientes. En los últimos años, este tipo de análisis ha sido clave para la resolución de problemas forenses por su efectividad como predictores de edad. El objetivo de este artículo es explicar brevemente qué es la metilación del ADN como mecanismo epigenético y describir su aplicación en el ámbito forense, particularmente para la estimación de edad.

Palabras clave: ADN, Epigenética, Metilación, Predicción de edad.

Abstract

Imagine that the genetic material (DNA) that is in cells from all humans is an instruction manual where the texts in it never changes throughout life, but the punctuation marks do. These punctuation marks are "epigenetics", and an example of this is the DNA methylation. DNA methylation is a mechanism that regulates when and how those instructions are read. Interestingly, DNA methylation can change predictably throughout life, allowing us to estimate the age of a person, for example, when studying DNA samples from tissues as blood, bones, and teeth. In recent years, this type of analysis has been crucial for solving forensic problems due to its effectiveness as an age predictor. The aim of this article is to briefly explain what DNA methylation is as an epigenetic mechanism and to describe its application in forensic science, particularly for age estimation.

Key words: Age Prediction, DNA, Epigenetics, Methylation.

Introducción

Identificar la edad de una persona es una de las tareas más importantes en el ámbito forense, ya que es una herramienta clave para la resolución de casos (1). Existen diversas formas de calcular o estimar la edad de una víctima o de un sospechoso, entre las que se incluyen analizar el tamaño de algunos huesos o de piezas dentales, pero no en todos los casos es posible (2). En ocasiones no se cuenta con restos o piezas completas para determinar edad (3), además, estas técnicas tienen un margen de error de 5 a 10 años (4), sobre todo en edad adulta donde los cambios esqueléticos se vuelven más difíciles de analizar y correlacionar con la edad cronológica debido a la alta variabilidad en los procesos de envejecimiento (5). En estas situaciones, el estudio del ácido desoxirribonucleico (ADN) es una propuesta valiosa para la estimación de edad (1,2).

Para la identificación humana tradicionalmente se utiliza el análisis de secuencias específicas del ADN, ya que funcionan como códigos de barras únicos para cada individuo, a esto se le llama "perfiles genéticos", mismos que permanecen idénticos a lo largo de la vida (6,7). Por otro lado, el perfil biológico corresponde al conjunto de características biológicas determinadas a partir de los restos humanos, y que describen al individuo en vida, particularmente, en el momento de su muerte (8), dichas características, son la edad, el sexo, la estatura y la ancestría, en conjunto, el perfil biológico y el perfil genético abonan a la resolución de casos forenses (9).

Una rama de la genética relativamente nueva es la epigenética, encargada de estudiar las modificaciones químicas del ADN, que no afectan la secuencia, sino que funcionan como marcas o signos de puntuación. A diferencia del perfil genético, la epigenética sí cambia a medida que envejecemos. Dentro de los cambios químicos que pueden ocurrir en el material genético se encuentra la metilación del ADN (7,10).

Dado que la metilación cambia conforme avanza la vida, y gracias a los avances en investigación científica, se han desarrollado nuevas herramientas genéticas para estimar la edad de una persona con base en los patrones específicos de metilación del ADN. Este método ha cobrado fuerza en los últimos años en el ámbito forense, ya que estimar la edad de una persona a partir de restos biológicos puede ser, en ocasiones, el punto clave para la resolución de un hecho delictivo o de la identificación de personas desaparecidas (10).

El ADN y la metilación

Para hablar de metilación tenemos que definir qué es el ADN. El ácido desoxirribonucleico, mejor conocido como ADN, es la molécula básica de la herencia, formada por unidades pequeñas, llamadas nucleótidos y que representamos con letras: A (adenina), T (timina), G (guanina) y C (citosina). El ADN se encuentra en todas las células de nuestro cuerpo en forma de una doble hélice que se asemeja a una escalera de caracol, donde cada par de letras representa un escalón (6).

La hélice del ADN es una molécula compuesta por la unión de dos cadenas antiparalelas (que se contraponen) y se enrollan entre sí formando una cadena en doble hélice. Cada hebra se compone de una cadena consecutiva de nucleótidos, formados por una pentosa (desoxirribosa) a la que se une una base nitrogenada, que puede ser una purina (A y G) o una pirimidina (C o T), a la pentosa se une también un grupo fosfato que sirve para formar el enlace fosfodiéster, que une a un nucleótido con otro (Figura 1). Ahora bien, las dos hebras se unen entre sí mediante puentes de hidrógeno entre las bases nitrogenadas, y tienen una complementariedad específica, donde la A se une únicamente con la T y la C

con la G (Figura 1), por lo que la secuencia de bases nitrogenadas de una hebra tiene que ser complementaria con las bases de la otra hebra de ADN para formar la doble hélice (6).

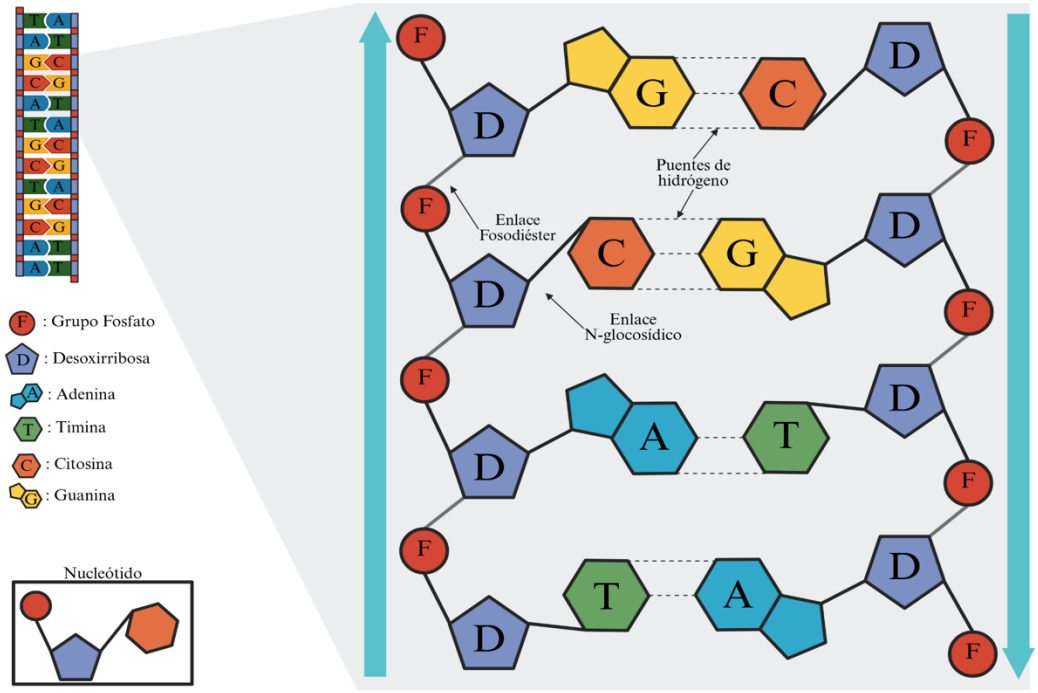


Figura 1. *Estructura molecular de la doble hélice del ADN. Las flechas azules representan la dirección de cada cadena de la doble hélice. Creada en BioRender Gyc, L. (2026).*

La metilación del ADN, por su parte, es una modificación química, natural en el organismo. Ocurre por la adición de grupos metilo (-CH_3) a las citosinas (C) seguidas de guanina (G) en la cadena de ADN. A estas regiones se les denomina sitios CpG (Figura 2), y cuando en el ADN hay muchos CpG se les conoce como islas CpG. Los grupos metilo son agregados a los sitios CpG por una enzima (proteína que acelera las reacciones químicas en los organismos vivos) llamada ADN metiltransferasa (DNMT, por sus siglas en inglés). Como se había mencionado anteriormente, la metilación funciona en el ADN como signos de puntuación, donde el significado de la secuencia de ADN puede cambiar dependiendo de dónde y cuándo se agregan los grupos metilo (7).

Una de las características de la metilación, es que, es reversible, así como se agrega, también se puede eliminar. La metilación además, está influenciada por factores externos derivados de la dieta; nutrientes como el folato, metionina y colina proporcionan al cuerpo los "donantes del grupo metilo" necesarios para este proceso químico (11). Asimismo, puede ser alterada por la exposición a contaminantes como arsénico, cadmio, humo de tabaco, alcohol, pesticidas, entre otros. De esta manera, existen factores que pueden provocar la hipometilación (disminución de la metilación) o la hipermetilación (aumento de la metilación) del ADN (12).

Una de las funciones de la metilación es regular la manera en que se expresan los genes y desempeña un papel fundamental en el desarrollo, la especialización celular y el envejecimiento. Con la edad, los patrones de metilación cambian de manera predecible, así que, si conocemos la metilación de una persona, podríamos estimar su edad (2,13).

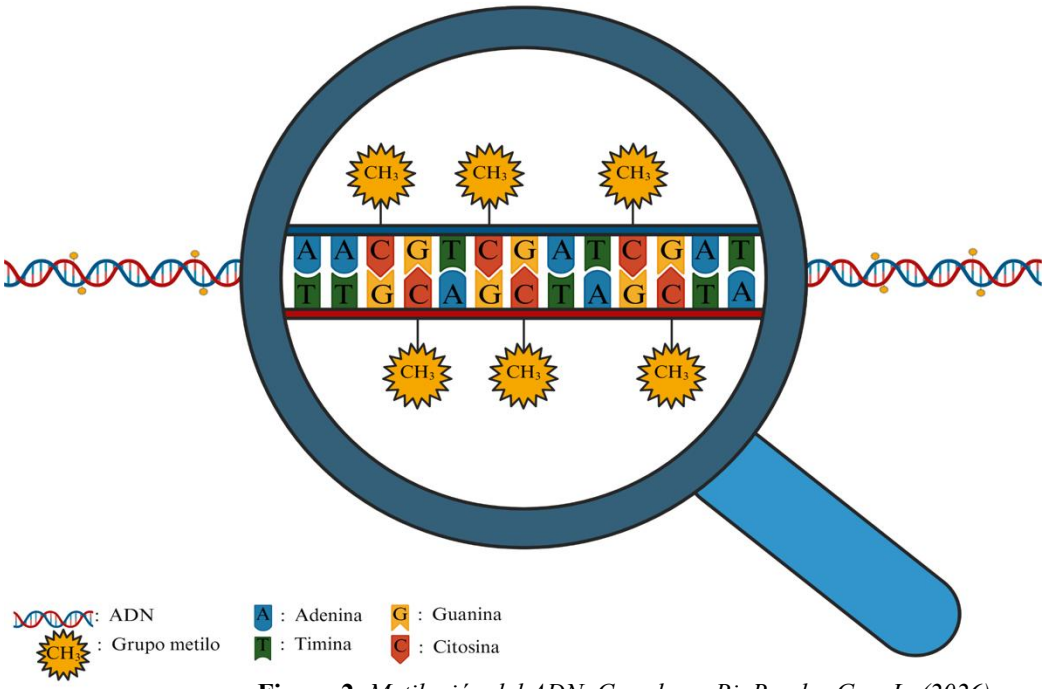


Figura 2. *Metilación del ADN. Creada en BioRender Gyc, L. (2026).*

Aplicaciones forenses de la metilación del ADN

La metilación del ADN tiene relevancia como herramienta adicional en ciencias forenses aportando en materia de criminalística, por ejemplo, al reducir el número de sospechosos al estimar características sobre una muestra biológica en el lugar de los hechos y en antropología forense aportando en la conformación del perfil biológico con la estimación de la edad. A continuación abordaremos ejemplos de las aplicaciones de la metilación del ADN como herramienta complementaria en la práctica forense (14).

Una de las aplicaciones en criminalística, es que, gracias a estudios de metilación, se puede diferenciar entre ADN humano y ADN artificial (material genético creado con técnicas de laboratorio). A diferencia del ADN humano, el ADN artificial no se puede metilar, lo que permite distinguir entre ADN real y ADN artificial. Por otro lado, el patrón de metilación del ADN es altamente específico de los distintos tejidos de una persona, por ejemplo, saliva, sangre o cualquier otro, estos patrones de metilación pueden ser utilizados para identificar de qué tejido proviene una muestra encontrada en una escena del crimen, incluso si son de individuos diferentes, esto a su vez ayudaría a la reconstrucción de un crimen (1).

Por otro lado, en casos de gemelismo, el análisis de metilación del ADN puede permitir diferenciar entre ambos individuos, ya que, como se mencionó anteriormente, la manera en que se metila el ADN depende de diferentes factores (estilo de vida, alimentación, etc.). En el caso de gemelos idénticos, su secuencia ADN es igual, por lo tanto, su perfil genético será indistinguible. Sin embargo, sus patrones de metilación pueden diferir entre ellos, lo que permite diferenciarlos con análisis epigenéticos (14).

Con el estudio de la metilación del ADN se pueden identificar también algunas características de personalidad, por ejemplo, conductas antisociales y agresivas. Se ha demostrado que existe un cambio en el patrón de metilación de ciertos genes en individuos con dichas conductas. Estos cambios se han

asociado a situaciones de estrés y hábitos de consumo, principalmente en madres durante el embarazo (como la drogadicción, tabaquismo, alcoholismo, entre otros), así como situaciones humillantes en la infancia o el abuso durante la crianza. Hoy en día sabemos que estas situaciones pueden promover alteraciones en la programación de metilación normal del cerebro de los menores, ya sea durante el desarrollo o la infancia. Estos cambios promueven el desarrollo de ciertas conductas negativas y pueden ser detectados en una muestra o evidencia dirigiendo y/o reduciendo la búsqueda en casos forenses (15).

Ahora bien, en el caso de la antropología forense, se podría identificar la etnia o el origen biogeográfico de una persona, debido a que existen diferencias en los patrones de metilación del ADN entre distintas poblaciones humanas, mismos que están presentes desde el nacimiento y que permanecen si continúan viviendo en la misma región biogeográfica (1). En este sentido es importante considerar que la metilación no es un marcador estándar de ancestría ya que los cambios pueden deberse al ambiente (16).

Finalmente, estimar la edad, al igual que la etnia, forma parte del perfil biológico que se emplea para la identificación de restos humanos y sospechosos (14). En el ADN existen regiones que se han identificado con patrones de metilación sensibles a la edad, lo que ayuda a predecir la edad biológica con una diferencia máxima de cinco años respecto a la edad real, margen menor comparado con los métodos tradicionales (1).

Relojes epigenéticos

Se han identificado secuencias específicas del ADN donde la metilación cambia sistemáticamente con la edad, agregando o eliminando grupos metilos. El uso de estas secuencias de ADN metiladas o no metiladas para determinar la edad, son llamadas "relojes epigenéticos". Han sido útiles para calcular la edad de una persona a partir de muestras de sangre, dientes, huesos y otros tejidos de restos humanos, lo que es de particular interés por su utilidad en ciencias forenses (10,17).

Los relojes epigenéticos surgieron del estudio del epigenoma humano donde se analizaron patrones de metilación del ADN en posiciones específicas que se relacionan con la edad del individuo. Por otra parte, la edad cronológica es la medida de tiempo desde el nacimiento, y la edad biológica se refiere al estado real y funcional del individuo. Esto último es importante diferenciarlo, porque en ciencias forenses, el objetivo principal es estimar la edad cronológica de un individuo. Los relojes epigenéticos son útiles, por ejemplo, para inferir la edad aproximada de una persona en el momento en que dejó una evidencia biológica o la edad de un individuo al momento de su muerte (2).

Ahora, ¿cómo sabemos tu edad?

El uso de la metilación del ADN para estimar la edad se basa en modelos matemáticos que la relacionan con la cantidad de sitios CpG metilados. Algunos científicos han desarrollado algoritmos de predicción tomando en cuenta la metilación en diferentes órganos y tejidos (13). En el ámbito forense, diversas investigaciones han demostrado que este método es aplicable incluso en muestras antiguas, lo que lo convierte en una herramienta valiosa en la identificación de restos humanos (17).

Para el diseño de métodos de estimación de edad, primero se deben identificar aquellos sitios CpGs específicos en la secuencia de ADN que se asocian con la edad. Algunas pruebas estadísticas utilizadas son el análisis de correlación (Pearson o Spearman) que evalúan los niveles de metilación y se compara con la edad. Esto se puede analizar en regiones pequeñas o hasta enfoques más complejos como los estudios de asociación del epigenoma completo (EWAS) (18). El número de sitios CpG empleados

para la construcción de modelos predictivos de la edad va desde unas decenas hasta varios cientos de sitios, por ejemplo, el modelo propuesto por Hannum con 71 CpGs (19) o el reloj epigenético multi-tejido de Horvath **(20),** basado en 353 CpGs.

Una vez que se conocen las regiones de ADN útiles para calcular la edad, se realizan fórmulas de predicción, donde los niveles de metilación de esas regiones arrojan la edad estimada como resultado (21). Finalmente se realiza la validación estadística de estos modelos predictivos para generalizarse y poderse aplicar en la práctica real. Estos modelos han reportado un estimado de ±3.54 años de error en la predicción de la edad de los modelos, es decir, menor tasa de error que otros métodos para estimar la edad (22).

Gen *ELOVL2* como marcador de edad

Los genes son secuencias de ADN que llevan las instrucciones para realizar las funciones en la célula o en los organismos. Algunos genes son considerados marcadores genéticos, que podrían explicarse como una porción del ADN conocida y específica para estudiar características particulares. Uno de los marcadores epigenéticos asociados con la edad más conocidos y estudiados en este campo es el gen *ELOVL2*, cuya metilación aumenta progresivamente con la edad (Figura 3) (2).

El gen *ELOVL2* se ubica en el cromosoma 6 en la región p24.2 (Figura 3), con una longitud de 63,547 nucleótidos (23,24). Este gen origina una proteína transmembrana involucrada en la síntesis de ácidos grasos poliinsaturados (PUFA) de cadena larga y muy larga, principalmente los omega 3 y omega 6, los cuales son cruciales en múltiples funciones biológicas, tales como la producción de energía, la modulación de la inflamación y el mantenimiento de la integridad de la membrana celular. Debido a las funciones que realiza, se ha visto que desempeña un papel en el proceso de envejecimiento a través de la regulación de diferentes vías biológicas (18).

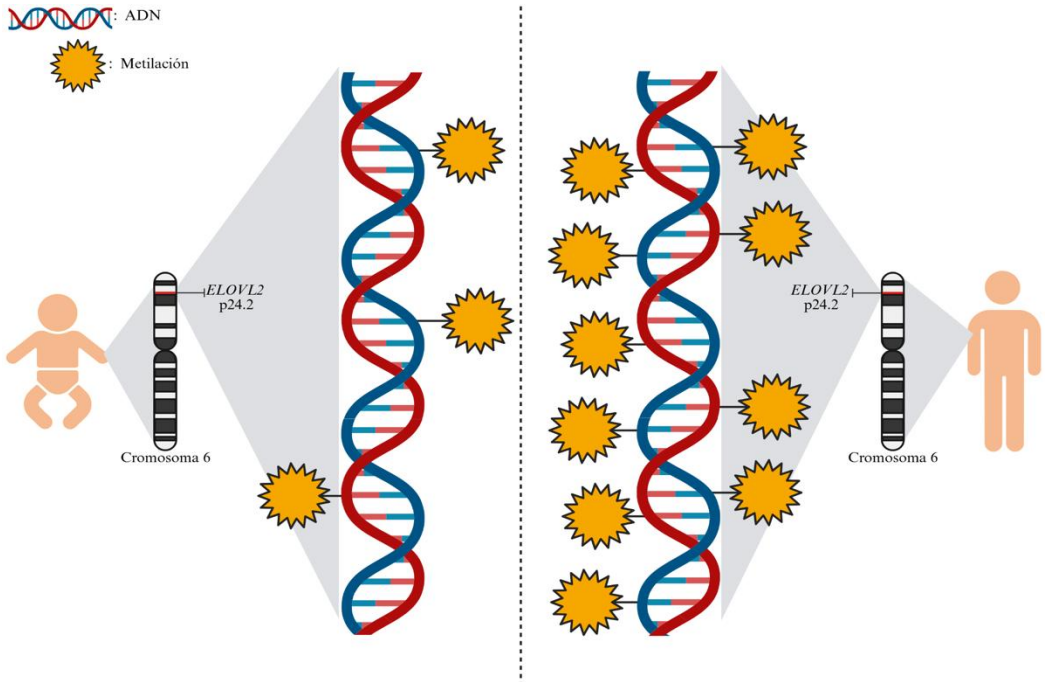


Figura 3. *Cambios en la metilación del gen ELOVL2 según la edad. A mayor edad la metilación aumenta en algunos genes como ELOVL2. Creada en BioRender Gyc, L. (2026).*

La metilación del ADN en *ELOVL2* se ha asociado con el envejecimiento pues provoca la pérdida de sus funciones biológicas (25) se ha visto que este gen se metila del 7% hasta un 91% entre los extremos de la vida (infancia y adultez) (18).

Si bien la metilación del ADN es diferente entre individuos, también puede variar entre órganos del mismo individuo, sin embargo, esto no ocurre con el gen *ELOVL2* (26), ya que el aumento de la metilación es constante en la mayoría de los órganos y tejidos como en la sangre, huesos, saliva, dientes, entre otros (2,27).

Por otra parte, se ha demostrado que la estimación de la edad a partir de la metilación de este gen no tiene diferencias significativas entre hombres y mujeres (23). La metilación, además, se mantiene estable aún en muestras almacenadas a temperatura ambiente, lo que la hace muy útil en casos forenses, ya que se puede medir en ADN obtenido de manchas de sangre de hasta un mes de antigüedad, incluso cuando las muestras han sido almacenadas hasta por cinco, diez o hasta 15 años, sin provocar cambios en los resultados de estimación de la edad (28).

Por las características que presenta la metilación, especialmente en el gen *ELOVL2*, destaca su potencial uso para la estimación de la edad en casos legales y forenses sin resolver. Además de este gen, se han propuesto otros como: *FHL2*, *KLF14*, *TRIM59* y *MIR29B2CHG*, los cuales en conjunto son los marcadores más estudiados actualmente (2,17,21).

Predicción de la edad en México

En un país como México, donde cada vez son más los cuerpos sin identificar en fosas comunes y servicios forenses, la aplicación de relojes epigenéticos podría ayudar con la identificación de cuerpos por grupos de edades. Al estimar la edad de los restos humanos, es posible reducir el número de coincidencias en bases de datos genéticas y facilitar la identificación (2).

Así mismo, esta metodología también podría utilizarse en diversos contextos, tales como violencia, accidentes o desastres naturales, donde los cuerpos pueden encontrarse en estados avanzados de descomposición. Aun cuando las muestras sean antiguas, la metilación permanece relativamente estable, permitiendo medirse, lo que hace que sea una técnica viable para apoyar la identificación forense, y más cuando se complementa con otros métodos como el análisis de la morfología ósea (10,17). Conforme avanza la tecnología de análisis de la metilación, es probable que el uso de marcadores epigenéticos como *ELOVL2* y otros similares se integre cada vez más en las investigaciones forenses (2).

A pesar de los beneficios del análisis de la metilación del ADN, presenta algunos desafíos, por ejemplo, para que los marcadores puedan ser empleados en el ámbito forense, deben presentar propiedades específicas, como la aplicabilidad a diferentes tejidos, estudios poblacionales, la cobertura del espectro de edad y la reproducibilidad en diversas plataformas tecnológicas (14), por lo que es necesario continuar estudiando la metilación del ADN, así como la búsqueda de marcadores epigenéticos para su futura aplicabilidad continua en el sistema judicial del país.

Conclusión

La metilación del ADN representa una herramienta innovadora en México, con un gran potencial en la búsqueda e identificación de personas, tanto víctimas como agresores. Su capacidad para estimar la edad a partir de restos biológicos podría mejorar la eficiencia de los procesos forenses y ofrecer nuevas opciones a las familias que buscan a sus seres queridos, cuando los métodos tradicionales no son suficientes. Por lo cual es necesario invertir en investigación, capacitación y equipamiento forense, por ejemplo, en el apoyo a investigaciones donde se desarrollan estas metodologías en población mexicana. Además, la colaboración entre instituciones gubernamentales, académicas y organizaciones de derechos humanos es clave para su adopción en el sistema de justicia.

En un país donde la desaparición de personas es una crisis humanitaria, la ciencia ofrece herramientas que pueden hacer la diferencia. La metilación del ADN no solo es una muestra del avance de la biotecnología, sino que representa una herramienta complementaria en genética forense, capaz de aportar información adicional, más allá del perfil genético convencional.

Agradecimientos

Agradecemos a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por el apoyo brindado a través del programa de becas de posgrado.

Declaración de uso de IA

Durante la elaboración del presente artículo se utilizó una herramienta para la gestión bibliográfica (Mendeley) para la organización de las referencias bibliográficas, el almacenamiento de la literatura científica y la inserción automática de citas.

Su uso ha sido estrictamente de carácter complementario, con el objetivo de optimizar la calidad y eficacia del documento, en ningún momento ha sustituido el trabajo intelectual, el juicio crítico ni la responsabilidad académica de los autores. Por lo que la autoría y responsabilidad final sobre la totalidad del contenido recae en los autores de este trabajo.

Referencias

1. Rana AK. Crime investigation through DNA methylation analysis: methods and applications in forensics. *Egyptian Journal of Forensic Sciences*. 2018; 8(7): p. 1-17. Disponible en: https://ejfs.springeropen.com/articles/10.1186/s41935-018-0042-1.
2. Naue J. Getting the chronological age out of DNA: using insights of age-dependent DNA methylation for forensic DNA applications. *Genes Genomics*. 2023; 45(10): p. 1239–61. Disponible en: https://link.springer.com/article/10.1007/s13258-023-01392-8
3. Sandoval RA, Lagunes TT de J, Barrientos SC. Predicción de edad mediante la metilación del ADN. Revista Mexicana de Medicina Forense. 2019; 4(1): p. 43–52. Disponible en: https://www.medigraphic.com/pdfs/forense/mmf-2019/mmf191e.pdf
4. Briones-Reyes GL, Meléndez-Wong CA, Sergio FF, Marínez-Martínez MA, Valdés-Abularach LP, Hachity-Ortega JA. Análisis comparativo entre edad cronológica, edad ósea y edad dental en los niños de Torreón, Coahuila. *Revista AMOP*. 2022; 34(1): p. 10–14. Disponible en: https://edicionesberit.com/publicaciones/revista-amop/analisis-comparativo-entre-edad-cronologica-edad-osea-y-edad-dental-en-los-ninos-de-torreon-coahuila/
5. Tawfik Y, Diekmann Y, Orlando L, Burger J, Blöcher J. Promises and limitations of current ancient human epigenetic clocks. *BioRxiv*. 2026; Disponible en: https://doi.org/10.64898/2026.02.04.703756
6. Aristizabal-Franco EA. Tipos de daños moleculares: Una amenaza silenciosa a la estructura del ADN y los genes. Revista *De divulgación científica IBIO*. 2025; 7(1): p. 1–9. Disponible en: https://revistaibio.com/ojs33/index.php/main/article/view/194
7. de la Barreda JN. La Epigenética. Sus mecanismos y significado en la regulación genética. *Cuadernos de Bioética*. 2020; 31(103): p. 405–419. Disponible en: https://aebioetica.org/revistas/2020/31/103/405.pdf
8. Biehler-Gomez L, Giordano G, Sardanelli F, Di Candia D, Cattaneo C. Towards an integrative approach to the biological profile. *Legal Medicine*. 2024; 71(102499): p. 1-5. Disponible en: https://doi.org/10.1016/j.legalmed.2024.102499
9. Sánchez HH, Gómez SEJ, Hernández EMG. Análisis criminalístico del perfil biológico antropológico. *Archivos de Criminología, Seguridad Privada y Criminalística*. 2020. XIV, p. 24–35. Disponible en: https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7188120
10. Recillas TF. Regulación epigenética: conceptos generales. *ciencia*. 2022; 73(4): p. 8–13. Disponible en: https://www.revistaciencia.amc.edu.mx/images/revista/73_4/PDF/Ciencia73-4.pdf
11. Kadayifci FZ, Zheng S, Pan YX. Molecular Mechanisms Underlying the Link between Diet and DNA Methylation. *International Journal of Molecular Sciences*. 2018; 19(12): p. 1–20. Disponible en: https://doi.org/10.3390/ijms19124055
12. Hou L, Zhang X, Wang D, Baccarelli A. Environmental chemical exposures and human epigenetics. *International Journal of Epidemiol*. 2012; 41(1): p. 79–105. Disponible en: 10.1093/ije/dyr154
13. Xiao FH, Wang HT, Kong QP. Dynamic DNA Methylation During Aging: A "Prophet" of Age-Related Outcomes. *Frontiers in Genetics*. 2019; 10(107). Disponible en: https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC6387955/pdf/fgene-10-00107.pdf
14. Castagnola MJ, Medina-Paz F, Zapico SC. Uncovering Forensic Evidence: A Path to Age Estimation through DNA Methylation. International Journal of Molecular Sciences. 2024; 25(4917): p. 1-31. Disponible en: https://doi.org/10.3390/ijms25094917
15. Kanarik M, Sakala K, Matrov D, Kaart T, Roy A, Ziegler GC, et al. MAOA methylation is associated with impulsive and antisocial behaviour: dependence on allelic variation, family environment and diet. *Journal of Neural Transmission*. 2024; 131(1): p. Disponible en: 59–71. 10.1007/s00702-023-02675-w
16. Fleckhaus J, Bugert P, Al-Rashedi NAM, Rothschild MA. Investigation of the impact of biogeographic ancestry on DNA methylation based age predictions comparing a Middle East and a Central European population. *Forensic Sciences International Genetics*. 2023; 67(102923): p. 1-14. Disponible en: https://www.fsigenetics.com/article/S1872-4973(23)00098-4/
17. Manco L, Dias HC. DNA methylation analysis of *ELOVL2* gene using droplet digital PCR for age estimation purposes. *Forensic Science International*. 2022; 333: p. 1-5. Disponible en: https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2022.111206.
18. Garagnani P, Bacalini MG, Pirazzini C, Gori D, Giuliani C, Mari D, Di Blasio AM, Gentilini D, Vitale G, Collino S, Rezzi S, Castellani G, Capri M, Salvioli S, Franceschi C. Methylation of ELOVL2 gene as a new epigenetic marker of age. Aging Cell. 2012; 11(6): p. 1132–1134. Disponible en: https://doi.org/10.1111/acel.12005
19. Hannum G, Guinney J, Zhao L, Zhang L, Hughes G, Sadda S, Klotzle B, Bibikova M, Fan JB, Gao Y, Deconde R, Chen M, Rajapakse I, Friend S, Ideker T, Zhang K. Genome-wide Methylation Profiles Reveal Quantitative Views of Human Aging Rates. *Molecular Cell.* 2013; 49(2): p. 359–367. Disponible en: https://doi.org/10.1016/j.molcel.2012.10.016
20. Horvath S. DNA methylation age of human tissues and cell types. Genome Biology. 2013; 14(10): p. 1-19. Disponible en: https://doi.org/10.1186/gb-2013-14-10-r115
21. Jung SE, Lim SM, Hong SR, Lee EH, Shin KJ, Lee HY. DNA methylation of the *ELOVL2*, *FHL2*, *KLF14*, *C1orf132/MIR29B2C*, and *TRIM59* genes for age prediction from blood, saliva, and buccal swab samples. *Forensic Science International: Genetics*. 2019; 38: p. 1–8. Disponible en: https://doi.org/10.1016/j.fsigen.2018.09.010

22. Ambroa-Conde A, Girón-Santamaría L, Mosquera-Miguel A, Phillips C, Casares de Cal MA, Gómez-Tato A, Álvarez-Dios J, de la Puente M, Ruiz-Ramírez J, Lareu MV, Freire-Aradas A. Epigenetic age estimation in saliva and in buccal cells. *Forensic Science International: Genetics*. 2022; 61(102770): p. 1-10. Disponible en: https://doi.org/10.1016/j.fsigen.2022.102770.
23. El-Shishtawy NM, El Marzouky FM, El-Hagrasy HA. DNA methylation of *ELOVL2* gene as an epigenetic marker of age among Egyptian population. *Egyptian Journal of Medical Human Genetics*. 2024; 25(14): p. 1-8. Disponible en: https://doi.org/10.1186/s43042-024-00477-7
24. O'Leary NA, Cox E, Holmes JB, Anderson WR, Falk R, Hem V, Tsuchiya MTN, Schuler GD, Zhang, X, Torcivia J, Ketter A, Breen L, Cothran J, Bajwa H, Tinne J, Meric PA, Hlavina W, Schneider VA. Exploring and retrieving sequence and metadata for species across the tree of life with NCBI Datasets. *Scientific Data.* 2024; 11(732): p. 1-10. Disponible en: https://doi.org/10.1038/s41597-024-03571-y
25. Li X, Wang J, Wang L, Gao Y, Feng G, Li G, Zou J, Yu M, Li YF, Liu C, Yuan XW, Zhao L, Ouyang H, Zhu JK, Li W, Zhou Q, Zhang K. Lipid metabolism dysfunction induced by age-dependent DNA methylation accelerates aging. *Signal Transduction and Targeted Therapy*. 2022: 7(162): p. 1–12. Disponible en: https://doi.org/10.1038/s41392-022-00964-6
26. Slieker RC, Relton CL, Gaunt TR, Slagboom PE, Heijmans BT. Age-related DNA methylation changes are tissue-specific with *ELOVL2* promoter methylation as exception. *Epigenetics & Chromatin*. 2018; 11(25): p. 1-11. Disponible en: https://doi.org/10.1186/s13072-018-0191-3
27. Pinprasert P, Khacha-ananda S, Narakornsak S, Wunnapuk K. Age-associated DNA methylation changes with hypermethylation *ELOVL2* and *ZYG11A* in dental samples: A pilot study. *ScienceAsia*. 2024; 50(1): p. 1-9. Disponible en: https://doi.org/10.2306/scienceasia1513-1874.2024.028
28. Zbieć-Piekarska R, Spólnicka M, Kupiec T, Makowska Ż, Spas A, Parys-Proszek A, Kucharczyk K, Płoski R, Branicki W. Examination of DNA methylation status of the *ELOVL2* marker may be useful for human age prediction in forensic science. *Forensic Science International: Genetics*. 2015; 14: p. 161–167. Disponible en: https://doi.org/10.1016/j.fsigen.2014.10.002

Rugoscopía: protocolo para la enseñanza en ciencia forense, a partir de una revisión documental

Gil-Chavarría Ivet[1]✉, Loyzance Chantal[1], Huerta Pacheco N. Sofía[1,2]
[1]Escuela Nacional de Ciencias Forenses. Investigación Científica S/N, C.U., Coyoacán, 04510, Ciudad de México, México.
[2]SECIHTI. Av. de los Insurgentes Sur 1582, Crédito Constructor, Benito Juárez, 03940, Ciudad de México, México.
✉ivetgil@enacif.unam.mx

Datos del artículo
Cita

Gil-Chavarría I., Loyzance C., Huerta-Pacheco N.S. Rugoscopía: protocolo para la enseñanza en ciencia forense, a partir de una revisión documental. 2026, (2). 36-48

Editor
Nakahodo Rivera A.C.

Revisión por pares
Uno

Recibido
16/feb/2026

Aceptado
7/mayo/2026

Publicado
30/octubre/2026

Creative Commons CC-BY-NC-SA 4.0 Internacional.

Resumen

La enseñanza de técnicas como la "rugoscopía" en Ciencia Forense, se fundamenta en la revisión bibliográfica sobre el "análisis de rugas palatinas;" lo cual evidencia que existen diversas clasificaciones y protocolos para estudiar, caracterizar o comparar estas estructuras. A partir de eso, surgen cuestionamientos tales como: ¿cuál clasificación usar? y ¿qué aspectos metodológicos reconsiderar para la formación de científicos forenses? Históricamente, el patrón de rugas palatinas ha sido reportado con las mismas propiedades de las crestas dactilares: únicas, perennes, inmutables y clasificables; sin embargo, no se utilizan ni son referencia universal como la dactiloscopia para identificación de personas. Ante ese contexto, nuestro objetivo fue integrar un protocolo a partir de una revisión documental enfocado en clasificaciones previas, retomando las formas de rugas de mayor frecuencia. El protocolo también considera los tipos de registros con los que se puede llevar a cabo el análisis, y se creó una cédula rugoscópica con información gráfica para ayudar al fenotipado o colecta de datos durante la asignación de formas de la clasificación. Un último factor a destacar es que plantea realizar una segunda iteración con el fin de reconocer y en su caso, reportar el error intra-observador que podría sesgar directamente la interpretación, conclusión y/o confronta. El resultado es un protocolo de rugoscopía que incluye diez formas en la clasificación, pensado para la formación de científicos forenses aunque de acceso libre. Cabe mencionar que la estructura e información que lo constituyen, retoma algunos aspectos de la dactiloscopía que facilitan la comprensión, aplicación y el análisis de ese patrón morfológico; precisando que, integra aspectos que atienden la necesidad de llevar a cabo la metodología con mayor rigor científico en investigaciones forenses.

Palabras clave: Rugas palatinas, rugoscopía, protocolo.

Abstract

In Forensic Science, the teaching of techniques such as “rugoscopy” is based on a literature review of “palatal rugae analysis,” which reveals the existence of various classifications and protocols for studying, characterizing, and comparing these structures. This leads to questions such as: Which classification should be used? And what methodological aspects should be reconsidered for the training of forensic scientists? Historically, palatal rugae patterns have been reported to have the same properties as fingerprint ridges: unique, permanent, immutable, and classifiable; however, they are not used as a universal reference like fingerprinting for personal identification. Given this context, our objective was to develop a protocol based on a literature review focused on previous classifications, identifying the most frequent rugae shapes. The protocol also considers the types of records that can be used for the analysis, and a rugoscopy form with graphic information was created to aid in phenotyping or data collection during the classification process. One final point to highlight is that it proposes a second iteration to identify and, if necessary, report intra-observer error that could directly bias the interpretation, conclusion, and/or comparison. The result is a rugoscopy protocol that includes ten classification forms, designed for the training of forensic scientists but freely accessible. It is worth mentioning that its structure and information incorporate some aspects of dactyloscopy, facilitating the understanding, application, and analysis of this morphological pattern; Specifically, it integrates aspects that address the need to carry out the methodology with greater scientific rigor in forensic investigations.

Keywords: Palatal rugae, Rugoscopy protocol, Forensic odontology

Introducción

La rugoscopía ha sido una de las técnicas de la odontología forense, la cual se da a conocer inherentemente en esa área, asociándose al proceso de identificación de personas (1) recurriendo a esta técnica sobre todo cuando hay condiciones extremas o cuando se trata de personas edéntulas y que ya que no es posible construir un perfil de individualización por características dentales (2). Incluso, se ha reportado que las rugas pueden utilizarse como una herramienta biométrica, ya que este patrón distintivo puede también ser complementaria en procesos de identificación, aunque para poder comparar es necesario mantener un registro en vida de las rugosidades palatinas, como modelos dentales o fotografías (3). Cabe mencionar que se expone una controversia porque a diferencia de lo reportado en la literatura sobre la rugoscopía, dicha aplicación no se alinea con los ejes de intervención de la odontología forense establecidos en la “Guía de Especialidades Periciales Federales de la PGR (ahora FGR)” (4), ni en el “Protocolo para el Tratamiento e Identificación Forense” (5). Al no estar establecido qué clasificación y/o protocolo es el adecuado para aprender y desarrollar en la práctica forense de nuestro país, permite plantearnos que quizá no tenemos claridad sobre la utilidad real y/o las limitaciones de esta técnica. Ya que por una parte se le atribuyen cualidades de individualización y siempre se integra a los contenidos temáticos de la odontología forense; sin embargo, en México no ha sido una herramienta que impacte en procesos de identificación de personas, aun cuando es uno de los problemas nacionales con más de 72,100 personas fallecidas no identificadas (6).

En la Escuela Nacional de Ciencias Forenses, como docentes es nuestro deber promover la enseñanza-aprendizaje desde una perspectiva basada en evidencia y crítica científica, motivamos a nuestros alumnos a cuestionarse sobre la aplicabilidad e impacto de la rugoscopía y de cualquier otra técnica. Nuestro modelo educativo se centra en el desarrollo de competencias que se integran en las diez "Actividades Profesionales Confiables del Científico Forense" conocidas como APROCs; y que en el caso de la rugoscopía se relaciona con la APROC 6 que citamos textualmente: "Discute críticamente dictámenes y opiniones de los especialistas forenses"; considerando que ocasionalmente se pueda recurrir a la rugoscopía en la práctica, el científico forense debe ser capaz de realizar actividades asociadas la APROC, que se describen en los siguientes numerales, 6.1. Identifica la información faltante que introduce incertidumbre y reduce la plausibilidad de una teoría del caso; 6.2 Identifica inconsistencias cuando analiza el dictamen o la opinión de un especialista forense, debidas a discrepancias entre el tratamiento del problema y las conclusiones. 6.3 Evalúa los alcances de los procedimientos de análisis forense y de la aplicación de criterios que afectan la calidad de los resultados y de las conclusiones que se derivan de ellos. 6.4 Propone cómo reducir o compensar la incertidumbre y el error de los procedimientos de análisis forense (7).

Por lo anterior, parte de la motivación del presente trabajo fue reconocer ¿qué aspectos pueden hacer a la rugoscopía más eficiente? y atender los sesgos metodológicos; sobre todo, si se considera como "orientativa o complementaria" en un proceso tan complejo y necesario como la identificación de personas vivas o fallecidas. Es así como las preguntas que llevaron al desarrollo de este trabajo fueron: ¿por qué si el principio biológico y metodológico es el mismo entre la dactiloscopía y la rugoscopía, no tienen el mismo alcance?; desde la perspectiva docente nos preguntamos ¿cuál clasificación y protocolo de rugoscopía deben conocer los científicos forenses? y ¿qué aspectos metodológicos pueden mejorar la técnica?

En ese sentido, acerca del "principio biológico" debemos mencionar que tanto las estructuras del paladar como las crestas dactilares comienzan a desarrollarse en vida intrauterina. Las rugas palatinas a partir de la 12a semana y sólo cambian de tamaño por el crecimiento desde la infancia hasta la edad adulta; constituyendo así un rasgo morfológico para la individualización (8). Mientras que las crestas dactilares comienzan a formarse durante el 3er mes de gestación (semana 13), y están completamente desarrolladas para el sexto mes de vida intrauterina, creando pliegues y patrones únicos que permanecen iguales durante toda la vida (9). De tal forma que los patrones morfológicos, son el conjunto de estructuras anatómicas (rugas palatinas, crestas dactilares, surcos labiales, etcétera) que pueden ser de utilidad en la identificación de personas; al poseer teóricamente, cualidades de ser únicos, perennes, inmutables y clasificables (10). Sin embargo, hay autores que precisan que en casos de intervenciones ortodóncicas extensas o pérdidas dentales severas, la morfología de las rugas se puede modificar (11); incluso se ha publicado que no deben realizarse comparaciones o superposiciones basadas en las rugas después de expansión palatina (tratamiento de ortopedia dental) y deben considerarse con precaución para identificación humana (12).

Metodológicamente también comparte el mismo fundamento, ya que se obtiene un registro a partir del cual se clasifica y con ello dar lugar a procesos comparativos para orientar o descartar en procesos de identificación de personas. Estos patrones morfológicos son crestas dactilares, rugas palatinas y surcos labiales que dan lugar a técnicas denominadas dactiloscopía, rugoscopía y queiloscopía respectivamente. Al día de hoy, la lofoscopía que integra a la dactiloscopía, la cual sigue siendo referente en identificación a partir de la comparación de patrones de bioestructuras, ya que su utilidad ha perdurado a lo largo de la historia de la humanidad en diversos contextos, incluyendo el forense (13), no así para las otras técnicas. Esto probablemente está asociado a la accesibilidad de las crestas dactilares

en comparación con las rugas palatinas o los surcos labiales, ya que para la obtención del registro el proceso puede ser más invasivo dejando en desventaja el impacto y uso de estas herramientas, aunque tengan relevancia teóricamente y se denominen o califiquen como marcadores individualizantes de la odontología forense.

Dadas las condiciones expuestas fue que formulamos algunas preguntas que motivaron el desarrollo del presente trabajo con un alcance docente, tales como: ¿qué es lo relevante que necesitan aprender los alumnos en formación de Ciencia Forense respecto a la rugoscopía?, ¿cuál clasificación y protocolos son los que deberían conocer?; así como, discutir y reconocer sesgos metodológicos. Integrar esa información de manera general, es una propuesta que busca permitir tener un proceso enseñanza-aprendizaje más amplio y crítico que pueda impactar en la intervención práctica y la eficiencia de la odontología, ya sea para considerarla o no, una herramienta que aporte para la identificación de personas en México.

Conceptos generales

Rugas palatinas: conocidas como pliegues palatinos transversales, son elevaciones o crestas observables en la mucosa oral del paladar que presentan formas irregulares y asimétricas, y que aparecen en un número variable que en conjunto conforman el "patrón de rugas palatinas". Se ubican a ambos lados del rafe palatino que anatómicamente se observa como una línea o cresta elevada en la línea media del paladar duro y por detrás de la papila incisal, ésta es una pequeña prominencia ovalada en la línea media, detrás de los incisivos centrales superiores, que marca el punto de inicio del rafé y cubre el foramen o canal incisivo (1), es la Figura 1 se representan las estructuras descritas.

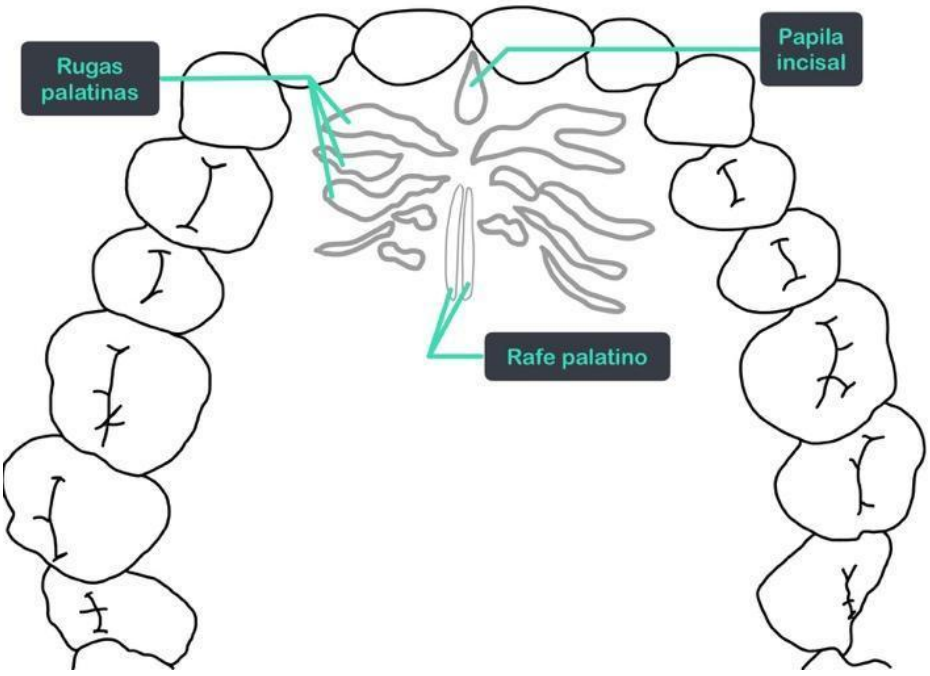


Figura 1. *Esquema del paladar que señala la papila incisal, el rafé palatino y las rugas palatinas*

Las rugas palatinas cumplen algunas funciones en la cavidad oral como es la percepción táctil y del gusto debido a la presencia de receptores, facilitan el transporte de alimentos, protegen la mucosa del paladar de traumatismos causados por alimentos y participan en la fonación (14). Anatómicamente presentan variaciones en forma, altura, longitud de una persona a otra, razón por la cual se le atribuye la cualidad de "unicidad".

Clasificación de rugas palatinas: La asociación y asignación de forma de las rugas son necesarias para su estudio, esto se realiza mediante el estudio observacional principalmente de tipo morfológico, aunque existen algunas propuestas que incluyen análisis morfométrico como la clasificación de Lysell en 1955 (15) y la de Cormoy en 1973 (16).

Algunas clasificaciones también integran características como la forma del paladar, de la papila incisiva y la orientación de las rugas respecto al rafé palatino.

Rugoscopía: también denominada como "palatoscopia", se refiere al análisis, asociación de formas y clasificación de patrones de rugas palatinas con fines comparativos, los cuales se han asociado a investigaciones forenses proporcionando elementos de juicio para la identificación de personas vivas o fallecidas a través de esas estructuras anatómicas (17).

El papel de la rugoscopía, precisa su participación en contextos donde se dificulta el reconocimiento facial-visual o dactiloscópico con fines de identificación; ayudando así esta técnica a orientar, discriminar, determinar o complementar la correspondencia mediante una confronta morfoscópica; aunque también existen condiciones que limitan su aplicabilidad, tales como: paladar hendido, patologías o cirugías (18).

Registro rugoscópico (2D o 3D): se refiere a las diversas opciones que existen para realizar el registro de las rugas, tales como, en 2D, las fotografías del paladar (2D) o fotografías de modelos de yeso; en 3D, los modelos de yeso, los modelos digitales 3-*shape* y las tomografías; también puede llevarse a cabo la observación directa del paladar.

Fenotipado del patrón de rugas palatinas en un rugograma o palatograma: El fenotipado se entiende como el proceso en el que a partir de la observación se realiza la asociación de la forma de las rugas con la clasificación seleccionada (subrayando que no existe una universal). Dicho proceso requiere de un espacio gráfico en donde se dibujan, colectan, asignan y se asocia la morfología de las rugas a la clasificación; ese espacio conocido comúnmente como rugograma o palatograma, también nombrado como cédula rugoscópica y que tampoco existe un diseño homologado.

Es importante precisar que no se debe confundir la estructura anatómica con otros conceptos que hacen referencia a la técnica que integra la clasificación y el análisis (Ver Tabla 1). Otro aspecto a precisar referente al fenotipado de la técnica de dactiloscopía, es que se realiza en dos documentos, en la cédula decadactilar se anotan características generales (patrón dactilar) y en el dactilograma las particulares (minucias).

Patrón morfológico o conjunto de:	Ubicación Anatómica	Registro o muestra	Cédula para fenotipado	Técnica
Rugas palatinas	Paladar	2D: fotografías de paladar o de modelos. 3D: modelos de yeso, modelos 3D, tomografías	Cédula rugoscópica	Rugoscopía o Palatoscopía
Surcos labiales	Labios	2D: fotografías. Registros directo: huella labial	Cédula queiloscópica	Queiloscopía
Crestas dactilares	Yema de los dedos de manos	2D: biométrico o huella escaneada (digital). Registro directo: impresión dactilar, ficha decadactilar	Cédula decadactilar. Dactilograma (individual)	Dactiloscopía

Tabla 1. *Conceptos que diferencian entre lo que es el patrón morfológico (conjunto de estructuras), la ubicación o localización anatómica, el tipo de registro que se puede obtener, la cédula donde se recaban los datos de la clasificación y la técnica de análisis para cada estructura*

Antecedentes de clasificaciones para la técnica de la rugoscopía

La técnica de rugoscopía al igual que otros análisis de patrones morfológicos asociados con la identificación de personas, ha sido un recurso empleado en algunas investigaciones a lo largo de la historia. Esto se fundamenta en el análisis de las formas del conjunto de rugas palatinas que se remonta a principios del siglo XX según Patil y colaboradores(19), quien refiere como "rudimentaria" la clasificación de Goria propuesta en 1911; la cual categoriza el patrón de rugas especificando el número y la extensión de la zona en relación con los dientes. Posteriormente, en 1924 surge la clasificación De López de León, que propone una relación entre la morfología de las rugas palatinas con el "carácter de las personas" (20). Fue en 1934 que Luis Da Silva propuso una de las primeras clasificaciones tipológicas que integra seis formas simples (recta, curva, angulosa, circular, ondulada y punto) y cuatro compuestas (Y, cáliz, raqueta, rama) (21). Desde entonces, han surgido diversas clasificaciones para el análisis de este patrón morfológico, trece de ellas fueron consideradas para la construcción del presente trabajo.

Metodología

La revisión documental se centró en la búsqueda en PubMed de las palabras clave: "rugoscopy" con 51 resultados; "palatoscopy" con 20 resultados; con fechas de publicación comprendidas en el periodo del 2010 al 2025. Por otra parte, en Google Académico se realizó la búsqueda histórica de la palabra "rugoscopía" en publicaciones entre el 2020 y el 2025, de la que se obtuvieron 169 resultados. Es importante precisar que algunas de las clasificaciones tienen cerca de un siglo que fueron propuestas, que los archivos originales no están disponibles y fueron citados por algún otro autor. En la Figura 2 se listan cronológicamente las clasificaciones.

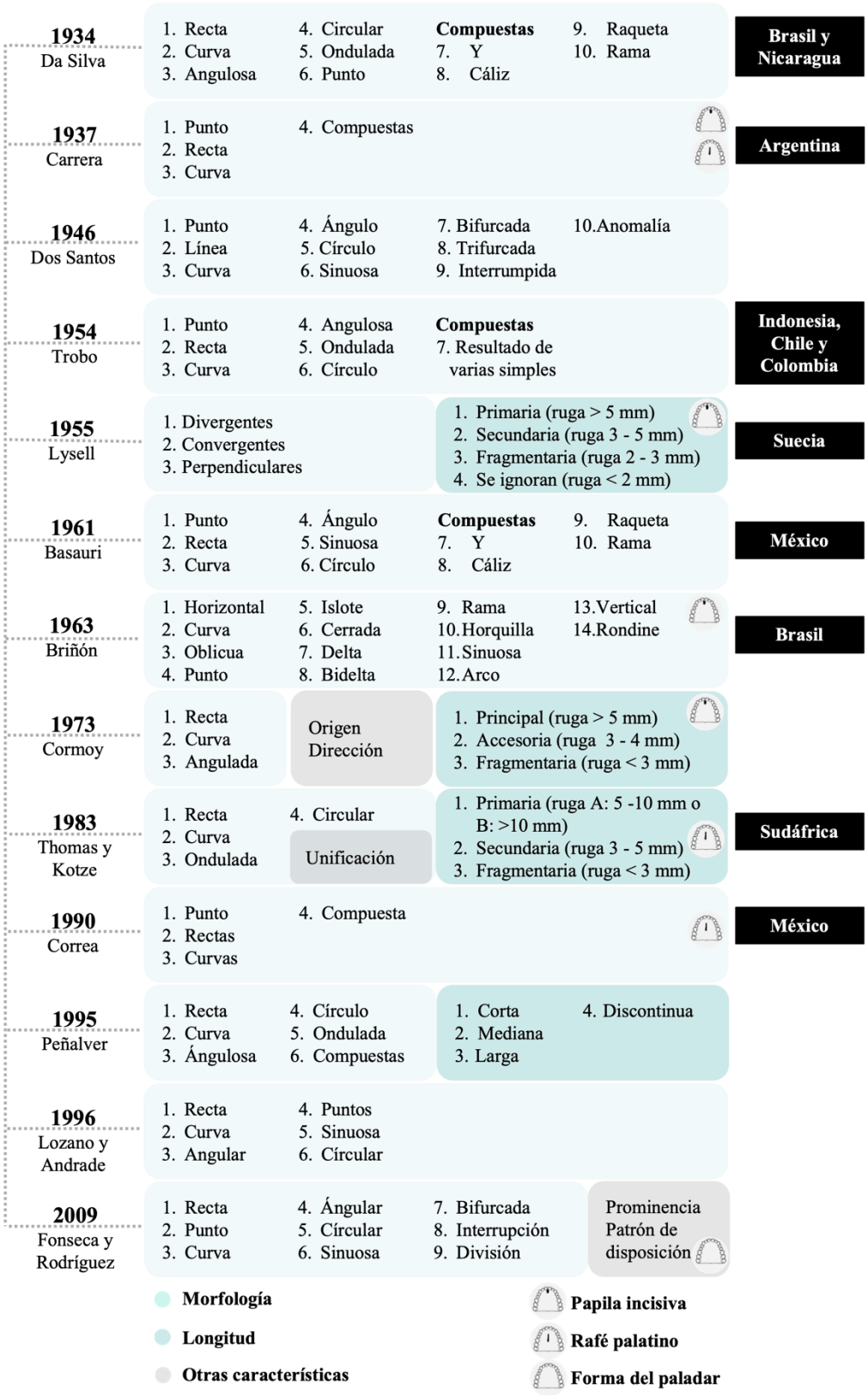


Figura 2. *Clasificaciones para el análisis del patrón morfológico de las rugas palatinas que se han propuesto desde 1934 hasta la actualidad. Las clasificaciones se presentan mediante un código de color: verde claro, morfología de las rugas; verde oscuro, longitud de las rugas; y gris, otros criterios de clasificación. Asimismo, mediante iconos se indica si cada sistema de clasificación incorpora el uso de la papila incisiva, el rafé palatino o la forma del paladar.*

Resultados

El presente trabajo documenta que, desde hace más de un siglo, se ha propuesto que el patrón de rugas palatinas tiene la cualidad de "unicidad" y por ende, relación con procesos de identificación de personas. Además, permitió evidenciar las diversas opciones de clasificaciones existentes, así como la falta de publicaciones nacionales y el poco impacto de la técnica de rugoscopía en la práctica forense que, teóricamente, coadyuva a la identificación de personas. No obstante, nosotros decidimos abordar únicamente las necesidades docentes, que partieron de la diversidad de clasificaciones y, aunque se presente una recopilación de todas ellas, destaca la falta de una clasificación homologada, específica de nuestra población y más aún, que aparezca citada en algún protocolo oficial para uso en México.

Con el fin de atender lo referente a la ausencia de una clasificación homologada y el fenotipado, derivado de la revisión, se retomaron las formas de rugas más frecuentes y aquellas que coinciden en las clasificaciones publicadas por diferentes autores, para plantear la unificación de las formas de rugas y una estructura metodológica que facilite la enseñanza de la técnica, además de promover la realización de dos iteraciones, incluso cuando se realicen comparaciones uno a uno (1:1), con el fin de tener la posibilidad de conocer el error intraobservador asociado a la técnica.

El resultado es la conformación de un protocolo para uso docente principalmente en la formación de científicos forenses sin excluir otras carreras afines, que lleva por título "Análisis de rugas palatinas" (Anexo 1) sin acotarlo a rugoscopía, en consideración a que debe ser minucioso y llevando implícito que se involucran diferentes aspectos para un estudio detallado.

El texto inicial son "generalidades" que, previenen sobre el material que se va a requerir y la selección del tipo de registro que se va a usar (puede ser 2D o 3D). Después está la explicación y secuencia de la metodología que se divide en 3 secciones, que se describen a continuación.

1) Características morfológicas, la cual muestra a partir de gráficos la categorización de estructuras que son: a). la forma del paladar, b). papila incisal y relación con el rafé, c). la orientación de las rugas, d). la división del paladar por cuadrantes y e). la clasificación, integrada por diez formas de rugas palatinas.

Cabe subrayar que éstas diez formas se seleccionaron a partir de las trece clasificaciones que se obtuvieron en la Figura 2; siendo nueve las formas más frecuentes publicadas y que se muestran de forma gráfica para una mejor asociación morfológica: Curva (92.3%), Recta (84.6%), Punto (69.2%), Angular (61.5%), Circular (61.5%), Sinuosa (38.4%), Horquilla (23.1%) o Delta (23.1%) e Islote (15.4%); además se incorporó una última forma denominada "Secante" que se retoma de las clasificaciones empleadas en dactilosocopía (22–24), por la similitud morfológica que se observa en la trayectoria de la ruga y que, en caso de presentarse en el patrón de rugas palatinas, por su poca frecuencia y la forma distintiva, resulta una característica individualizante.

2) Fenotipado del patrón de rugas palatinas, indica el llenado de la cédula rugoscópica, retomando los incisos que van desde el a) hasta el d); así como, un espacio para dibujar la forma de cada ruga.

3) Segunda iteración, indica la repetición de la observación y clasificación para el fenotipado realizada por la misma persona, lo cual permite reconocer algunos sesgos en la observación o registro y permite reportar el error intra-observador. La segunda repetición es recomendable realizarla dejando pasar una semana después de la primera iteración y sin tener acceso al fenotipado previo. Cuando no sea posible cumplir con el plazo de tiempo sugerido entre iteraciones, se recomienda siempre realizar la segunda iteración, aún en un tiempo distinto, resaltando la relevancia de su ejecución al ser un aspecto crítico para determinar la repetibilidad y reproducibilidad del protocolo.

El protocolo integrado, aunque es desarrollado con fines inicialmente docentes, dejamos a consideración de los lectores que pueda ser aplicable en la práctica forense, ya que incorpora aspectos que atienden la necesidad de llevar a cabo la metodología con rigor científico, indispensable en investigaciones forenses.

Discusión y conclusiones: aspectos a considerar en la enseñanza y práctica de la rugoscopía

En Ciencia Forense la enseñanza de técnicas y sobre todo aquellas asociadas a identificación, parte del debate científico y documentado antes de asumir que es acertadamente eficiente, aún cuando los antecedentes son del siglo XIX y principios del XX; siempre es necesario preguntarnos si es posible mejorarla para llegar a conclusiones precisas y significativas. Los docentes tenemos la responsabilidad de transmitir el conocimiento y nuevas perspectivas a los alumnos para que sean capaces de reconocer aspectos que pueden aportar a mejorar el contexto forense nacional. Algunos autores como Khanna, han reportado que la enseñanza de la rugoscopía y la queiloscopía, así como el conocimiento práctico, es ambigua. Por lo tanto, proponen introducir capacitación que mejore la formación en queiloscopía y palatoscopía para estudiantes, en el caso del autor, está pensando en los de odontología en la India (25). En Ciencia Forense de la UNAM, estamos conscientes que los alumnos que actualmente están en formación, pueden iniciar una transición y aportar a clarificar la utilidad de técnicas y metodologías, particularmente sobre la enseñanza, aprendizaje, aplicación y evaluación de patrones morfológicos como sucede con la rugoscopía.

Hay dos aspectos que deben discutirse y considerarse en la enseñanza de la rugoscopía, el primero de ellos es respecto a la “unicidad” del patrón de rugas palatinas, definida como una cualidad del conjunto de esas estructuras al ser un patrón único para cada persona; pero que no necesariamente está garantizado por el segundo aspecto que es, la transferencia de este patrón de unicidad que puede estar sesgada desde el registro y en el transcurso del proceso de análisis. Esto ya fue señalado para el patrón dental anterior que, también se atribuía a su transferencia en “huellas de mordedura” y que, desde el 2009, se emitieron recomendaciones para llevar a cabo el análisis con mayor rigor científico (26). Nosotros detectamos que la rugoscopía, al igual que la queiloscopía, tienen las mismas debilidades que el análisis de huellas de mordedura.

Como hemos mencionado previamente, la literatura en el área de la odontología forense menciona sobre la individualidad de los patrones de rugas palatinas como “únicos” y de ahí el concepto de “unicidad”, que los consideran equiparables con las huellas dactilares (27,28). Hay una controversia respecto a su estabilidad “relativa” a lo largo del tiempo, ya que hay investigaciones que demuestran la eficacia de la rugoscopía aún en pos-tratamientos de expansión palatina (se refiere al uso de un tornillo de expansión en el paladar como con fines ortopédicos, de uso principalmente en niños) con un intervalo de confianza del 95% (29). Por otra parte, un estudio en el 2020 reportó que se observaron alteraciones

en la morfología de las rugas palatinas en pacientes tratados con expansión maxilar rápida y extracciones dentales; las diferencias entre los grupos fueron estadísticamente significativas y por tanto, concluyeron que se debe evitar el uso de las rugas palatinas con fines de identificación en pacientes sometidos a tratamientos de ortodoncia invasivos como los mencionados (30).

Los patrones de rugas palatinas, además de tener la propiedad de "unicidad", también se les atribuye la cualidad de "inmutabilidad", que se refiere a que no cambian, alteran o se modifican; no obstante, hay estudios que demuestran que existen factores externos como son los tratamientos ortodóncicos, extracción y/o pérdida dental o traumatismos, que pueden modificar parcialmente su morfología (30). Un estudio reciente, del 2025, evaluó la estabilidad de los patrones de las rugas palatinas tras el tratamiento de expansión maxilar lenta (SME por sus siglas en inglés, *slow maxillary expansion*; la cual consiste en la rotación del tornillo una vez por semana), evaluando la fiabilidad de la región de las rugas como región de referencia en la superposición digital. Realizaron un análisis estadístico concluyendo que, los cambios dimensionales transversales observados en las rugas, particularmente en la tercera, indican que se debe tener precaución al utilizar la región de las rugas como referencia en las superposiciones después del tratamiento con SME (31).

Es entonces de gran importancia, tener en cuenta estas posibles variaciones; sin embargo, es determinante centrar la atención en el proceso de transferencia y registro del patrón de rugas palatinas y, por supuesto, en el análisis. Este proceso inicia desde el tipo de registro que se va a ocupar para el estudio del patrón rugoscópico, en los protocolos y clasificaciones de la literatura no necesariamente se específica el tipo de registro más conveniente. Según lo reportado, las rugas pueden estudiarse por observación directa del paladar de una persona; así como, por métodos de reconocimiento indirecto en registros 2D como fotografías (fotografías intraorales o fotografías de modelos de yeso) y en 3D, como modelos de yeso, modelos digitales o tomografías. Las fallas técnicas en la toma de registro pueden afectar la forma; por ejemplo, el material de impresión puede modificar la forma de las rugas, debido a la manipulación del material, a la presencia de burbujas, tiempos de gelificación, entre otros. Si son registros fotográficos (2D), pueden presentarse errores técnicos de enfoque, ángulo, iluminación, entre otros, que "den un efecto" o variación en la forma de las rugas. Investigaciones previas coinciden en que, para el estudio de patrones morfológicos, es más eficiente el uso de modelos 3D, como el escaneo oral/dental para registrar los datos de los patrones de rugas palatinas (32), o escaneos de modelos de yeso para el análisis de unicidad del patrón dental (33).

En ese sentido, hay protocolos que indican realizar "calcorugoscopía", es decir, que se realice con lápiz un delineado de las rugas en los modelos de yeso, lo cual puede afectar al delimitar las rugas, ya que esta acción dependerá de la habilidad del observador, de la fineza de la punta del lápiz. La calcorugoscopía puede sesgar la clasificación (asociación de la forma de la ruga con los datos que estamos dibujando y colectando); así como en la segunda iteración (segundo fenotipado) o la de un segundo observador si es que se decide realizar. Las rugas que también se han denominado como "clasificables", no obstante, cabe preguntarse si no tenemos algún aspecto que esté interfiriendo en la forma de las rugas para poder clasificarlas. Durante el desarrollo del protocolo, el observador puede enfrentarse a que la forma de la ruga no se apegue a la clasificación, en ese momento tendrá que tomar una decisión y detectar si en la segunda iteración ocurre lo mismo; por esta razón, resulta de gran relevancia no emitir conclusiones a partir de solo una observación. Idealmente, también debería de participar un segundo observador, de tal forma que se pueda realizar un análisis de concordancia y reportar el error inter-observador además del intra-observador. Sin embargo, se debe subrayar que esos sesgos derivados de la variabilidad morfológica también se asocian a la subjetividad en la clasificación e interpretación de formas y direcciones de las rugas entre diferentes observadores (11). Otros aspectos

que deben ser considerados son el “error humano”, el cansancio del observador en la recopilación de datos de rasgos macromorfoscópicos, así como la experiencia del observador (34).

Es así que, el análisis de las rugas palatinas puede verse afectado desde el registro, por mencionar una fotografía fuera de foco, si es modelo de yeso y presenta calcorugoscopía previa; o por otros factores como la capacitación y/o cansancio de la persona observadora, la iluminación, incluso un error en el fenotipado o colecta de datos en la cédula rugoscópica. Es así como la transferencia de “unicidad” no está garantizado durante el proceso ya que puede estar sesgado por todos los aspectos mencionados; lo cual determina la confronta y la conclusión. Es importante mencionar que tampoco se ha reportado el número de elementos de información mínimos necesarios para una confronta, usualmente se llevan a cabo comparaciones 1:1 mediante una sola observación, sin repetir o confirmar el resultado con otro observador u observadora. La literatura vigente sobre dactiloscopía refiere considerar aspectos cualitativos individualizantes y no solo una cantidad de minucias, por tanto, no hay un criterio numérico de puntos de coincidencia en la confronta para concluir una correspondencia, sino una evaluación integral (cualitativa-cuantitativa) que respalde suficiencia en la unicidad además de una etapa de verificación del resultado por otro observador u observadora (35). No obstante, publicaciones actuales como la de B. Simon y colaboradores, confirman que la rugoscopía podría ser un método rápido, sencillo y altamente fiable para la identificación humana (36,37).

Ante este panorama es que toma relevancia la enseñanza de un protocolo de Ciencia Forense, que enfrente a los alumnos a reconocer las dificultades, debilidades y aciertos; y que también dé lugar a la discusión de controversias. El “Análisis de rugas palatinas” (protocolo) no es solo una integración de una clasificación con las formas de rugas más comunes reportadas en la literatura, también plantea factores que pueden afectar el análisis y la conclusión. Por lo que este trabajo documenta y retoma las diversas vertientes de la técnica que pueden fortalecer la formación de científicos forenses encaminando el desarrollo de competencias a través de actividades profesionales confiables (APROC). La generación e incorporación de un protocolo en la enseñanza de la técnica en rugoscopía, se apega al desarrollo de la APROC 6; ya que promueve la discusión crítica de la técnica, también identifica la información que introduce incertidumbre (subactividad 6.1) y detecta inconsistencias en el análisis debidas a discrepancias (subactividad 6.2). En un ejercicio educativo avanzado, se podrían evaluar los alcances de los procedimientos de análisis y de la aplicación de criterios que afectan la calidad de los resultados y de las conclusiones (subactividad 6.3) e incluso podría proponer cómo reducir o compensar la incertidumbre y el error de los procedimientos de análisis de rugas palatinas (subactividad 6.4). De este modo, la enseñanza de la rugoscopía usando el protocolo de “Análisis de rugas palatinas” se convierte en un escenario pedagógico para problematizar aspectos básicos y fundamentales del conocimiento forense, fortalecer la metodología científica y promover una práctica profesional reflexiva, ética y responsable frente a ésta técnica y uso o asociación procesos de identificación de personas.

El solo hecho de emplear el protocolo como estrategia didáctica es un enfoque que facilita que los estudiantes de ciencias forenses reconozcan los estándares mínimos de calidad requeridos para sustentar conclusiones basadas en evidencia, retomando particularmente la subactividad 6.1, ya que el aprendizaje y la aplicación sistemática del protocolo permite a los estudiantes familiarizarse con la información mínima requerida para el estudio de patrones de rugas palatinas -incluyendo la morfología de las rugas, papila incisal, rafé palatino y forma del paladar- y, en consecuencia, identificar omisiones o deficiencias que disminuyen la confiabilidad de los resultados obtenidos y su potencial apoyo en procesos de identificación. El proceso formativo no solo fortalece la enseñanza técnica, sino que consolida una educación científica basada en el análisis crítico, la reproducibilidad y la evaluación de la evidencia. Enseñar a los estudiantes a trabajar con protocolos que hacen explícitas las fuentes de incertidumbre,

los criterios de calidad y los límites interpretativos de una técnica, contribuye a formar profesionales capaces de sostener sus conclusiones desde una postura metodológicamente sólida y éticamente responsable.

Finalmente, este enfoque didáctico refuerza el papel de las y los docentes como eje articulador formativo y de aplicación en contextos como el mexicano, donde la identificación humana constituye una prioridad y la rugoscopía no ha tenido un papel relevante dada la inaccesibilidad de las estructuras. La formación científica orientada al uso crítico de protocolos permite que los futuros especialistas comprendan la relevancia de aspectos metodológicos y de análisis. Desde la perspectiva educativa en ciencias forenses, la enseñanza del protocolo para el análisis de rugas palatinas se sitúa en la intersección de la enseñanza con la responsabilidad social en los sistemas de justicia asociadas a identificación de personas en México.

Agradecimientos

Este trabajo fue realizado con apoyo del proyecto de investigación CBF-2025-I-2550. Además, la tercera autora agradece al proyecto 7144 de Investigadores por México-SECIHTI.

Por otro lado, agradecemos a Óscar Ramírez Plata y Wendy Viveros Meza que iniciaron la revisión de las clasificaciones; a Michelle Abigail Buendia Velarde, Dulce Paola Carrasco Morales, Daniela Itzel Gómez Otilio y Joseline Salgado Valderrama, por su colaboración para la elaboración del cuadro resumido y organizado sobre las principales clasificaciones de rugoscopía; y a Ximena García Navarro por el apoyo en la elaboración de las imágenes.

Finalmente, agradecemos al proyecto concluido PAPIME PE201421 en colaboración del equipo académico para el desarrollo del mismo, al Dr. Jiro Suzuri-Hernández y Lic. Reyes Farfán Sánchez.

Referencias

1. Barrera Silva A, Pacheco Rojas AE, Quispe Lizarbe RJ. Relevance of palatal rugae as a method of forensic identification. Revista Científica Odontológica. 2020;8(2):24.
2. Emam ANM. Role of Forensic Odontology in Identification of Persons: A Review Article. Cureus. 2024;16(3):e56570.
3. Kaul B, Vaid V, Gupta S, Kaul S. Forensic Odontological Parameters as Biometric Tool: A Review. Int J Clin Pediatr Dent. 2021;14(3):416–9.
4. Procuraduría General de la República. Guía de Especialidades Periciales Federales. México, D.F.: Procuraduría General de la República; 2015.
5. Procuraduría General de la República. Protocolo para el Tratamiento e Identificación Forense. México; 2015.
6. Tzuc E, Sánchez M. Cierra sexenio de AMLO con más de 72,100 cuerpos sin identificar [Internet]. 2024. Disponible en: https://quintoelab.org/project/sexenio-amlo-72-mil-cuerpos-crisis-forense
7. Hernández S, Romo Guadarrama G, Quijano Mateos A, Villavicencio Queijeiro A, Sosa Reyes AM. Evaluación de competencias por medio de las actividades profesionales confiables del científico forense. En: Hamui Sutton L, Vives Varela T, editores. MEDAPROC Modelo Educativo para Desarrollar Actividades Profesionales Confiables. Ciudad de México, México: Manual Moderno; 2020. p. 135–65.
8. Agarwal M, Alex A, Konde S. Relationship between dermatoglyphics, cheiloscopy, rugoscopy, and dental caries: A cross-sectional study in Bengaluru, Karnataka. Contemp Clin Dent. 2018;9(4):577–81.
9. Sharma T, Chaitan SM, Somayaji NS, Mahajan B, Rajguru JP, Hajibabaei S, et al. The medicolegal importance of establishing human identity by using dactyloscopy and rugoscopy: A comparative study. J Family Med Prim Care. 2020;9(7).
10. Mutalik VS, Menon A, Jayalakshmi N, Kamath A, Raghu AR. Utility of cheiloscopy, rugoscopy, and dactyloscopy for human identification in a defined cohort. J Forensic Dent Sci. 2013;5(1):2–6.
11. Kapali S, Townsend G, Richards L, Parish T. Palatal rugae patterns in Australian Aborigines and Caucasians. Aust Dent J. el 1 de abril de 1997;42(2):129–33.

12. Farronato M, Begnoni G, Boodt L De, Thevissen P, Willems G, Cadenas de Llano-Pérula M. Are palatal rugae reliable markers for 3D superimposition and forensic human identification after palatal expansion? A systematic review. Forensic Sci Int. 2023;351:111814.
13. National Institute of Justice. The Fingerprint Sourcebook [Internet]. Office of Justice Programs, editor. Washington, DC, USA: U.S. Department of Justice, Office of Justice Programs, National Institute of Justice; 2011. 422 p. Disponible en: https://www.ojp.gov/library/publications/fingerprint-sourcebook
14. Campohermoso Rodríguez OF. Odontología Legal y Forense. 2a ed. La Paz, Bolivia: Edición Digital; 2020.
15. Sanjaya PR, Gokul S, Prithviraj KJ, Rajendra S. Significance of Palatal Rugae: A Review. International Journal of Dental Update. 2012;2(2):74–82.
16. Fonseca GM, Rodríguez Flórez CD. Propuesta de codificación y análisis de rugosidades palatinas para su aplicación en odontología antropológica y forense. Oral. 2009;10(31):518–23.
17. Ramos Matute GA. La rugoscopía palatina forense como método de identificación humana a través del análisis comparativo. Revista Científica de la Escuela Universitaria de las Ciencias de la Salud. 2015;2(1):37–42.
18. Smitha T, Vaswani V, Deepak V, Sheethal HS, Hema KN, Jain VK. Reliability of palatal rugae patterns in individual identification. Journal of Oral and Maxillofacial Pathology. 2021;25(3).
19. Patil MS, Patil SB, Acharya AB. Palatine Rugae and Their Significance in Clinical Dentistry: A Review of the Literature. The Journal of the American Dental Association. 2008;139(11):1471–8.
20. Silva Osorio SA. Relación entre la arquitectura de las rugas palatinas y el sexo biológico de estudiantes de la Facultad de Odontología de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Lima, Perú; 2017.
21. Moreno Hidalgo ON. Rugoscopia palatina como método de identificación en odontología forense. Revisión bibliográfica. Loja, Ecuador; 2022.
22. Gutiérrez-Redomero E, Alonso-Rodríguez C, Hernández-Hurtado LE, Rodríguez-Villalba JL. Distribution of the minutiae in the fingerprints of a sample of the Spanish population. Forensic Sci Int. 2011;208(1):79–90.
23. de la Cruz Ortuño AD de la. Caracterización de la variabilidad dermatoglífica de biométricos dactilares de apoyo en población mexicana: una propuesta de análisis para aplicación forense. [México]: Universidad Nacional Autónoma de México; 2022.
24. de Antón y Barberá F. Reminiscencias lofoscópicas, con especial alusión al correcto uso del lenguaje técnico. Gaceta Internacional de Ciencias Forenses. 2017;24(Julio–Septiembre):34–64.
25. Khanna S, Singh NN, Brave VR, Sreedhar G, Purwar A, Srivastava A. Training module for cheiloscopy and palatoscopy in forensic odontology. J Forensic Dent Sci. 2014;6(1):36–41.
26. National Research Council. Strengthening Forensic Science in the United States: A Path Forward [Internet]. Washington, DC: National Academies Press; 2009. Disponible en: https://nap.nationalacademies.org/catalog/12589/strengthening-forensic-science-in-the-united-states-a-path-forward
27. Paliwal A, Wanjari S, Parwani R. Palatal rugoscopy: Establishing identity. J Forensic Dent Sci. 2010;2(1):27–31.
28. Jain A, Chowdhary R. Palatal rugae and their role in forensic odontology. J Investig Clin Dent. el 1 de agosto de 2014;5(3):171–8.
29. Barbieri AA, Scoralick RA, Naressi SCM, Moraes MEL, Daruge Jr. E, Daruge E. The Evidence of the Rugoscopy Effectiveness as a Human Identification Method in Patients Submitted to Rapid Palatal Expansion. J Forensic Sci. el 1 de enero de 2013;58(s1):S235–8.
30. Bavaresco D, Von Meusel LDZ, Franco A, Makeeva I, Paranhos LR, Cericato GO. Morphology of the Palatal Rugae before and after Orthodontic Treatment with and Without Rapid Maxillary Expansion and Dental Extractions. Indian Journal of Dental Research. 2020;31(2).
31. Gökmen Ş, Topsakal KG, Duran GS, Görgülü S. Evaluation of the reliability of palatal rugae as a reference area in digital superimposition after slow maxillary expansion treatment. American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics. 2025;167(4):454–63.
32. Suhartono AW, Syafitri K, Puspita AD, Soedarsono N, Gultom FP, Widodo PT, et al. Palatal rugae patterning in a modern Indonesian population. Int J Legal Med. 2016;130(3):881–7.
33. Jasso-Cuéllar J, Gil-Chavarría I, Quinto-Sanchez M. Anterior dental arch shape and human identification: Kieser et al. method applied to 2D-3D dental models in Mexican population. Forensic Science International: Reports. 2020;2:100161.
34. Kamnikar KR, Plemons AM, Hefner JT. Intraobserver error in macromorphoscopic trait data. J Forensic Sci. 2018;63(2):361–70.
35. Ashbaugh DR. Quantitative-Qualitative Friction Ridge Analysis: An Introduction to Basic and Advanced Ridgeology. Boca Raton, FL: CRC Press; 1999.
36. Simon B, Aschheim K, Vág J. The discriminative potential of palatal geometric analysis for sex discrimination and human identification. J Forensic Sci. el 1 de noviembre de 2022;67(6):2334–42.
37. Simon B, Lipták L, Lipták K, Tárnoki ÁD, Tárnoki DL, Melicher D, et al. Application of intraoral scanner to identify monozygotic twins. BMC Oral Health. 2020;20(1):268.

Imágenes multiespectrales aplicadas al análisis forense de documentos

Narcotti, Gaston Gerardo[1, 2] ✉

[1]División Química Forense y Toxicología, Dirección General de Policía Científica. Policía de Entre Ríos Parana, Entre Ríos, Argentina.
[2]Facultad de Ciencia y Tecnología, Universidad Autónoma de Entre Ríos (UADER). Parana, Entre Ríos, Argentina.

✉ narcottigaston@gmail.com

Datos del artículo
Cita

Narcotti, GG. Imágenes multiespectrales Aplicadas al análisis forense de documentos, 2026 (2).49-67

Editor
Torres-Zúñiga, V.

Revisión por pares
Dos

Recibido
22/abril/2026

Aceptado
3/julio/2026

Publicado
30/octubre/2026

Creative Commons CC-BY-NC-SA 4.0 Internacional.

Resumen

Este trabajo presenta un sistema con enfoque de bajo costo para la adquisición y el análisis de imágenes multiespectrales aplicadas al examen forense de documentos. A diferencia de los sistemas convencionales basados en cámaras hiperespectrales especializadas y costosas, la metodología propuesta emplea la cámara modificada de un teléfono inteligente que opera en modo de espectro completo, combinada con un conjunto de filtros de paso de banda estrecha para capturar bandas espectrales discretas que abarcan desde la región visible hasta la del infrarrojo cercano. Se describe un flujo de trabajo completo, que incluye la adquisición de imágenes, la calibración radiométrica mediante un modelo de corrección polinómica, la selección de canales a partir de datos RAW, el registro de imágenes y la construcción del cubo de datos multiespectrales. El conjunto de datos resultante se procesa utilizando herramientas de software de código abierto, lo que permite tanto la visualización como el análisis de la información espectral. El estudio se centra en técnicas analíticas prácticas y accesibles, como la extracción de curvas de reflectancia y métodos de clasificación supervisados y no supervisados, para diferenciar tintas, sustratos y características de los documentos. Los resultados experimentales demuestran que, a pesar de las limitaciones en la resolución espectral, el sistema propuesto es capaz de revelar diferencias entre materiales visualmente similares, lo que respalda su aplicabilidad en escenarios forenses. La metodología propuesta ofrece una alternativa rentable que facilita la adopción de técnicas de imagen multiespectral en el análisis forense de documentos, ampliando su accesibilidad más allá de los laboratorios especializados.

Palabras clave: Imágenes Multiespectrales; Análisis Forense de Documentos

Abstract

This work presents a low-cost approach for the acquisition and analysis of multispectral images applied to forensic document examination. Unlike conventional systems based on specialized and expensive hyperspectral cameras, the proposed methodology employs a modified smartphone camera operating in full-spectrum mode, combined with a set of narrow band-pass filters to capture discrete spectral bands ranging from the visible to the near-infrared region. A complete workflow is described, including image acquisition, radiometric calibration using a polynomial correction model, channel selection from RAW data, image registration, and construction of the multispectral data cube. The resulting dataset is processed using open-source software tools, enabling both visualization and analysis of spectral information. The study focuses on practical and accessible analytical techniques, such as reflectance curve extraction and both supervised and unsupervised classification methods, to differentiate inks, substrates, and document features. The resulting dataset is processed using open-source software tools, enabling both visualization and analysis of spectral information.

Key words: Multispectral Imaging; Forensic Document Analysis

Introducción

Las imágenes multiespectrales (MSI) se encuentran estrechamente vinculadas con los métodos de análisis espectroscópico; de hecho, suelen denominarse “imágenes químicas” debido a su capacidad para inferir la composición material de un objeto a partir de información contenida en un set de imágenes. Esta técnica integra la fotografía digital convencional con la espectroscopía, permitiendo obtener simultáneamente información espacial y espectral del objeto de estudio (1,2).

Desde el punto de vista teórico, la adquisición de imágenes multiespectrales es conceptualmente sencilla. Consiste en registrar fotográficamente un mismo objeto bajo distintas condiciones de iluminación, empleando radiación de diferente longitud de onda, con el fin de generar un conjunto de imágenes cuyo número depende del conjunto de bandas espectrales utilizadas. Por ejemplo, una imagen multiespectral de un documento podría obtenerse mediante su iluminación y registro fotográfico secuencial bajo radiaciones en el intervalo visible: violeta (415 nm), azul (450 nm), cian (505 nm), verde (535 nm), naranja (630 nm) y rojo (670 nm). Como resultado, se obtiene un conjunto de imágenes, cada una de las cuales presenta la respuesta del documento —incluyendo tintas, sustrato, residuos de materiales eliminados y medidas de seguridad— frente a una banda espectral específica.

Dado que cada imagen se adquiere bajo una banda espectral determinada, la información registrada en cada una de ellas está directamente relacionada con los procesos de absorción y reflexión de la radiación incidente por parte del objeto. En este sentido, cada píxel del sensor de la cámara registra la intensidad de la radiación reflejada correspondiente a cada longitud de onda empleada. Así, la integración de esta información permite construir, para cada píxel, una curva de respuesta espectral.

En consecuencia, las imágenes multiespectrales no sólo proporcionan información visual en términos convencionales, sino que también habilitan el análisis espectral a nivel de cada punto de la imagen, ampliando significativamente las posibilidades de caracterización material del objeto estudiado o las partes que lo constituyen.

Imágenes multiespectrales: el Cubo de Datos

Para realizar el análisis y aprovechar la información proporcionada por las imágenes multiespectrales, es necesario organizar, alinear, y estructurar las imágenes espectrales individualmente, para luego integrarlas en una matriz de datos conocida como cubo de datos multiespectral (ver figura 1). Este cubo se define en tres dimensiones: dos espaciales (X e Y), que indican la posición de cada píxel en la imagen, y una dimensión espectral, que especifica la longitud de onda —o banda espectral— asociada al valor de intensidad registrado en dicho píxel (3). De este modo, cada píxel de la imagen multiespectral queda caracterizado de manera unívoca por sus coordenadas espaciales, su coordenada espectral y el valor de intensidad correspondiente.

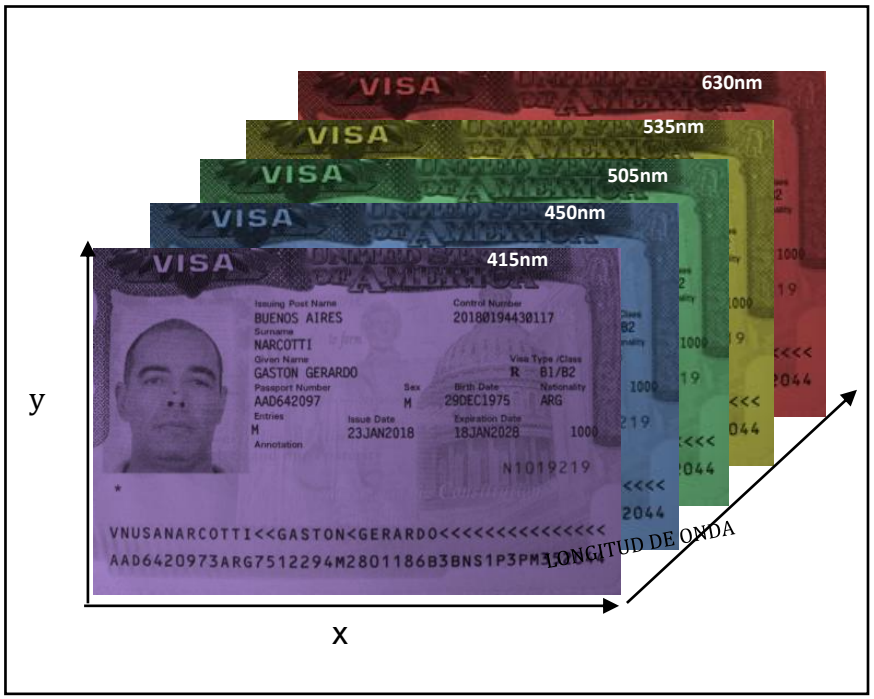


Figura 1. *La conformación del cubo de imágenes multiespectral se basa en un sistema de tres coordenadas, dos espaciales (X e Y), y una espectral que indica la longitud de onda empleada (o banda) bajo la cual se ha registrado la imagen.*

En términos formales, cada píxel de la imagen multiespectral puede representarse como (X, Y, λ, int_λ), donde X e Y corresponden a las coordenadas espaciales, λ representa la longitud de onda —o el máximo de la banda espectral— utilizada en la adquisición, e int_λ denota la intensidad registrada para ese píxel en esa longitud de onda, usualmente cuantificada en niveles de gris dentro del intervalo de 0 a 255 (ver figura 2). A partir de esta organización, las imágenes multiespectrales permiten inferir propiedades químicas de los materiales presentes en un documento. Este principio se fundamenta en la espectroscopía, ampliamente utilizada en química analítica para la caracterización de materiales en función de su interacción con la radiación electromagnética. En particular, los materiales pueden identificarse según sus propiedades de reflectancia y absorbancia, es decir, según cómo reflejan y/o absorben radiación en distintas regiones del espectro, tales como el visible, el infrarrojo o el ultravioleta.

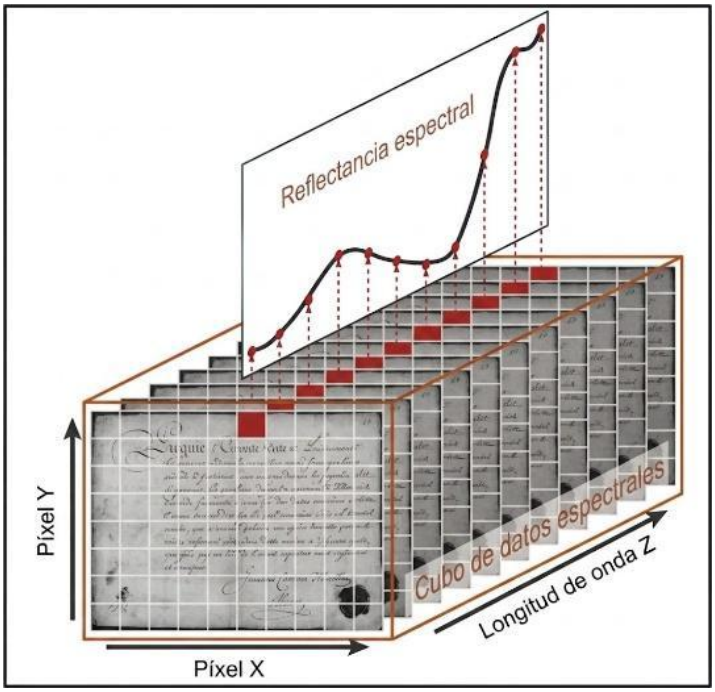


Figura 2. *Representación del cubo de imágenes multiespectral basado en un sistema de tres coordenadas, dos espaciales (X e Y), y una espectral que indica la longitud de onda empleada (o banda) bajo la cual se ha registrado la imagen. Se ha anexado en este caso la curva de reflectancia obtenida a partir del análisis de un píxel de la imagen multiespectral donde cada píxel de las distintas imágenes espectrales aporta información de la intensidad de la radiación reflejada.*

La interacción entre la radiación incidente y la materia es específica para cada material gracias a sus estructuras electrónicas atómicas y moleculares, lo que da lugar a perfiles espectrales característicos, ya sea en términos de curvas de reflectancia o de absorbancia. Este comportamiento diferencial se basa en que cada material absorbe y refleja la energía luminosa en proporciones distintas según la longitud de onda, generando patrones espectrales únicos que permiten su identificación (4,5).

A consecuencia de la organización en forma de cubo de datos, una imagen multiespectral permite determinar la cantidad de radiación reflejada en cada banda espectral. Para un píxel dado, sus coordenadas espaciales (X, Y) permanecen constantes, mientras que la coordenada espectral (λ) varía al considerar cada una de las imágenes adquiridas. De este modo, se obtienen múltiples valores de intensidad (int_λ) para un mismo píxel, a partir de los cuales es posible construir su curva de reflectancia. Esta curva de respuesta espectral constituye una representación más completa del comportamiento del material que la simple observación de las imágenes individuales, ya que permite analizar de manera directa la interacción entre la radiación y la materia.

Este enfoque ha sido ampliamente aplicado en diversos campos. En teledetección, por ejemplo, el análisis multiespectral permite evaluar el estado de la vegetación mediante indicadores asociados al contenido de clorofila (6,7). En el ámbito industrial, se emplea para la clasificación automática de productos, como la detección de daños en frutas a partir de variaciones en su respuesta espectral (8,9). Asimismo, en el análisis de obras de arte, las técnicas multi e hiperespectrales permiten inferir la composición química de pigmentos y soportes (10,11).

La calidad de la curva de respuesta espectral depende en gran medida del número y la distribución de las bandas espectrales empleadas. En general, la curva será más suave y representativa cuanto mayor sea el número de bandas y menor el intervalo entre ellas. Este aspecto resulta determinante para la resolución espectral del sistema, ya que una distribución inadecuada —ya sea por concentración de bandas en una región limitada del espectro o por intervalos excesivamente amplios— puede implicar la pérdida de información relevante. Dado que la respuesta espectral es una propiedad intrínseca de cada material, los sistemas de adquisición buscan estimarla con la mayor fidelidad posible.

Por último, para finalizar de dar un marco a esta introducción, debemos aclarar que no existe un consenso estricto respecto a la definición de imagen multiespectral en función del número de bandas utilizadas. En términos generales, se considera que un conjunto de hasta una o dos decenas de bandas constituye una imagen multiespectral (3,13,14). Cuando el número de bandas aumenta significativamente —alcanzando decenas o incluso centenas— se habla de imágenes hiperespectrales (3,13). En contraste, el uso de una única banda da lugar a una imagen espectral simple. En consecuencia, la principal diferencia entre imágenes espectrales, multiespectrales e hiperespectrales radica en la cantidad de bandas empleadas y, por ende, en el nivel de detalle con el que puede reconstruirse la respuesta espectral de los materiales (ver figura 3).

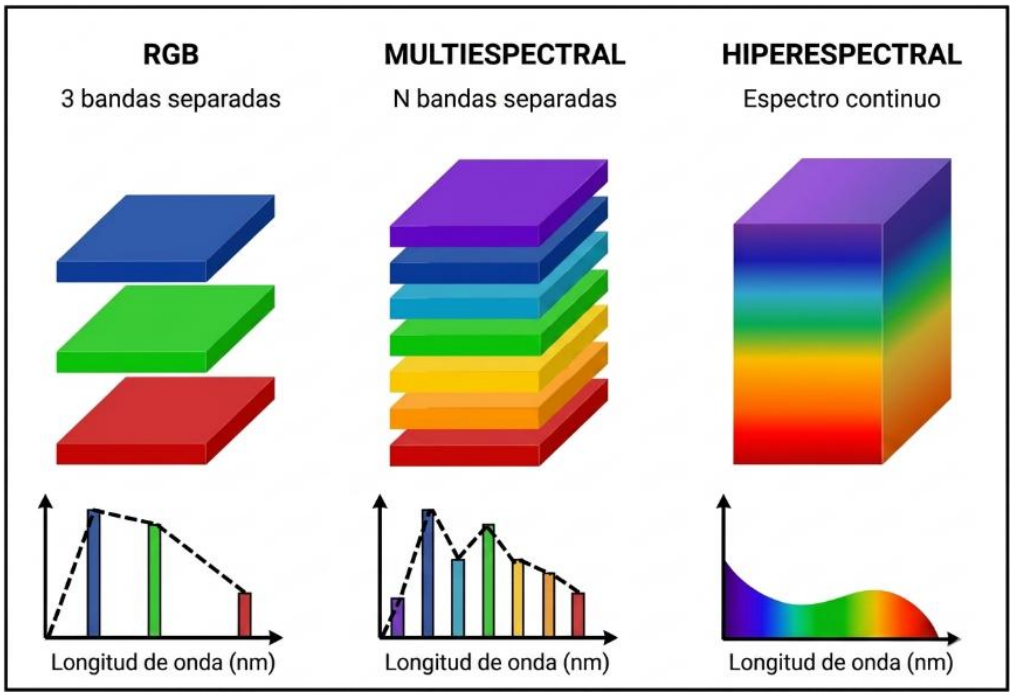


Figura 3. *Representación de la cantidad de imágenes espectrales que conforman el cubo de datos. A la derecha vemos una imagen RGB, que no es más que una imagen multiespectral constituida por tres capas (tres imágenes espectrales), al centro vemos una imagen multiespectral conformada por siete capas, mientras que a la derecha vemos una imagen multiespectral donde la cantidad de imágenes espectrales empleadas alcanza los cientos de imágenes. Asimismo, debajo observamos las curvas espectrales que se pueden obtener en cada caso, y como cada curva presenta menos quiebres y líneas rectas en la medida que se aumenta la cantidad de capas. De este ejemplo se desprende que la imagen RGB no refleja correctamente la curva de respuesta espectral, mientras que la obtenida de la imagen multiespectral lo hace un poco mejor, y finalmente, la extraída de la imagen hiperespectral presenta curvas suaves que copia perfectamente la curva espectral que podría haberse obtenido mediante equipos más sofisticados.*

Obtención de imágenes espectrales y multiespectrales

La obtención de imágenes espectrales, destinadas a la construcción de una imagen multiespectral, es relativamente sencillo y puede lograrse por diversos caminos, cada uno de los cuales presenta sus ventajas, desventajas, además de una mayor o menor complejidad técnica. Uno de los procedimientos más comunes consiste en fotografiar el objeto de interés bajo la incidencia de distintas radiaciones las cuales pueden corresponder a porciones del UV, del Visible, y/o del IR. Otra de las opciones seguidas habitualmente, en virtud de su baja complejidad, consiste en iluminar el objeto a fotografiar con una fuente de luz blanca estandarizada (D50 o D65) -en lugar de emplear diferentes iluminantes y capturar las imágenes multiespectrales mediante el uso de filtros de paso de banda estrecha. Gracias a estos, la selección de las radiaciones con que se han de construir las imágenes espectrales, se logra a partir de la discriminación realizada por la transmitancia de cada filtro empleado. Al contrario de la primera opción, donde la selección de radiaciones se realiza previo a la incidencia sobre el objeto, en esta última opción, la selección de radiaciones se realiza luego de que han incidido. En teoría, la elección de uno u otro sistema no debe afectar los resultados (14); sin embargo, esto es parcialmente cierto ya que es posible que algunas de las radiaciones que conforman a la luz blanca puedan provocar fenómenos de luminiscencia en el sustrato o en algún otro elemento y que esto desvirtúe las capturas por reflectancia ya que para algunos filtros se podrían registrar simultáneamente radiaciones reflejadas más radiaciones emitidas. Una alternativa a este problema consiste en la implementación de un sistema mixto donde la luz incidente se encuentre concentrada en bandas más o menos estrechas y que las radiaciones reflejadas sean seleccionadas mediante filtros de paso de banda (ver figura 4).

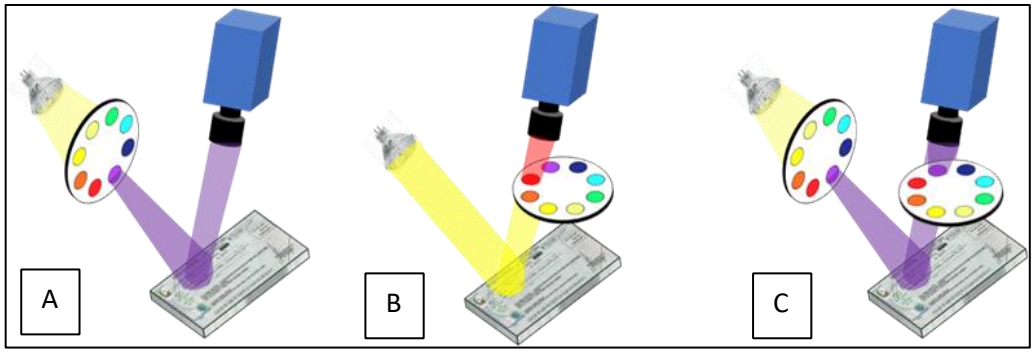


Figura 4. *Esquema de configuración para la obtención de imágenes espectrales y multiespectrales. Aquí observamos las diferentes configuraciones. Uno de los caminos más comunes consiste en iluminar el documento con diferentes radiaciones seleccionadas a partir de una rueda de filtros (A); otra de las opciones se basa en la implementación de la rueda de filtros, pero ubicadas por delante del sensor de la cámara, lográndose de esta forma un sistema donde se seleccionan las radiaciones luego de que han sido reflejadas en el documento (B). Finalmente, vemos en la gráfica un sistema mixto (C), pensado para solucionar posibles interferencias por luminiscencia no deseadas.*

La cámara empleada en cualquiera de los dos sistemas, o incluso en el mixto, no requiere otras cualidades que encontrarse en su modo de espectro completo (no poseer *hot mirror*), y – en lo posible- ser monocromática (no poseer grilla de Bayer), aunque esta última condición no es imprescindible, pero sí recomendable ya que incrementa notoriamente la calidad de las imágenes y se reduce el procesamiento que deben requerir las imágenes espectrales. Adicionalmente, para seleccionar el sistema de captura de imágenes multiespectrales a utilizar, es necesario que se consideren otras cuestiones técnicas. Debemos considerar que las imágenes multiespectrales requieren de un gran número de imágenes perfectamente alienadas entre sí de manera de que cada píxel de una imagen espectral coincida con el equivalente de la siguiente capa. Debido a esto, muchas de las cuestiones técnicas relevantes que se deben evaluar contemplan soluciones que eviten posibles movimientos o desalineaciones que puedan ocurrir entre cada

captura. Además, la diferencia en los puntos de enfoque que requieren las distintas radiaciones (el índice de refracción de los lentes de la cámara varía para cada longitud de onda), obligan a constantes ajustes en el enfoque de las imágenes, lo cual modifica el tamaño del objeto en la imagen espectral capturada y, a su vez, pueden ser una causa de desalineaciones. Ante este conjunto de posibles perturbaciones que modifican las imágenes multiespectrales, existen soluciones que provienen de la aplicación de software y de hardware. A las soluciones por hardware se recurre primero de manera que se minimice la necesidad de aplicación de software ya que esto reduce los tiempos de procesamiento de las imágenes. Por citar un ejemplo, se evita toda vez que sea posible, el uso de enfoque manual, utilizando lentes motorizados controlados por ordenador. Esta solución evita cualquier alteración o movimientos involuntarios que puedan desalinear las imágenes. De esta forma, solo resta ajustar el tamaño de los elementos enfocados para que coincidan, lo cual es posible realizarlo mediante correcciones por software.

Como es sabido, el índice de reflexión que tiene una sustancia depende del ángulo de incidencia de las radiaciones. Debido a ello, cuando se emplean fuentes de luz, el ángulo de incidencia de la luz aplicada, es un punto a considerar, ya que, si bien se evitan con este sistema, las desalineaciones o movimientos de la cámara al cambiar los filtros, es posible que se afecten las imágenes espectrales y no brinden las intensidades de brillo que deberían. Ante esta posibilidad, las fuentes de iluminación se deben diseñar de manera tal que se compensen, y la forma de incidencia de cada tipo de radiación sea prácticamente igual, independientemente de cada tipo de radiación. Por lo visto, la generación de imágenes espectrales no es complejo desde el punto de vista teórico, lo que sí es verdaderamente difícil es obtener un set de imágenes espectrales que se puedan emplear en la construcción de un cubo de datos multiespectral. Sin perjuicio de todo lo expuesto, es importante señalar que las imágenes multiespectrales se pueden emplear con distintas finalidades o aplicaciones, donde algunas son más rigurosas en cuanto a la construcción del sistema de captura multiespectral. Por ejemplo, si el sistema multiespectral se aplica en el reconocimiento de frutas en una cinta transportadora, los fenómenos de luminiscencia son inexistentes por cuanto no se deben de tener en cuenta como así tampoco las soluciones técnicas para evitarlos. Nuevamente, si se desea identificar una tinta presente en un documento comparando el espectro de reflectancia obtenido de la imagen multiespectral, con uno de referencia obtenido mediante un espectrofotómetro u otro dispositivo, las condiciones de construcción de nuestro sistema de captura deberán ser sumamente estrictos ya que se buscará obtener una curva lo más fiel posible a la real; sin embargo, si lo que deseamos es comparar dos o más tintas presentes en un mismo documento en cuanto a su similitud o identidad, es posible que algunas de las consideraciones anteriormente destacadas puedan ser obviadas, flexibilizándose la construcción de un sistema de captura multiespectral a bajo costo. El uso de cámaras monocromáticas (ideales desde lo teórico) no es una constante y diferentes trabajos sugieren la implementación de sensores RGB convencionales (15,16,17,19,20,21). Esta última posibilidad de opciones constructivas donde cámaras fotográficas digitales convencionales (DSLR)(19,20), cámaras de video (21,23), o mismo, las cámaras que equipan los teléfonos celulares (24,25,26,27,28) pueden emplearse con éxito en la construcción de sistemas de captura multiespectral.

Aunque ha pasado desapercibido para la gran mayoría de nosotros, hemos realizado en más de una oportunidad imágenes multiespectrales. La captura RGB convencional es un caso sencillo de imagen multiespectral y se utiliza normalmente para documentación, para obtener una réplica del original (3,14). Por ello, cada vez que hemos realizado una imagen a color (RGB) del estado de nuestro documento hemos construido un cubo espectral constituido por tres imágenes espectrales. Una imagen constituida a partir de las radiaciones Verdes, una imagen correspondiente a la banda de las radiaciones Rojas, y una imagen creada a partir de la banda de radiaciones Azules. Esto es así, ya que el CFA (Color Filter Array) habitualmente en forma de grilla de Bayer con sus tres filtros nos ha permitido crearlas a pesar

de nuestra falta de consentimiento. A partir de este cubo de tres capas podríamos también obtener información de respuesta espectral para cada píxel de la imagen: sin embargo, la mayor o menor utilidad de las imágenes multiespectrales depende de la cantidad de imágenes espectrales (capas) que compongan el cubo, y es por ello que, si tuviéramos la opción, deberíamos sumar más bandas (sumar más filtros o luces) con las cuales componer un cubo de mayor número de capas, y consecuentemente, mayor cantidad de información. Sustentados en lo anterior, cámaras multiespectrales comerciales, en algunos casos, emplean sistemas denominados "Multispectral Filter Arrays" donde los sensores se encuentran cubiertos por grillas compuestas por cuatro o más filtros que los rojos, verdes, y azules habituales (14).

Materiales y métodos

La cámara

Si bien existen cámaras diseñadas específicamente para la adquisición de imágenes multi e hiperespectrales —capaces de capturar un gran número de bandas espectrales—, su elevado costo limita su disponibilidad, restringiendo su uso a entornos altamente especializados. En este contexto, y con el objetivo de acercar estas técnicas al ámbito del análisis forense documental, el presente trabajo se centra en el uso de cámaras RGB convencionales operando en modo de espectro completo (*full spectrum*). Para ello, se empleó la cámara de un teléfono celular Motorola One Fusion, equipada con un sensor de 48 MP, acoplada a un sistema de filtros de paso de banda (ver figura 5).

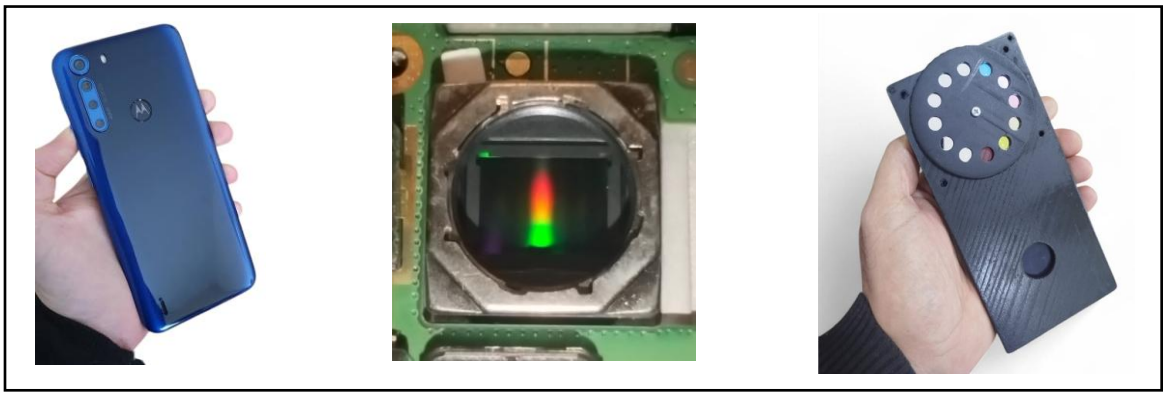


Figura 5. *Proceso de conversión del teléfono celular a multiespectral. La cámara ser despojada del filtro UV-IR-CUT (Hot Mirror) para convertirla en espectro completo. Luego, mediante una carcasa la rueda de filtros es acoplada al teléfono.*

Los filtros

La selección de las bandas espectrales utilizadas para la construcción de imágenes espectrales puede realizarse mediante distintos métodos. Sin embargo, uno de los enfoques más accesibles consiste en el uso de filtros de paso de banda con transmitancias estrechas y bien caracterizadas. Estos filtros permiten restringir con precisión las radiaciones que llegan al sensor, facilitando la selección de regiones específicas del espectro electromagnético.

Para el presente estudio se emplearon 11 filtros dicroicos con máximos de transmitancia en: 460, 490, 535, 570, 630, 690, 730, 780, 850, 900 y 940 nm, todos ellos con anchos de banda inferiores a ±20 nm (ver figura 6).

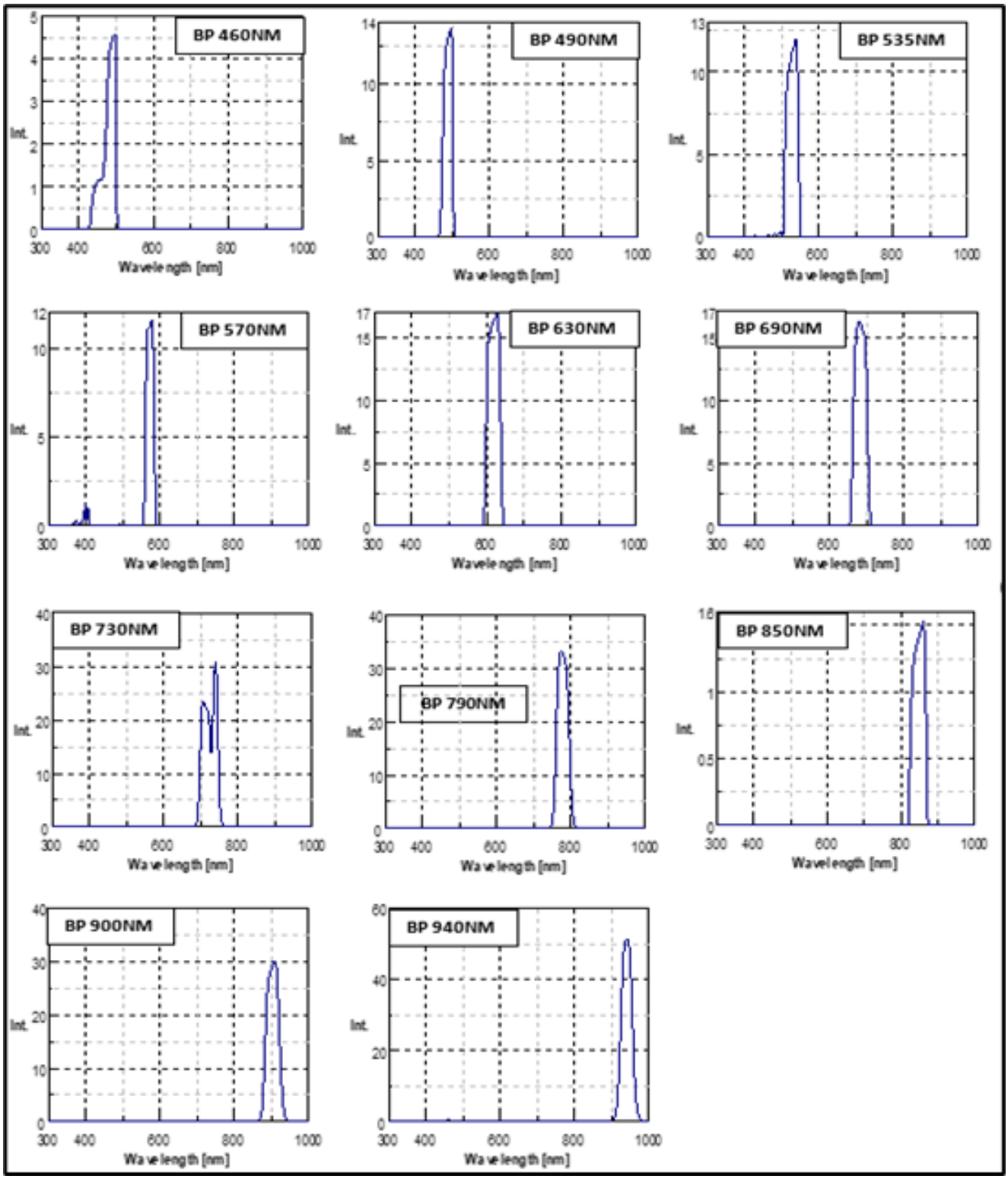


Figura 6. *Curvas de transmitancia de los filtros paso de banda empleados en la construcción del sistema de captura multiespectral.*

El sistema de iluminación multiespectral

Para lograr una iluminación homogénea de los documentos, tanto en lo espacial como así también en lo espectral, se empleó un conjunto de cuatro lámparas de luz blanca, dos LED y dos incandescentes. Estas fueron posicionadas de forma alternada, equidistantes y cruzadas, de manera que todas incidieran en una misma área de fotografiado (ver figura 7). Si bien el sistema distaba de ser ideal o estandarizado, nos sirvió como un mecanismo de prueba para lograr imágenes multiespectral mediante un teléfono celular y un conjunto de filtros. De igual forma, los resultados obtenidos nos permitieron tener sustento para evaluar la posibilidad de implementar un sistema mixto (luz LED monocromática y filtros paso de banda) en futuras investigaciones.

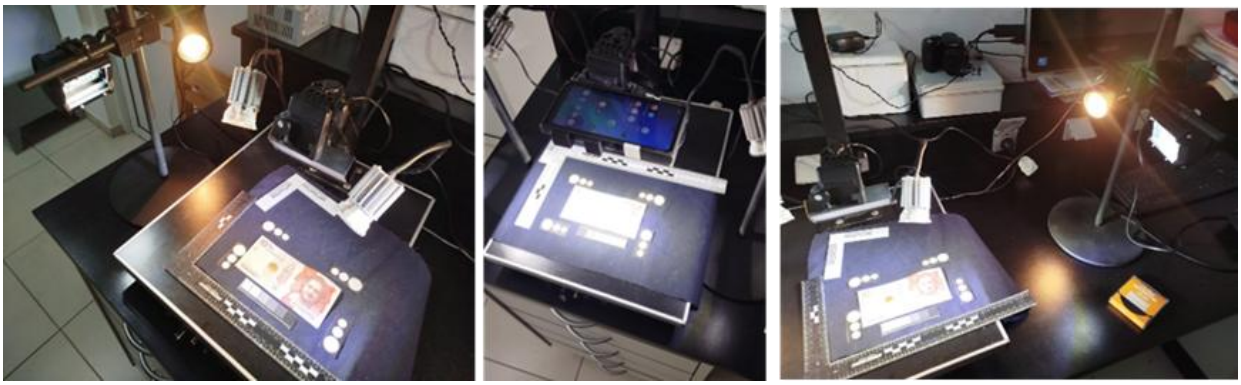


Figura 7. *Fuente de iluminación multiespectral construida en base a diodos LED y bulbos incandescentes.*

Almacenamiento de las imágenes espectrales

El dispositivo de captura seleccionado no solo fue elegido por poseer un sensor de 48Mpx, o una óptica apropiada y de calidad tal que permitía obtener imágenes a media distancia sin mayores deformaciones. La posibilidad de control digital del enfoque, y otros valores de exposición (ISO, Apertura de Diafragma, Velocidad de Obturación), además de permitir que las imágenes se almacenaran en formato con compresión (JPEG) y sin compresión (RAW) fueron igualmente determinantes. Esta última cualidad nos permitió trabajar con los archivos de datos previo a la interpolación, para así optimizar el empleo de la información captada por el sensor al disponer de los datos brindados por cada píxel del mismo. Esta posibilidad, si bien no evitó la necesidad de procesamiento adicional de las imágenes espectrales previo a ser empleadas en la construcción del cubo de datos multiespectral, habilitó el empleo de sensores RGBs.

Procesamiento de las imágenes espectrales

Calibración

Durante la adquisición de imágenes espectrales, la respuesta del sensor puede variar según la longitud de onda, generando diferencias de intensidad que no dependen del objeto analizado sino de la sensibilidad espectral del dispositivo. Para corregir este efecto, se incorporó una tarjeta de calibración con parches de reflectancia conocida, abarcando desde valores cercanos al negro hasta el blanco (ver figura 8).

La linealización de la respuesta se realizó mediante el ajuste de una función polinómica de tercer grado (17), lo que permitió corregir eficazmente la no linealidad del sensor.

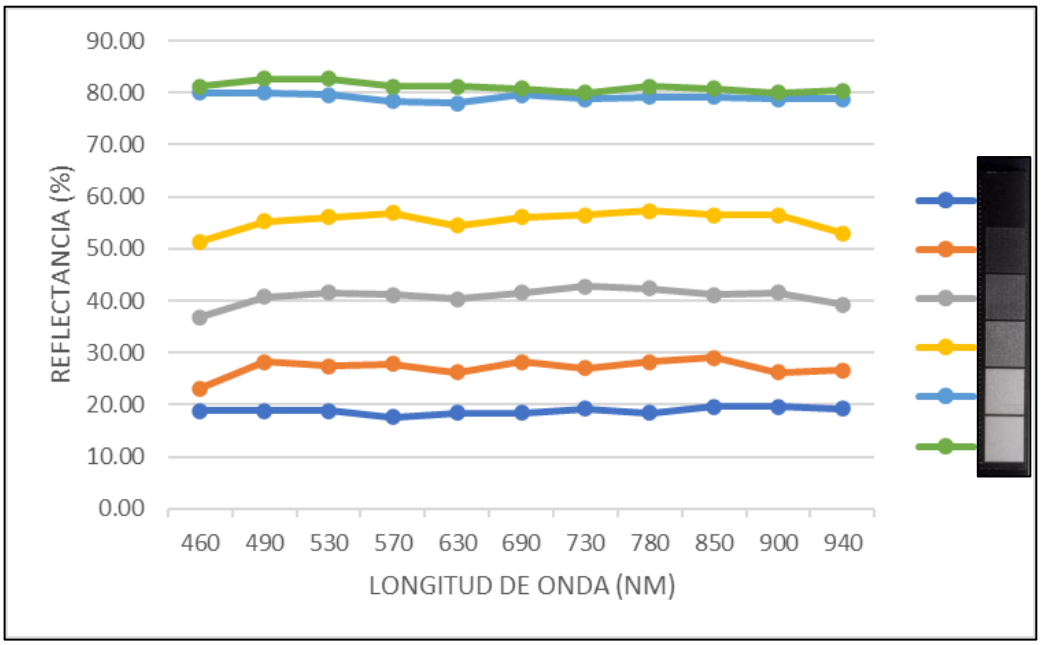


Figura 8. *Cuvas de reflectancia que demuestran la respuesta del sensor ante la incidencia de las distintas radiaciones. Como se puede apreciar, luego de la calibración el sensor mide de forma lineal e independiente de la radiación empleada, respondiendo solo a la cualidad de reflexión que muestran cada uno de los parches de calibración. Las curvas de los parches de mayor reflectancia (81%y 79%) se superponen por un error en la impresión que no logro marcar una mayor diferencia entre ellos como estaba pautada.*

Selección de las imágenes espectrales

Dado que el sistema de captura se basa en un sensor RGB, cada imagen espectral contiene tres canales (R, G y B). Sin embargo, los procesos de posprocesamiento —como balance de blancos, interpolación cromática y corrección gamma— alteran los valores originales de intensidad. Para evitar estas modificaciones, se utilizaron archivos en formato RAW, permitiendo acceder a los datos radiométricos sin procesar. Posteriormente, se separaron los canales RGB y se seleccionó, para cada filtro, el canal con mayor correspondencia espectral. La selección final fue:(Filtro – canal):

460(B), 490(B), 535(G), 570(G), 630(R), 690(R), 730(R), 780(R), 850(R), 900(R), 940(R)

Puesto que cada canal es una imagen en escala de grises, luego de la separación en canales, linealización, y selección de la imagen más descriptiva, obtuvimos un total de 11 imágenes en escala de grises con las cuales conformar el cubo de reflectancia (ver figura 9). Cada uno de los canales seleccionados fueron evaluados y corregidos en cuanto a la saturación, es decir, previo a la calibración, cada una de las tres imágenes RGB (extraídas de los archivos RAW) fue corregida para que en ningún caso los píxeles llegaran a valores de brillo de 255 puesto que la respuesta lineal no puede ser calculada en esos casos donde la señal registrada es mayor a la escala o rango de valores empleados.

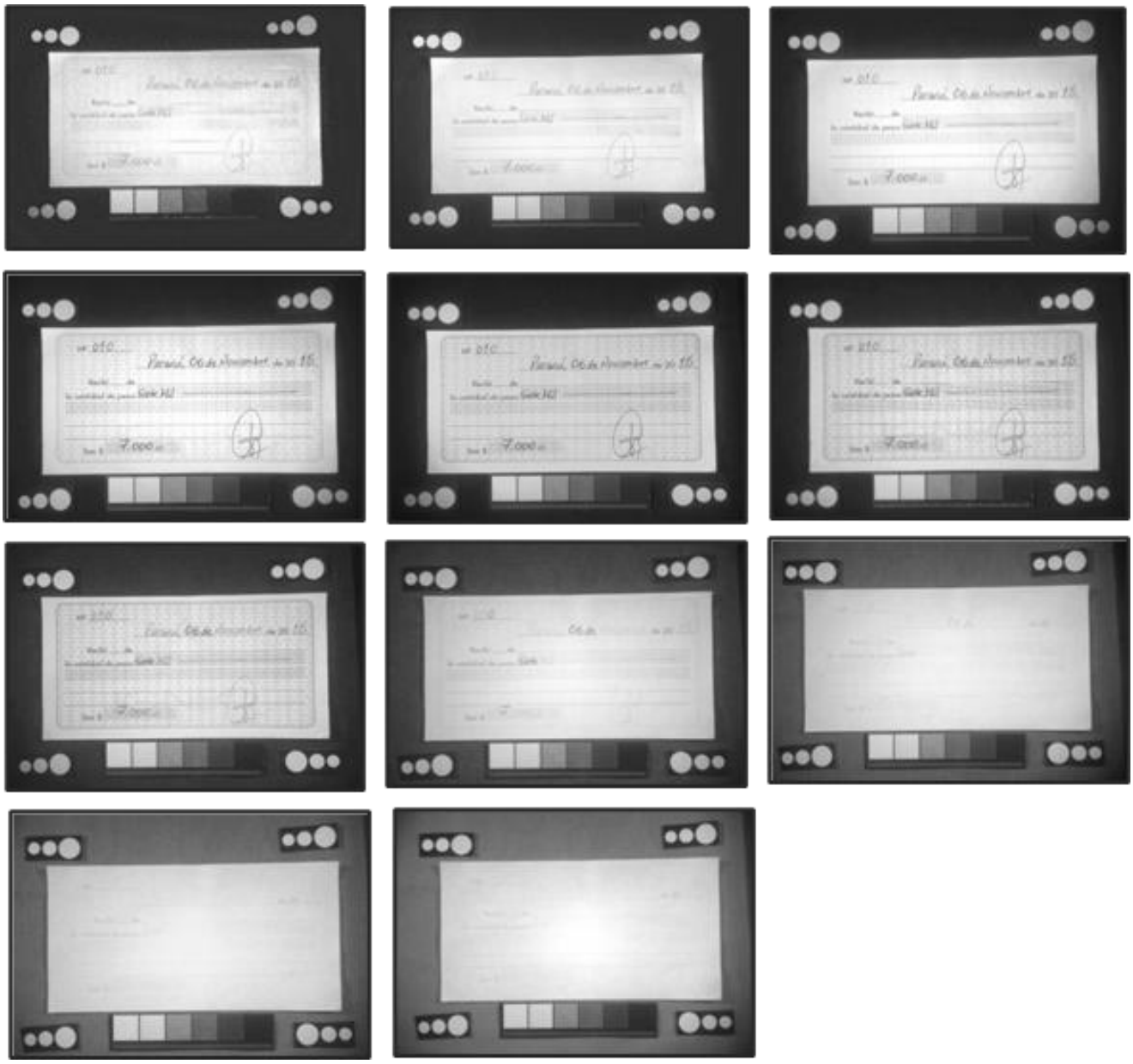


Figura 9. *Composición de imágenes espectrales obtenidas empleando los filtros paso de banda con transmitancias en: 460nm, 490nm, 535nm, 570nm, 630nm, 690nm, 730nm, 780nm, 850nm, 900nm, y 940nm.*

Registro de las imágenes espectrales

El registro de imágenes es un paso crítico en la construcción del cubo multiespectral, ya que garantiza la correspondencia espacial entre píxeles de distintas bandas. La desalineación introduce errores significativos en la firma espectral, generando artefactos visuales y distorsiones en las curvas de reflectancia (ver figura 10).



Figura 10. *Composición de imágenes que permite reconocer el aspecto que adquieren las imágenes multiespectrales no registradas de manera adecuada. Mientras a la izquierda observamos una imagen donde las tres capas RGB que la conforman se encuentran perfectamente alineadas y los bordes de la figura se observa bien definido, en la imagen de la derecha, un registro inadecuado de las imágenes espectrales que la componen provoca bordes indefinidos con halos o rebordes de color.*

Para su corrección, se utilizaron puntos de referencia (hitos) ubicados en los vértices del documento, permitiendo el alineamiento automático mediante software (ver figura 11).



Figura 11. *Imagen de documento previo al inicio de las capturas espectrales. Aquí, en cada uno de los cuatro vértices del documento se han posicionado hitos que serán reconocidos por el software que usemos para realizar el registro de las distintas imágenes.*

Construcción de las imágenes multiespectrales (HyperCube)

Existen para esta operación distintas piezas de software a las cuales recurrir, siendo algunas gratuitas. Entre las últimas podemos contar con HyperCube, un software con origen militar creado en el año 2014 para el análisis remoto del terreno a partir de imágenes satelitales que, a pesar de sus años, sigue siendo de utilidad para quienes deseamos ingresar en el campo del análisis forense mediante imágenes multi o hiperespectrales. El proceso de creación de un cubo de imágenes no es complejo, pero sí un proceso tedioso y que demanda gran cantidad de tiempo según la cantidad de imágenes o capas con que cuente la imagen multi o hiperespectral. Con este software no solo logramos componer un cubo de datos, sino que nos permitió asimismo realizar algunos procesos de análisis más sencillos.

Análisis de las imágenes multiespectrales (HYPERCUBE y GERBIL)

Para el procesamiento de las imágenes multiespectrales (cubo de datos) se recurrió a dos softwares de acceso gratuito: el anteriormente mencionado HyperCube y un segundo paquete más moderno, potente y con una interfaz gráfica más intuitiva, denominado Gerbil (3).

Uno de los primeros desafíos al momento de trabajar con imágenes multiespectrales fue la selección del método de análisis más adecuado. La gran variedad de técnicas disponibles, sumada a la complejidad matemática que muchas de ellas implican, requiere conocimientos avanzados en procesamiento de imágenes. Además, estas metodologías se encuentran aún poco difundidas en el ámbito del análisis forense de documentos, donde su aplicación ha sido más frecuente en estudios de carácter histórico. En este contexto, el presente trabajo se centró en un conjunto de procedimientos de análisis que, además de ser relativamente sencillos de implementar, presentan un alto potencial para su aplicación en el ámbito forense documental.

El primero de estos procedimientos, y probablemente el más intuitivo, consistió en la extracción de la firma de reflectancia a partir de una región de interés de la imagen multiespectral (ROI, por sus siglas en inglés). Esta firma, representada como una curva, posibilitó comparar visualmente distintos elementos presentes en un documento, tales como trazos de tinta, patrones de fondo o incluso sustratos que, a simple vista, pueden parecer similares.

Es importante señalar que la fidelidad de estas curvas respecto de la reflectancia real de los materiales depende, en gran medida, de la cantidad de filtros empleados, su ancho de banda transmitida, y de la proximidad entre sus bandas de transmitancia. En consecuencia, la capacidad de esta técnica —al igual que otras basadas en firmas espectrales— puede verse limitada al intentar discriminar materiales con comportamientos de reflectancia muy similares. Por este motivo, y considerando las características del sistema de captura utilizado, no se esperó resolver problemáticas de alta complejidad espectral.

Como se observa en la figura (12), el análisis de pequeñas regiones del documento permitió obtener curvas de reflectancia con formas diferenciadas, lo que indica la presencia de materiales distintos (tintas diferentes). Asimismo, la superposición de estas curvas en una misma grafica nos explicó por qué una de las tintas puede volverse menos visible en determinadas imágenes espectrales, mientras que en otras ambas presentan niveles de oscuridad similares.

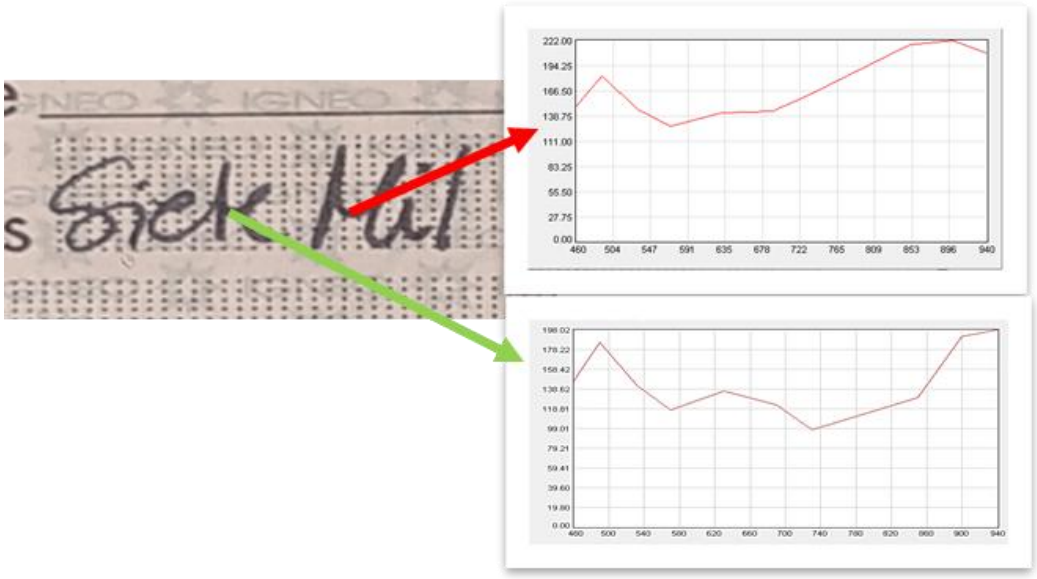


Figura 12. *Imagen en color de una porción de documento (ROI) donde se indican los puntos de muestreo correspondientes a trazos dubitados e indubitados. Las curvas de respuesta espectral asociadas a cada punto (conjunto de píxeles) se representan mediante flechas. Aunque presentan similitudes, dichas curvas exhiben diferencias que permiten discriminar entre las tintas empleadas.*

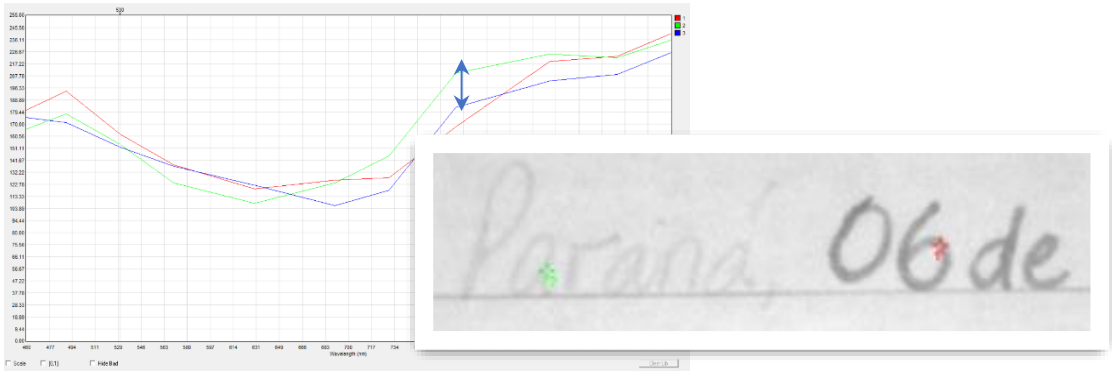


Figura 13. *Gráfica de curvas de reflectancia correspondientes a tres puntos de un documento analizado. En la ampliación de la imagen espectral obtenida a 850nm se identifican los puntos de muestreo 1 y 2 (rojo y verde, respectivamente). La diferencia de reflectancia entre ambas curvas permite interpretar las variaciones de intensidad observadas en la imagen.*

Estos comportamientos pueden explicarse de manera sencilla: la tinta que menos radiación absorbe es aquella que más refleja, y por lo tanto se percibe como menos oscura en la imagen (ver figura 13). La comprensión de estos fenómenos y su manifestación en las imágenes espectrales resulta fundamental, tanto para interpretar correctamente los resultados como para fundamentar técnicamente las conclusiones en un informe pericial.

Otro procedimiento de análisis consiste en la identificación y agrupamiento (*clustering*) de píxeles con comportamiento espectral similar. Mediante la asignación de colores específicos a cada grupo, es posible generar mapas de distribución que representan, de manera visual, la información previamente

expresada en forma de curvas. Este tipo de procesamiento se conoce como clasificación no supervisada, ya que no requiere entrenamiento previo ni la intervención directa del operador en la definición de las clases. En la práctica, el analista selecciona regiones de interés correspondientes a distintos elementos del documento; el software calcula sus firmas espectrales, agrupa los píxeles con comportamientos similares y asigna un color a cada grupo, representándolos como una máscara sobre la imagen original (ver figura 14).



Figura 14. *Comparación entre la imagen en color del documento cuestionado (arriba) y el resultado de la clasificación basada en el comportamiento espectral de los píxeles (abajo). El procesamiento permite identificar claramente el uso de distintas tintas en la confección del documento.*

Cuando el volumen de información espectral es elevado, como ocurre en documentos con gran variabilidad cromática, pueden emplearse métodos adicionales de análisis no supervisado. Entre ellos, los mapas autoorganizados (Self-Organizing Maps, SOM) permiten reducir y representar la información espectral en grupos según su comportamiento de reflectancia. Las representaciones obtenidas mediante SOM resultan especialmente útiles en aplicaciones como la identificación de tintas metaméricas en billetes u otros documentos de seguridad (ver figura 15). Estas tintas son difíciles de reproducir por falsificadores, por lo que su detección constituye una herramienta de gran valor en la identificación de documentos apócrifos.



Figura 15. *Comparación entre la imagen en color del documento y el resultado del análisis mediante técnicas de clasificación espectral.*

Como alternativa a los métodos no supervisados, es posible aplicar técnicas de clasificación supervisada. En este enfoque, el analista proporciona información previa sobre los materiales que desea identificar. Esto se logra incorporando, dentro de la escena de captura, muestras de referencia de los elementos de interés (ver figura 16). En el caso del análisis documental, si el objetivo es identificar un tipo específico de tinta, se deberá incluir una muestra indubitada en la misma escena. De forma análoga, este enfoque puede aplicarse al análisis de billetes, permitiendo identificar ejemplares falsificados a partir de la comparación con muestras auténticas.

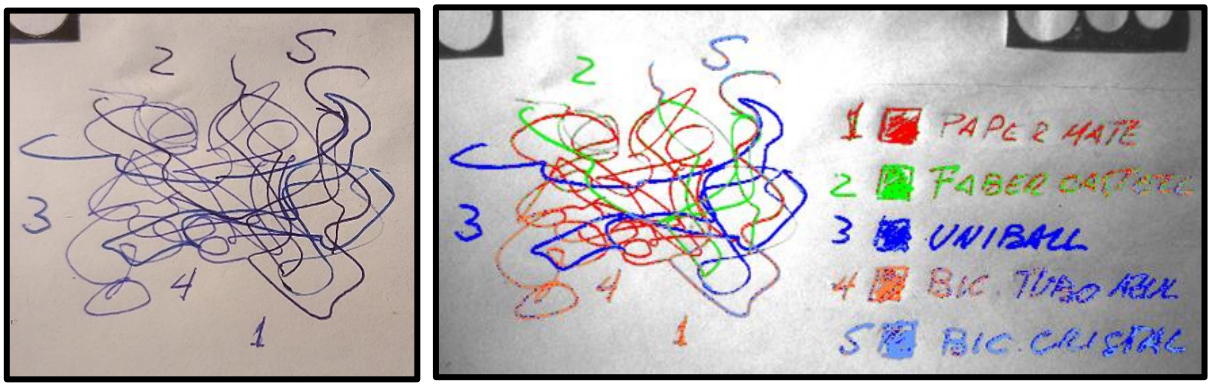


Figura 16. *Comparación entre la imagen en color del documento y el resultado del análisis mediante técnicas de clasificación espectral. En este caso se ha realizado un análisis supervisado donde se adjuntaron muestras de cinco tintas diferentes que se deseaban discriminar.*

Conclusiones

El presente trabajo demuestra la viabilidad de implementar sistemas de adquisición multiespectral de bajo costo mediante el uso de cámaras RGB convencionales adaptadas a espectro completo y filtros de paso de banda.

A pesar de las limitaciones inherentes a este tipo de sistemas —principalmente en resolución espectral y control de condiciones de captura—, los resultados obtenidos evidencian su potencial para aplicaciones en el análisis forense documental.

La posibilidad de extraer firmas espectrales y aplicar técnicas de clasificación permite discriminar materiales aparentemente similares, como distintas tintas, lo que constituye una herramienta valiosa para la detección de alteraciones y falsificaciones.

Futuras investigaciones deberán centrarse en la optimización del sistema de iluminación, la automatización del registro de imágenes y la incorporación de métodos avanzados de análisis espectral, con el fin de mejorar la precisión y reproducibilidad de los resultados.

Referencias

1. Gowen AA, O'Donnell CP, Cullen PJ, Downey G, Frias JM. Recent applications of chemical imaging to pharmaceutical process monitoring and quality control. Eur J Pharm Biopharm. 2008;69(1):10–22. doi:10.1016/j.ejpb.2007.10.013
2. Exline DL, et al. Forensic applications of chemical imaging: latent fingerprint detection using visible absorption and luminescence. J Forensic Sci. 2003;48(5):2002333.
3. Jordan J, Angelopoulou E, Maier A. A novel framework for interactive visualization and analysis of hyperspectral image data. J Electr Comput Eng. 2016;2016:2635124. doi:10.1155/2016/2635124
4. Kise M, et al. Multispectral imaging system with interchangeable filter design. Comput Electron Agric. 2010;72(2):61–68. doi:10.1016/j.compag.2010.02.005
5. Edelman GJ, et al. Hyperspectral imaging for non-contact analysis of forensic traces. Forensic Sci Int. 2012;223(1-3):28–39. doi:10.1016/j.forsciint.2012.09.012
6. Tucker CJ. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. Remote Sens Environ. 1979;8(2):127–150.
7. Xue J, Su B. Significant remote sensing vegetation indices: a review of developments and applications. J Sens. 2017;2017:1–17.
8. Gowen AA, O'Donnell CP, Cullen PJ, Downey G, Frias JM. Hyperspectral imaging—an emerging process analytical tool for food quality and safety control. Trends Food Sci Technol. 2007;18(12):590–598.
9. Qin J, Burks TF, Zhao X, Niphadkar N, Ritenour MA, Bonn WG. Detection of citrus canker using hyperspectral reflectance imaging with spectral information divergence. J Food Eng. 2009;93(2):183–191.
10. Delaney JK, Zeibel JG, Thoury M, Littleton R, Palmer M, Morales KM, et al. Visible and infrared imaging spectroscopy of Picasso's Harlequin Musician: mapping and identification of artist materials in situ. Appl Spectrosc. 2010;64(6):584–594.
11. Liang H. Advances in multispectral and hyperspectral imaging for archaeology and art conservation. Appl Phys A. 2012;106(2):309–323.
12. Klein J, Hill B, Merhof D. Multispectral imaging: aberrations and acquisitions from different viewing positions. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Image Processing (ICIP). 2016.
13. Klein M, Aalderink B, Padoan R, De Bruin G, Steemers T. Quantitative hyperspectral reflectance imaging. Sensors. 2008;8(9):5576–5618.
14. Lapray PJ, Wang X, Thomas JB, Gouton P. Multispectral filter arrays: recent advances and practical implementation. Sensors. 2014;14(11):21626–21659.
15. Cosentino A. Multispectral imaging of pigments with a digital camera and 12 interferential filters. e-Preserv Sci. 2015;12:1–7.

16. Imai FH, Berns RS. Spectral estimation using trichromatic digital cameras. Proc SPIE. 1999;3648:42–49. doi:10.1117/12.336597
17. Hashimoto M, Kishimoto J. Two-shot type 6-band still image capturing system using commercial digital camera and custom color filter. In: Proc Colour Graphics Imaging Vis. 2008;4(1):538–541.
18. Dichter DW. Low-cost visible light spectral imaging. J Int Colour Assoc. 2021;27.
19. Czempiel T, Roddan A, Leiloglou M, Hu Z, O'Neill K, Anichini G, et al. RGB to hyperspectral: spectral reconstruction for enhanced surgical imaging. Healthc Technol Lett. 2024;11(6):307–317. doi:10.1049/htl2.12098
20. Rueda H, Lau D, Arce GR. Multispectral compressive snapshot imaging using RGB image sensors. Opt Express. 2015;23(9):12207. doi:10.1364/OE.23.012207
21. Tiuftiakov NY, Kalinichev AV, Khairullina E, Gigiadze EK, Peshkova MA, Tumkin II. Simple and cost-efficient classification of ballpoint pen inks using digital color analysis. Anal Chem. 2021;93(12):5015–5019.
22. Bennett EP, Mason JL, McMillan L. Multispectral bilateral video fusion. IEEE Trans Image Process. 2007;16:1185–1194.
23. Ormaechea O, Villazón A, Escalera R. A spectrometer based on smartphones and a low-cost kit for transmittance and absorbance measurements in real time. Opt Pura Apl. 2017;50(3):239–249.
24. Gao J, Wang H, Guo S, Chen S, Zhou X, Chen Q, et al. Development of a smartphone-based multispectral imaging system and its performance validation through radiodermatitis assessment. Appl Opt. 2025;64(12):3158.
25. Ding H, Chen C, Zhao H, Yue Y, Han C. Smartphone-based multispectral imager and its potential for point-of-care testing. Analyst. 2019;144(14):4380–4385.
26. Stuart MB, Davies M, Hobbs MJ, Boone NA, Stanger LR, et al. Low-cost hyperspectral imaging with a smartphone. J Imaging. 2021;7(8):136.
27. Dissanayake D, Herath V, Godaliyadda GMR, Ekanayake MP, Bandara C, Prabhath GW. Design of a multispectral imaging system for industrial applications. 2019. doi:10.13140/RG.2.2.36834.68800
28. Bianco G, Bruno F, Muzzupappa M. Multispectral data cube acquisition of aligned images for document analysis using a filter-wheel camera with focus control. J Cult Herit. 2013;14(3):190–200.
29. Reinhard E, Ward G, Pattanaik S, Debevec P. High dynamic range imaging: acquisition, display, and image-based lighting. 2nd ed. Morgan Kaufmann; 2010.
30. Matasaru C. Mobile phone camera possibilities for spectral imaging [Internet]. Itä-Suomen yliopisto; 2014 [cited 2026 Apr 4]. Available from: https://erepo.uef.fi/handle/123456789/14467.

Análogos del fentanilo en México: vacíos normativos y desafíos periciales en la construcción del objeto material del delito

González Lozano Rafael Uriel[1]✉, Rebollar López Erika Jazmín[2], Hernández Valois Solcamiri[3]

[1]Fiscalía General de la República. Calle Boulevard Cuauhnáhuac N°103. Col. Ricardo Flores, 62370 Cuernavaca, Morelos.

[2]Hospital Regional de Alta Especialidad "Centenario de la Revolución Mexicana" ISSSTE. Av. Universidad N° 40. Col. Palo Escrito, 62765 Emiliano Zapata, Morelos.

[3]Fiscalía General del Estado de Morelos. Blvd. Apatlaco 165, Campo Del Rayo, 62590 Temixco Morelos.

✉ rafael.gonzalezl@fgr.org.mx

Datos del artículo

Cita

González-Lozano R., Rebollar-López E.J., Hernández-Valois S. Análogos del fentanilo en México: vacíos normativos y desafíos periciales en la construcción del objeto material del delito. ReCiF, 2026(2):68-77

Editor

María Elena Bravo Gómez

Revisión por pares

Uno

Recibido

1/enero/2026

Aceptado

10/agosto/2026

Publicado

30/octubre/2026

Creative Commons CC-BY-NC-SA 4.0 Internacional

Resumen

La aparición constante de análogos del fentanilo ha generado problemas recurrentes en la aplicación del derecho penal de la salud, particularmente en la identificación de la sustancia asegurada y en la determinación del objeto material del delito. En México, el marco normativo vigente se apoya principalmente en listados y categorías legales cerradas, diseñadas para sustancias previamente identificadas, lo que introduce tensiones cuando se enfrentan compuestos emergentes con variaciones estructurales mínimas, pero efectos farmacológicos relevantes.

Esta situación produce consecuencias directas en la práctica pericial química y en el valor probatorio de los dictámenes forenses, especialmente cuando la sustancia analizada no coincide de forma expresa con las denominaciones normativas disponibles. La incertidumbre analítica puede trasladarse al plano jurídico, afectando la tipicidad penal, la consistencia de las imputaciones y la previsibilidad de las decisiones judiciales.

El presente trabajo analiza los principales vacíos normativos que inciden en este fenómeno, explica el papel estructural de la prueba pericial química en la construcción del objeto material del delito y examina, desde una perspectiva de derecho comparado, los modelos regulatorios adoptados en Estados Unidos, China, Canadá y la Unión Europea. A partir de este análisis, se identifican ventajas, límites y riesgos de los distintos enfoques, así como sus implicaciones para la práctica pericial y procesal. El estudio se plantea como una contribución al debate técnico-jurídico sobre sustancias emergentes, sin asumir posturas punitivas ni propositivas de política criminal, y centrando la discusión en la coherencia entre norma, ciencia y prueba.

Palabras clave: Análogos del fentanilo; vacíos normativos; tipicidad penal; prueba pericial química; objeto material del delito; derecho comparado.

Abstract

The continuous emergence of fentanyl analogues has generated recurring challenges in the enforcement of drug-related criminal law, particularly regarding the identification of seized substances and the determination of the material object of the offense. In Mexico, the existing regulatory framework relies primarily on closed legal lists and predefined categories, which were designed for previously known substances and may be insufficient when addressing structurally modified, emerging compounds.

This mismatch produces direct consequences for forensic chemical practice and the evidentiary value of expert reports, especially when the analyzed substance does not explicitly match the legal denominations available in statutory instruments. Analytical uncertainty may thus be transferred to the legal sphere, affecting criminal typification, prosecutorial consistency, and judicial predictability.

This article examines the main regulatory gaps relevant to this issue, explains the structural role of forensic chemical evidence in establishing the material object of the offense, and develops a comparative legal analysis of regulatory approaches implemented in the United States, China, Canada, and the European Union. The analysis highlights the advantages, limitations, and risks of each model, as well as their implications for forensic and procedural practice. The study aims to contribute to the technical-legal discussion on emerging substances, focusing on the alignment between law, science, and evidence, without adopting a policy-oriented or punitive stance.

Key words: Fentanyl analogues; regulatory gaps; criminal typification; forensic chemical evidence; material object of the offense; comparative law.

Introducción

La expansión de los opioides sintéticos ha modificado de manera significativa los esquemas tradicionales de control penal de sustancias. A diferencia de otras drogas fiscalizadas, el fentanilo y sus análogos presentan una particularidad relevante: pequeñas modificaciones estructurales pueden dar lugar a compuestos nuevos con efectos farmacológicos similares o incluso superiores, sin que necesariamente coincidan con las denominaciones o descripciones previstas en los listados normativos vigentes (1,2). Esta característica introduce una tensión constante entre la velocidad de innovación del mercado ilícito y la capacidad de respuesta de los marcos regulatorios basados en enumeración.

En el contexto mexicano, dicha tensión no se limita a una cuestión formal sobre si una sustancia se encuentra o no expresamente regulada. El problema se manifiesta de forma más profunda en la aplicación práctica del derecho penal, donde la tipicidad depende de la identificación precisa del objeto material del delito (3). Cuando se trata de análogos del fentanilo, esta identificación deja de ser un paso

accesorio y se convierte en un punto estructural del proceso penal, pues de ella depende la posibilidad misma de subsumir el hecho en un tipo penal válido, sin vulnerar los principios de legalidad y prohibición de analogía en perjuicio del imputado (4).

La regulación vigente en México descansa, de manera predominante, en esquemas de control por listados y categorías cerradas, articulados principalmente a través de la Ley General de Salud y su coordinación con la legislación penal (5). Si bien este modelo ofrece certeza para sustancias plenamente identificadas, muestra límites evidentes frente a compuestos emergentes. En estos casos, la correspondencia entre la sustancia asegurada y la norma aplicable puede resultar incompleta o discutible, trasladando el conflicto desde el plano normativo hacia el ámbito probatorio y procesal.

En este escenario, la prueba pericial química adquiere un papel central. No se trata únicamente de confirmar la presencia de un opioide sintético, sino de establecer, con metodología válida y trazable, si la sustancia analizada puede ser jurídicamente considerada como controlada conforme a los parámetros legales vigentes (6). La dificultad técnica inherente a la identificación de análogos —frecuentemente presentes en microcantidades y con perfiles analíticos complejos— ha sido ampliamente documentada en la literatura especializada, particularmente en relación con la necesidad de métodos confirmatorios robustos y bibliotecas de referencia confiables (7,8).

Las consecuencias de esta situación son observables en la práctica: criterios dispares entre autoridades, incremento de la litigiosidad en audiencias, dictámenes periciales cuestionados por insuficiencia metodológica y resoluciones judiciales que oscilan entre la judicialización y el archivo de los asuntos por problemas de tipicidad o de prueba (9). Estos efectos no responden necesariamente a una falta de voluntad institucional, sino a un desajuste estructural entre norma, ciencia aplicada y exigencias probatorias del proceso penal.

A partir de este diagnóstico, el presente trabajo analiza los vacíos normativos que inciden en el tratamiento jurídico de los análogos del fentanilo en México, examina el papel de la prueba pericial química en la construcción del objeto material del delito y contrasta este escenario con modelos regulatorios adoptados en otras jurisdicciones. El objetivo no es proponer soluciones punitivas, sino aportar elementos técnicos para una discusión informada sobre la coherencia necesaria entre regulación, práctica pericial y garantías procesales frente a sustancias emergentes.

Marco normativo aplicable a los análogos del fentanilo en México

El régimen jurídico mexicano para el control de estupefacientes y psicotrópicos se estructura, de manera central, a partir de la Ley General de Salud (9), la cual establece un sistema de listados y categorías mediante los cuales se determinan las sustancias sujetas a fiscalización, así como los niveles de control administrativo y penal correspondientes. Este modelo responde a una lógica de enumeración expresa, en la que la existencia del objeto material del delito se vincula directamente con la identificación normativa de la sustancia asegurada.

En condiciones ordinarias, dicho esquema permite una aplicación relativamente clara del derecho penal, en tanto la sustancia puede ser subsumida sin dificultad dentro de una denominación legal previamente prevista. Sin embargo, esta técnica normativa muestra limitaciones relevantes frente a la aparición de sustancias emergentes, particularmente en el caso de los análogos del fentanilo, cuya

variación estructural mínima puede generar compuestos no expresamente incluidos en los listados vigentes.

El problema no radica en la inexistencia de control sobre el fentanilo como sustancia base, sino en el desfase temporal y técnico entre la velocidad de innovación química del mercado ilícito y la actualización formal de los instrumentos normativos. Cuando el control penal depende de listados cerrados, cualquier modificación estructural no prevista abre un espacio de incertidumbre respecto de la tipicidad (10), aun cuando los efectos farmacológicos y el riesgo sanitario sean sustancialmente equivalentes.

Esta situación genera consecuencias procesales concretas. En la práctica forense y judicial, los casos vinculados con análogos del fentanilo pueden derivar en criterios divergentes por parte de autoridades investigadoras y jurisdiccionales, oscilando entre la judicialización del asunto o su archivo por insuficiencia típica o probatoria, dependiendo del grado de correspondencia alcanzado entre la sustancia analizada y las categorías legales disponibles.

Desde una perspectiva estructural, estos efectos no responden a una falla aislada del sistema, sino a un desajuste entre la arquitectura normativa y las exigencias probatorias del proceso penal. La técnica legislativa basada exclusivamente en la enumeración exige, para su correcta operación, una identificación pericial concluyente que no siempre resulta alcanzable en el contexto de opioides sintéticos altamente diversificados.

A partir de este diagnóstico, resulta necesario examinar de manera articulada el marco normativo vigente, el papel de la prueba pericial química en la construcción del objeto material del delito y las experiencias regulatorias desarrolladas en otras jurisdicciones, con el propósito de identificar criterios que permitan reducir la fragilidad probatoria sin comprometer los principios de legalidad y garantía penal (9).

Marco normativo mexicano aplicable

El control jurídico de los estupefacientes y psicotrópicos en México se encuentra estructurado, de manera central, en la Ley General de Salud, la cual establece un sistema de listados y categorías para determinar qué sustancias se encuentran sujetas a fiscalización y en qué condiciones administrativas y penales deben ser tratadas. Este modelo parte de una lógica de enumeración expresa, en la que la existencia del objeto material del delito depende de la correspondencia entre la sustancia asegurada y una denominación normativa previamente definida (9).

Desde el punto de vista operativo, el esquema resulta funcional cuando se trata de sustancias consolidadas y ampliamente conocidas. Sin embargo, su aplicación se vuelve problemática frente a la aparición de sustancias emergentes, particularmente en el caso de los análogos del fentanilo, cuya estructura química permite modificaciones mínimas capaces de generar compuestos no expresamente incluidos en los listados vigentes (9, 10).

El punto crítico del marco normativo no es la ausencia de control sobre el fentanilo como sustancia base, sino el desfase estructural entre la velocidad de innovación química del mercado ilícito y los tiempos de actualización legislativa. Cuando el control penal se apoya exclusivamente en listados cerrados, cualquier variación no prevista abre un espacio de incertidumbre respecto de la tipicidad penal, aun cuando los efectos farmacológicos y el riesgo sanitario sean equiparables.

En este contexto, la autoridad sanitaria conserva facultades administrativas de control y vigilancia sobre sustancias relacionadas con estupefacientes y psicotrópicos. No obstante, dichas facultades no resuelven por sí mismas la exigencia penal de tipicidad estricta, ni suplen la necesidad de una definición legal clara que permita la subsunción del hecho sin comprometer el principio de legalidad (10).

Las consecuencias prácticas de esta configuración normativa se reflejan en criterios dispares durante la investigación y judicialización de los casos. Dependiendo del grado de correspondencia entre la sustancia identificada pericialmente y los listados legales disponibles, los procedimientos pueden derivar en imputaciones sostenidas o en determinaciones de archivo o sobreseimiento por insuficiencia típica o probatoria.

En suma, el marco normativo mexicano evidencia una tensión estructural entre la técnica legislativa basada en enumeración y la realidad dinámica de los opioides sintéticos. Esta tensión no es meramente teórica, sino que incide directamente en la eficacia del sistema penal y en la solidez de las decisiones procesales adoptadas en materia de delitos contra la salud (10).

Vacíos normativos en México: diagnóstico fino y consecuencias reales

Los vacíos normativos asociados a los análogos del fentanilo no deben entenderse como una ausencia total de regulación, sino como fallas identificables en la técnica normativa vigente que producen efectos directos en el ámbito procesal penal. Se trata de vacíos funcionales que emergen cuando la norma positiva no logra absorber, con precisión suficiente, fenómenos químicos dinámicos y altamente variables (1).

El primer vacío se origina en la técnica legislativa basada en enumeración, característica del sistema de listados previsto en la Ley General de Salud. Este enfoque presupone que las sustancias sujetas a control pueden ser descritas y actualizadas de manera exhaustiva. En el caso de opioides sintéticos, dicha premisa se ve superada por la capacidad de generar derivados mediante modificaciones estructurales mínimas que no alteran sustancialmente el efecto farmacológico, pero sí la identidad química formal (3).

Un segundo vacío se manifiesta en la falta de un puente normativo claro entre el control sanitario y la tipicidad penal. Aunque la autoridad sanitaria puede identificar y vigilar sustancias relacionadas con estupefacientes, esta determinación no se traduce automáticamente en una categoría penal aplicable. La ausencia de una vía explícita que conecte ambos planos genera incertidumbre sobre el alcance jurídico de los hallazgos técnicos (9).

El tercer vacío se relaciona con la ausencia de mecanismos normativos ágiles para la incorporación de sustancias emergentes. La actualización de listados suele depender de reformas formales que operan a un ritmo considerablemente más lento que la evolución del mercado ilícito. Esta asimetría temporal deja espacios en los que la sustancia existe, circula y es incautada, pero carece de una referencia normativa penal clara (2).

Estas deficiencias normativas producen consecuencias procesales concretas. En la práctica, los expedientes vinculados con análogos del fentanilo pueden enfrentar criterios divergentes entre autoridades investigadoras, peritos y órganos jurisdiccionales. El resultado puede oscilar entre la judicialización del caso o su archivo, no por ausencia de riesgo sanitario, sino por insuficiencia típica o fragilidad probatoria.

Finalmente, estos vacíos generan un impacto sistémico al trasladar al ámbito pericial y judicial una carga que corresponde, en origen, al diseño normativo. La exigencia de correspondencia estricta entre sustancia y listado convierte a la prueba pericial química en un punto de tensión estructural, al demandarle resolver, por vía técnica.

La prueba pericial química como condición estructural del objeto material del delito

En los delitos contra la salud, la prueba pericial química no cumple una función meramente ilustrativa, sino que opera como condición estructural para la construcción del objeto material del delito. La existencia jurídica de la sustancia controlada no se presume; debe ser demostrada mediante un dictamen técnico que permita establecer su identidad conforme a parámetros científicamente válidos y jurídicamente relevantes (11).

Cuando se trata de sustancias incluidas de forma expresa en los listados normativos, esta función suele desarrollarse sin mayores tensiones. Sin embargo, en el caso de los análogos del fentanilo, la labor pericial adquiere una complejidad adicional, ya que la identificación química debe enfrentarse a compuestos con variaciones estructurales mínimas que no siempre encuentran una correspondencia directa en la norma positiva (3).

Desde el punto de vista analítico, la identificación de análogos implica retos metodológicos específicos, tanto por la presencia de microcantidades como por la necesidad de emplear técnicas confirmatorias capaces de distinguir entre compuestos estrechamente relacionados. Estas dificultades técnicas no invalidan el dictamen pericial, pero sí condicionan el alcance de sus conclusiones y la forma en que estas pueden ser utilizadas en el proceso penal.

El problema surge cuando la certeza científica alcanzada en el laboratorio no logra traducirse en certeza jurídica suficiente. En estos supuestos, el dictamen puede acreditar la presencia de un opioide sintético con efectos farmacológicos equiparables al fentanilo, sin que ello sea suficiente para afirmar, con el grado de exigencia penal requerido, que se trata de una sustancia expresamente controlada conforme a los listados vigentes (10).

Esta situación coloca a la prueba pericial química en una posición de tensión estructural. Por un lado, se le exige un nivel de precisión que permita sostener la tipicidad penal; por otro, se le impone un marco normativo rígido que limita el valor jurídico de los hallazgos científicos. El resultado es una fragilidad probatoria que no deriva de deficiencias técnicas del peritaje, sino de la falta de correspondencia entre ciencia aplicada y diseño normativo.

En términos procesales, esta fragilidad se manifiesta en la impugnación recurrente de los dictámenes periciales, en la exigencia de pruebas complementarias difíciles de obtener y en decisiones judiciales que privilegian la certeza normativa sobre la evidencia científica disponible. De este modo, la prueba pericial deja de ser un medio de convicción suficiente y se convierte en un punto de disputa central dentro del proceso penal.

Derecho comparado: aproximaciones regulatorias frente a los análogos del fentanilo

La aparición sostenida de análogos del fentanilo no constituye un fenómeno exclusivo del contexto mexicano. Diversas jurisdicciones han enfrentado dificultades similares para integrar sustancias emergentes dentro de marcos normativos diseñados bajo esquemas de control estático. En este sentido,

el análisis comparado permite identificar cómo distintos sistemas jurídicos han intentado reducir el desfase entre innovación química, regulación y exigencias probatorias del proceso penal, con resultados heterogéneos (10).

En Estados Unidos, el tratamiento normativo de los análogos del fentanilo ha evolucionado hacia mecanismos que permiten ampliar el alcance del control más allá de listados estrictos. A través de disposiciones que consideran la similitud estructural y funcional con sustancias previamente controladas, se ha buscado cerrar espacios de evasión normativa. No obstante, este modelo ha generado debates relevantes en torno al alcance de la discrecionalidad interpretativa y a la carga probatoria que recae sobre la identificación pericial de la sustancia (11).

El caso de Canadá muestra un enfoque híbrido, en el que los listados tradicionales se complementan con facultades regulatorias que permiten incorporar sustancias relacionadas mediante instrumentos administrativos adicionales. Este esquema intenta preservar la certeza jurídica propia del sistema penal, al tiempo que introduce cierto grado de flexibilidad frente a sustancias emergentes. Sin embargo, la determinación final de la naturaleza controlada de un análogo continúa dependiendo, en gran medida, de la solidez del dictamen pericial químico (12).

En el ámbito de la Unión Europea, el control de nuevas sustancias psicoactivas se ha articulado mediante sistemas de alerta temprana y evaluaciones de riesgo coordinadas entre agencias especializadas. Este modelo facilita una respuesta relativamente rápida ante la aparición de compuestos emergentes, aunque su traducción al plano penal depende de procesos de armonización normativa que varían entre los Estados miembros. En consecuencia, la aplicación práctica presenta niveles distintos de exigencia probatoria y de seguridad jurídica (13).

Por su parte, China ha optado por un esquema de control por clases químicas, incorporando grupos completos de sustancias con estructuras relacionadas al régimen de fiscalización. Esta estrategia reduce de manera significativa los vacíos normativos frente a la proliferación de análogos, pero concentra amplias facultades regulatorias que, en otros sistemas jurídicos, podrían generar tensiones con los principios de taxatividad y previsibilidad penal (14).

El examen comparado evidencia que los modelos regulatorios más flexibles tienden a disminuir los espacios de indefinición normativa, pero trasladan parte de la tensión al ámbito probatorio y a la interpretación judicial. En contraste, los esquemas basados en listados cerrados ofrecen mayor certeza formal, aunque resultan menos eficaces frente a la dinámica de los opioides sintéticos. En todos los casos, la relación entre norma, ciencia aplicada y prueba pericial se mantiene como un eje crítico para la viabilidad del control penal de los análogos del fentanilo (15).

Discusión: implicaciones periciales y procesales en el contexto mexicano

El análisis conjunto del marco normativo mexicano, los vacíos identificados y las experiencias comparadas permite observar que la problemática asociada a los análogos del fentanilo no se limita a un déficit regulatorio aislado, sino que configura un problema estructural de articulación entre norma penal y prueba científica. En este escenario, la identificación pericial deja de ser un elemento auxiliar del proceso penal y se convierte en un punto decisivo para la viabilidad misma de la imputación (16).

A diferencia de otros ámbitos del derecho penal, en los delitos contra la salud la determinación del objeto material del delito depende casi por completo de la prueba pericial química. Cuando el marco normativo se apoya en listados cerrados, la carga probatoria se intensifica, pues no basta con acreditar la peligrosidad o el efecto farmacológico de la sustancia, sino que resulta indispensable demostrar su coincidencia normativa. Esta exigencia coloca a la pericia en una posición de alta exposición procesal, particularmente frente a sustancias emergentes (17).

Desde el punto de vista procesal, esta configuración favorece escenarios de litigación centrados en la tipicidad, más que en la conducta o en el contexto fáctico del aseguramiento. La discusión se desplaza hacia la validez del dictamen, la metodología empleada y el alcance de sus conclusiones, generando un campo fértil para la impugnación técnica. En estos casos, la solidez científica del análisis no siempre se traduce en fortaleza jurídica suficiente para sostener la imputación penal (18).

El contraste con los modelos comparados muestra que los sistemas que han optado por esquemas más flexibles de control tienden a reducir los espacios de indefinición normativa, pero no eliminan la centralidad de la prueba pericial. Por el contrario, trasladan la discusión hacia la determinación de similitud estructural, funcional o farmacológica, lo que exige peritajes aún más especializados y criterios judiciales claros para su valoración. En este sentido, la flexibilidad normativa no implica una menor exigencia probatoria, sino una reconfiguración de sus parámetros (19).

En el contexto mexicano, la persistencia de listados cerrados sin mecanismos ágiles de actualización refuerza la dependencia del proceso penal respecto de la prueba pericial química. Esta dependencia, sin embargo, se produce en un entorno normativo que no siempre reconoce de forma explícita los límites de la ciencia analítica frente a compuestos altamente diversificados. El resultado es una tensión constante entre la exigencia de certeza penal y la naturaleza probabilística inherente a ciertos análisis químicos (20).

Así, la problemática de los análogos del fentanilo pone de manifiesto una fragilidad sistémica que no puede ser atribuida exclusivamente a deficiencias técnicas del peritaje ni a omisiones puntuales del legislador. Se trata, más bien, de un punto de fricción recurrente entre derecho, ciencia y proceso penal, cuya comprensión resulta indispensable para evaluar la consistencia y previsibilidad del control penal de sustancias emergentes en México (21).

Conclusión

El análisis desarrollado a lo largo de este trabajo permite sostener que la problemática asociada a los análogos del fentanilo en México no puede entenderse como un fenómeno aislado ni como una deficiencia puntual del sistema jurídico o de la práctica pericial. Se trata de una tensión estructural derivada de la interacción entre un modelo normativo basado en listados cerrados y una realidad química caracterizada por la rápida diversificación de sustancias sintéticas (22).

El marco normativo vigente ofrece niveles aceptables de certeza jurídica cuando se enfrenta a sustancias plenamente identificadas y consolidadas; sin embargo, muestra límites evidentes frente a compuestos emergentes cuya identidad química no coincide de manera literal con las denominaciones normativas disponibles. En este contexto, la construcción del objeto material del delito se ve condicionada por una exigencia de correspondencia normativa que no siempre resulta compatible con la dinámica del mercado ilícito de opioides sintéticos (23).

La prueba pericial química adquiere así un papel central, no solo como medio de acreditación fáctica, sino como condición de posibilidad de la imputación penal. No obstante, la carga que se deposita sobre el dictamen pericial excede, en muchos casos, el ámbito propio de la ciencia analítica, al exigirle resolver problemas que son esencialmente jurídicos. Esta situación genera escenarios de fragilidad probatoria que no derivan de deficiencias técnicas del peritaje, sino de la forma en que el sistema normativo articula la relación entre sustancia, prueba y tipo penal (24).

El análisis comparado confirma que esta tensión no es exclusiva del contexto mexicano. Las experiencias internacionales muestran que los modelos regulatorios más flexibles reducen ciertos vacíos normativos, pero trasladan la discusión hacia otros planos, como la interpretación judicial y la valoración de similitud estructural o funcional. En contraste, los esquemas estrictamente enumerativos preservan la certeza formal, aunque resultan menos eficaces frente a la evolución acelerada de los opioides sintéticos (25).

En conjunto, los análogos del fentanilo evidencian un punto crítico de fricción entre derecho penal, ciencia forense y proceso judicial. La comprensión de esta fricción resulta indispensable para evaluar la consistencia, previsibilidad y viabilidad del control penal de sustancias emergentes, así como para delimitar con mayor claridad el alcance y los límites de la prueba pericial química en la construcción del objeto material del delito (26).

Referencias

1. United Nations Office on Drugs and Crime. World Drug Report 2023. Vienna: UNODC; 2023.
2. United Nations Office on Drugs and Crime. Understanding the global opioid crisis. Vienna: UNODC; 2020.
3. European Monitoring Centre for Drugs and Drug Addiction. Fentanyl and fentanyl analogues in Europe. Luxembourg: Publications Office of the European Union; 2019.
4. European Monitoring Centre for Drugs and Drug Addiction. Understanding the “fentanyl phenomenon” in Europe. Lisbon: EMCDDA; 2022.
5. United States Drug Enforcement Administration. Fentanyl-related substances and their impact. Washington DC: DEA; 2018.
6. Government of Canada. Controlled Drugs and Substances Act: Fentanyl analogues amendments. Ottawa: Department of Justice; 2017.
7. State Council of the People’s Republic of China. Regulation on the control of fentanyl-related substances. Beijing; 2019.
8. European Union. Council Decision (EU) 2017/369 on new psychoactive substances. Official Journal of the European Union; 2017.
9. México. Ley General de Salud. Diario Oficial de la Federación, última reforma vigente.
10. México. Código Penal Federal. Diario Oficial de la Federación, última reforma vigente.
11. Scientific Working Group for the Analysis of Seized Drugs (SWGDRUG). Recommendations. Version vigente.
12. European Network of Forensic Science Institutes. Guidelines for the forensic analysis of drugs. ENFSI; 2015.
13. Saferstein R. Criminalistics: An introduction to forensic science. 12th ed. Boston: Pearson; 2018.
14. Houck MM, Siegel JA. Fundamentals of forensic science. 3rd ed. London: Elsevier; 2015.
15. Inman K, Rudin N. Principles and practice of criminalistics. Boca Raton: CRC Press; 2001.
16. Taruffo M. La prueba de los hechos. Madrid: Trotta; 2011.
17. Saks MJ, Koehler JJ. The coming paradigm shift in forensic identification science. Science. 2005;309(5736):892–895.
18. Robertson J, Roux C. Forensic drug analysis and emerging challenges. Forensic Sci Int. 2016;262:21–30.
19. Klette KL, Horn CK, Stout PR. Identification of fentanyl analogs in seized drug samples. J Anal Toxicol. 2016;40(8):588–594.
20. Coelhan M, Parr MK. New psychoactive substances and analytical challenges. Drug Test Anal. 2019;11(8):1074–1085.
21. Huestis M. Analytical challenges in forensic toxicology of opioids. Anal Chem. 2018;90(1):99–112.
22. Boister N. An introduction to transnational criminal law. Oxford: Oxford University Press; 2012.
23. Ashworth A, Horder J. Principles of criminal law. 8th ed. Oxford: Oxford University Press; 2016.
24. Garland D. The culture of control: Crime and social order in contemporary society. Chicago: University of Chicago Press; 2001.
25. National Institute on Drug Abuse. Fentanyl and synthetic opioids: Public health implications. NIDA Research Monograph; 2017.
26. González Lozano RU, Morales Zárate JI, Rebollar López EJ. Revisión documental de fentanilo. Revista Mexicana de Ciencias Penales. 2024;7(22):29–48. doi:10.57042/rmcp.v7i22.657.

Análisis forense de imágenes digitales, fotografías y video: marco normativo y metodológico internacional (2013-2025) Estudio exploratorio-descriptivo

Guzman Soto Marco Antonio[1]✉
[1]Universidad de Guadalajara, Centro Universitario de Tonalá Guadalajara, México.
✉ marco.gsoto@academicos.udg.mx

Datos del artículo
Cita

Guzman-Soto, M.A. Análisis forense de imágenes digitales, fotografías y video: marco normativo y metodológico internacional (2013-2025) Estudio exploratorio-descriptivo, ReCiF, 2026(2):78-87

Editor
Torres Zúñiga Vicente

Revisión por pares
Uno

Recibido
27/jun/2026

Aceptado
11/ago/2026

Publicado
30/oct/2026

Creative Commons CC-BY-NC-SA 4.0 Internacional.

Resumen

La creciente prevalencia de la evidencia visual digital en investigaciones forenses ha consolidado el análisis de imágenes y video como una disciplina crítica para la autenticación, integridad y admisibilidad probatoria. Este artículo presenta una revisión exploratorio-descriptiva de los principales estándares y guías internacionales aplicables al análisis forense de imágenes digitales y video en el periodo 2013-2025, con énfasis en los marcos emitidos por SWGDE, ENFSI, OSAC, UNE, SWGIT e ISO/IEC 17025.

Mediante una estrategia de revisión bibliográfica sistematizada con adaptación de principios PRISMA, se identificaron 40 registros y se incluyeron 15 documentos para análisis comparativo. El examen crítico muestra una convergencia metodológica en preservación de originales, uso de copias de trabajo, trazabilidad mediante hashes, análisis combinado de estructura y contenido, validación de herramientas y documentación de limitaciones.

Sin embargo, los estándares analizados también presentan diferencias de énfasis: UNE privilegia una metodología transversal de evidencia electrónica, ENFSI y OSAC se concentran en autenticación de imágenes, SWGDE desarrolla subdisciplinas analíticas y criterios de admisibilidad, y OSAC y SWGDE incorporan con distinta profundidad formación, sesgo cognitivo y gestión de imágenes.

En conjunto, la literatura revisada indica que no existe un único estándar; un marco operativo armonizado requiere integrar exigencias de integridad, autenticación, capacitación pericial, transparencia procedimental y criterios de admisibilidad judicial.

Palabras clave: Análisis forense digital, autenticación de imágenes, SWGDE, ENFSI, OSAC, admisibilidad de la prueba.

Abstract

The growing prevalence of digital visual evidence in forensic investigations has established image and video analysis as a critical discipline for authentication, integrity, and admissibility as evidence. This article presents an exploratory-descriptive review of the main international standards and guidelines applicable to the forensic analysis of

digital images and video for the period 2013–2025, with an emphasis on the frameworks issued by SWGDE, ENFSI, OSAC, UNE, SWGIT, and ISO/IEC 17025.

Using a systematic literature review strategy adapted from the PRISMA guidelines, 40 records were identified, and 15 documents were included for comparative analysis. The critical review reveals methodological convergence in the preservation of originals, the use of working copies, traceability via hashes, combined analysis of structure and content, validation of tools, and documentation of limitations.

However, the standards analyzed also differ in their areas of emphasis: UNE prioritizes a cross-cutting methodology for electronic evidence; ENFSI and OSAC focus on image authentication; SWGDE develops analytical subdisciplines and admissibility criteria; and OSAC and SWGDE incorporate training, cognitive bias, and image management to varying degrees.

Overall, the reviewed evidence indicates that there is no single standard; a harmonized operational framework must integrate requirements for integrity, authentication, expert training, procedural transparency, and criteria for judicial admissibility.

Key words: Digital forensics, image authentication, SWGDE, ENFSI, OSAC, admissibility of evidence.

Introducción

El análisis forense de imágenes digitales, fotografías y video se ha consolidado como una disciplina crítica para la autentificación e interpretación de evidencia visual en contextos de investigación y judiciales. En un entorno marcado por la expansión de software de edición, inteligencia artificial generativa y *deepfakes*, la confiabilidad probatoria de este material depende no sólo de capacidades técnicas de análisis, sino también del cumplimiento de estándares metodológicos y jurídicos que aseguren su integridad, trazabilidad y admisibilidad.

Como señala Farid (1), pionero en este campo, la imagen forense surge como disciplina científica para detectar manipulaciones en fotografías y videos digitales. En su obra Photo Forensics, establece los principios metodológicos que permiten identificar alteraciones mediante el análisis de inconsistencias en píxeles, iluminación y metadatos, consolidando así un marco teórico y práctico para la investigación criminalística digital.

El análisis forense de imágenes se define como la ciencia que integra habilidades técnicas, científicas y periciales para el estudio de evidencia fotográfica y videográfica, tanto en formato digital como fotoquímico. Su objetivo central es interpretar y determinar el origen, la autoría, la relación técnica entre la imagen y el dispositivo de captura, fundamentalmente, validar la autenticidad e integridad del contenido para preservar su valor probatorio. Como rama de la informática forense, esta disciplina extrae, preserva, analiza y documenta pruebas visuales adquiridas digitalmente, asegurando que los hallazgos cumplan con los estándares de admisibilidad judicial. En esta línea, Fridrich (2) sostiene que la investigación forense de imágenes digitales tiene como objetivo restaurar parte de la confiabilidad

pérdida de este tipo de evidencias, girando en torno a dos preguntas fundamentales: el origen de la imagen y cómo ha sido procesada tras su adquisición.

El proceso de análisis forense de imágenes puede implicar diversas tareas, independientemente del tipo de análisis realizado. Estas tareas se dividen en tres categorías: preparación técnica, examen y evaluación. Ante el auge de la inteligencia artificial, Farid (3) advierte sobre los riesgos de los *deepfakes* y plantea la necesidad de implementar políticas y tecnologías que mitiguen los daños sociales y políticos derivados de la manipulación audiovisual, subrayando que la imagen forense debe evolucionar hacia un enfoque interdisciplinario que combine ciencia, ética y regulación.

La base de cualquier peritaje informático descansa sobre la inmutabilidad de los datos desde el momento del hallazgo. Así lo refiere la guía SWGDE 17-I-001-1.1, el ciclo de vida del aseguramiento de la imagen requiere de directrices obligatorias: generación de huellas digitales mediante funciones hash robustas como SHA-256, y trazabilidad de metadatos EXIF, IPTC y XMP, evitando alteraciones accidentales.

La norma UNE 71506 establece una metodología transversal para el análisis forense de evidencias electrónicas, enfocándose en la cadena de custodia y las fases de identificación, adquisición, conservación y presentación. En contraste, la ENFSI-BPM-DI-03 y la OSAC 2021-S-0036 se especializan exclusivamente en la autenticación de imágenes, destacando que la autenticación no es un paso único, sino un proceso continuo. Asimismo, en colaboración con Agarwal, Farid (4) ha desarrollado métodos para detectar *deepfakes* en video, analizando tanto la apariencia como el comportamiento de los sujetos representados. Estos trabajos demuestran que la imagen forense no se limita a la fotografía estática, sino que se expande hacia el análisis dinámico de secuencias audiovisuales, un avance crucial en la era de la desinformación digital.

Entre las guías del SWGDE (2016 Image Processing Guidelines y 18-V-001-1.1 Video Forensics) se distingue entre operaciones de procesamiento estándar y técnicas avanzadas de restauración. Se enfatiza la reproducibilidad y el registro cronológico de cada acción, así como la correcta extracción de fotogramas clave en video. Por su parte, Torres-Zúñiga (5) establece criterios técnicos y jurídicos para que los jueces valoren si un dictamen pericial es sólido, incluyendo etapas como presupuestos mínimos, recolección, análisis técnico (ELA, fotogrametría, redes neuronales) y presentación de resultados.

El documento más reciente, SWGDE 23-I-001-1.0 (2025), aborda los pilares epistemológicos que sustentan la presentación de pericias ante tribunales, vinculando la aceptabilidad del análisis visual con criterios de validez científica internacionalmente reconocidos (e.g. Daubert, Frye). La validez de las conclusiones se fundamenta en la tasa de error conocida, la revisión por pares y la formación del perito. De acuerdo con el SWGDE (6), el examen de análisis se refiere a la aplicación experta de la ciencia de la imagen para la extracción de información, la caracterización de sus elementos y la interpretación de su estructura. Al respecto, Zatyko (7) indica que los procedimientos de investigación con fines legales implican el análisis de evidencia digital tras un procesamiento adecuado, garantizando la cadena de custodia, la validación matemática, el uso de herramientas certificadas, la repetibilidad, la emisión de informes y la posible presentación de peritos ante los tribunales.

Aunque existe abundante literatura sobre detección algorítmica de manipulaciones, persiste un vacío en la sistematización de los marcos normativos y operativos que orientan la práctica pericial y su valoración judicial. En respuesta a esa brecha, este artículo examina y contrasta las principales directrices emitidas por SWGDE, ENFSI, OSAC, junto con referencias complementarias sobre cadena

de custodia, formación pericial y gestión de evidencia digital, con el fin de identificar concordancias metodológicas y criterios comunes de autenticación.

Desde esta perspectiva, el interés central del trabajo no es desarrollar exhaustivamente cada técnica analítica particular, sino integrar un marco operativo armonizado para la verificación de metadatos, el análisis de inconsistencias estadísticas y semánticas, la preservación de la evidencia original y la documentación pericial necesaria para sostener el valor legal del examen forense. El aporte del estudio radica, así, en articular los estándares técnicos internacionales con los presupuestos de admisibilidad judicial, ofreciendo una hoja de ruta útil frente a los retos actuales de la manipulación visual y la síntesis mediática por inteligencia artificial.

Metodología

El presente trabajo adoptó un enfoque descriptivo-exploratorio mediante una revisión bibliográfica sistemática, adaptando los principios del método PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) para la identificación, selección y reporte de documentos. El objetivo principal fue identificar conceptos clave, metodologías y marcos normativos vigentes en el análisis forense de imágenes digitales.

La búsqueda se limitó a documentos en idioma español e inglés, abarcando el período 2013-2025. La estrategia de búsqueda se ejecutó en abril de 2026, para priorizar publicaciones recientes, guías técnicas actualizadas y estándares internacionales reconocidos. Se consultaron las siguientes fuentes:

1. Bases de datos académicas y repositorios: Scopus, Web of Science, IEEE Xplore, Springer y Google Scholar.
2. Revistas especializadas indexadas: Forensic Science International: Digital Investigation y Journal of Forensic Sciences.
3. Organismos normativos y técnicos: Scientific Working Group on Digital Evidence (SWGDE), European Network of Forensic Science Institutes (ENFSI), Organization of Scientific Area Committees (OSAC/NIST), Scientific Working Group on Imaging Technology (SWGIT), y Asociación Española de Normalización (UNE).

Como palabras clave y operadores lógicos, se utilizó la siguiente cadena de búsqueda: ("forensic image authentication" OR "digital image forensics" OR "video forensics") AND ("workflow" OR "sequence" OR "best practices")

Los criterios de inclusión abarcaron documentos normativos, protocolos y guías técnicas vigentes, y literatura que aborda flujos de trabajo, integridad de la evidencia o detección de manipulaciones en material audiovisual. Los criterios de exclusión consideraron publicaciones fuera del rango temporal, irrelevantes, sin rigor metodológico o sin acceso a texto completo.

El procesamiento analítico de la literatura seleccionada se llevó a cabo en tres etapas: primero, la lectura técnica detallada de cada documento para identificar y registrar variables críticas (metodologías, herramientas y requisitos legales); posteriormente, se categorizó por temas y se agruparon los hallazgos para sistematizar la información; y finalmente, se efectuó un análisis comparativo, contrastando las metodologías de SWGDE, ENFSI y OSAC, con el fin de identificar convergencias, divergencias y mejores prácticas en el campo forense digital.

Resultados

La estrategia de búsqueda se ejecutó en abril de 2026. La búsqueda inicial identificó 40 registros (32 en bases de datos académicas y 8 mediante búsqueda manual en sitios oficiales). Tras eliminar 5 duplicados, se cribaron 35 registros por título y resumen, excluyendo 10 por estar fuera de rango temporal, fuera de tema o en idiomas no elegibles. Se recuperaron 25 informes para evaluación a texto completo, de los cuales 9 fueron excluidos (6 por falta de rigor metodológico, acceso denegado o normativas obsoletas, y 3 por contener información duplicada o repetida). Finalmente, se incluyeron 15 documentos en la revisión (ver Figura 1).

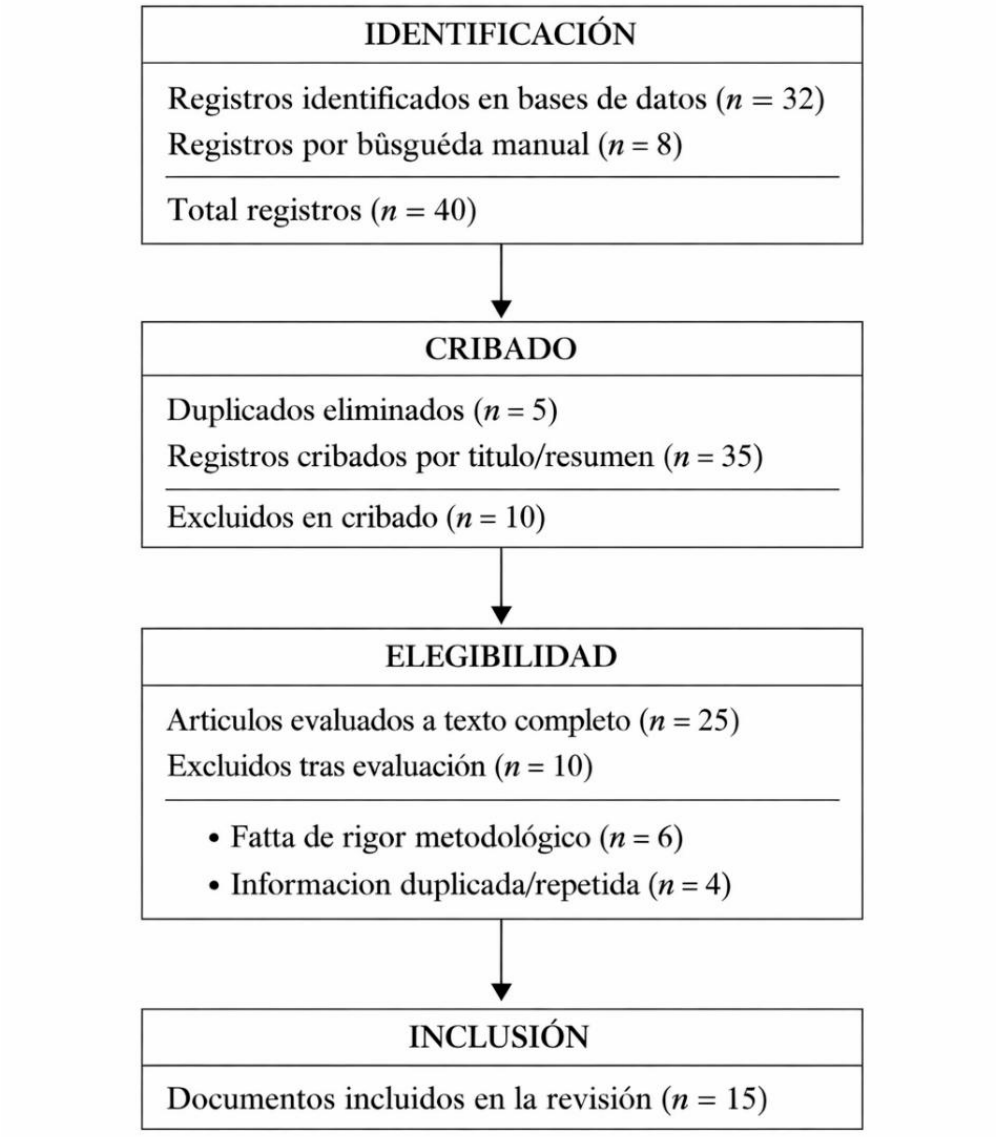


Figura 1. *Diagrama de flujo equiparable al PRISMA. Proceso de identificación, cribado, elegibilidad e inclusión de documentos en la revisión sistemática sobre análisis forense de imágenes digitales, fotografías y videos (2013-2025). Tabla comparativa generada mediante IA Copilot, consultada el 21 de Junio 2026.*

La Tabla 1 presenta las fuentes documentales seleccionadas para este estudio, las cuales incluyen directrices y recomendaciones de organismos normativos y técnicos de reconocido prestigio.

ID	Documento / Norma	Organismo	Año	Objetivo Principal	Hallazgos / Aportes Clave
1	UNE 71506:2013.(8)	UNE	2013	Metodología general para el análisis forense de evidencias electrónicas.	Define fases: preservación, adquisición, análisis, presentación. Establece requisitos de equipamiento y modelo de informe.
2	Best Practice Manual for Digital Image Authentication (ENFSI-BPM-DI-03). (9)	ENFSI	2021	Marco de buenas prácticas para la autenticación de imágenes digitales.	Análisis de metadatos, contenido visual (sombras, perspectiva) y manipulación global/local.
3	Image Processing Guidelines (v.1.0). (10)	SWGDE	2016	Directrices sobre procesamiento digital de imágenes forenses.	Postura sobre mejora, restauración y compresión. Advertencias sobre artefactos y pérdida de información.
4	Standard Guide for Image Authentication (2021-S-0036). (11)	OSAC	2021	Guía para exámenes de autenticación de imágenes.	Diferencia autenticación de integridad. Analiza estructura (metadatos) y contenido (iluminación, artefactos).
5	Guidelines for Forensic Image Analysis (16-I-002-1.1). (12)	SWGDE	2024	Mejores prácticas para tareas analíticas con imágenes.	Define subdisciplinas: Fotogrametría, Comparación, Análisis de Contenido y Autenticación.
6	Legal and Scientific Support Related to the Admissibility of Image Examinations (23-I-001-1.0). (13)	SWGDE	2025	Fundamentos legales y científicos para la admisibilidad del testimonio pericial.	Vincula el análisis visual con criterios Daubert/Frye. Detalla factores de admisibilidad por subdisciplina.
7	Best Practices for Maintaining the Integrity of Imagery (17-I-001-1.1). (14)	SWGDE	2025	Mantener y evaluar la integridad de las imágenes en su ciclo de vida.	Define alteración vs. manipulación. Exige *hashes* (SHA-256) y trazabilidad EXIF/IPTC/XMP.
8	Guidelines and Recommendations for Training in DME (10-Q-002-3.0). (15)	SWGDE	2024	Requisitos de capacitación para personal de evidencia digital y multimedia.	Define categorías de formación (conciencia, habilidades, procesos) y áreas temáticas por rol.

9	Standard Practice for Training in Video/Image Analysis (2023-S-0015). (16)	OSAC	2023	Criterios mínimos para programas de capacitación forense.	Incluye políticas, aspectos legales y factores humanos (sesgo cognitivo). Basada en SWGDE.
10	Section 12: Best Practices for Forensic Image Analysis (v.1.6). (17)	SWGIT	2015	Prácticas para tareas analíticas (versión previa a migración SWGDE).	Describe flujo de trabajo ACE-V (Análisis, Comparación, Evaluación - Verificación).
11	ISO/IEC 17025: Fundamentos y prácticas en laboratorios. (18)	ISO/IEC	2025	Aplicación práctica de la norma ISO/IEC 17025 en laboratorios forenses.	Detalla acreditación, imparcialidad, validación de métodos e incertidumbre de medición.
12	Standard Guide for Forensic Digital Image Management (2024-N-0011). (19)	OSAC	2024	Mejores prácticas para el manejo de imágenes digitales forenses.	Diferencia imagen primaria, original, copia de trabajo y respaldo. Exige procesamiento solo en copias.
13	Guía para la valoración judicial de la prueba pericial en video digital. (20)	Torres Zúñiga V.	2022	Criterios para que jueces valoren dictámenes periciales de video.	Define técnicas: metadatos, tablas de cuantificación, ELA, fotogrametría y redes neuronales.
14	Best Practices for Image Authentication (18-I-001-2.0). (21)	SWGDE	2025	Integrar análisis de estructura y contenido para autenticación.	Exige validación de herramientas, verificación independiente y documentación de limitaciones.
15	Technical Overview of Digital Video Files (17-V-001-1.4). (22)	SWGDE	2017	Aspectos técnicos de archivos de video digital.	Detalla estructura de archivos, codecs y estándares de video para peritos.

Tabla 1. *Resumen de los documentos técnicos y normativos sobre Análisis Forense de Imagen y Vídeo Digital. ; Elaboracion propia con datos de directrices organismos normativos y técnicos.*

El análisis de los documentos revela una convergencia metodológica clara. Por ejemplo, tanto SWGDE como ENFSI exigen que el procesamiento de imágenes se realice exclusivamente sobre copias de trabajo, manteniendo la imagen original inalterada y documentando cada paso mediante hashes criptográficos. Asimismo, se identifica el uso de técnicas avanzadas como el Error Level Analysis (ELA) y el análisis de ruido del sensor de la cámara, el cual actúa como una “huella dactilar” del dispositivo, permitiendo vincular una imagen con la cámara específica que la capturó.

La divergencia principal se presenta de manera específica; UNE aborda un marco transversal de evidencia electrónica, ENFSI y OSAC se concentran en autenticación de imágenes, y SWGDE se dirige a disciplinas analíticas, capacitación y admisibilidad pericial.

El alcance incluye la autenticación, integridad, procedencia técnica y admisibilidad de imágenes, fotografías y video digital en contextos forenses y judiciales. También abarca estándares y guías internacionales sobre cadena de custodia, procesamiento de imágenes, autenticación, capacitación pericial, gestión de imágenes. En síntesis, el alcance del manuscrito adjunto es el de una revisión comparativa de estándares internacionales aplicables al análisis forense de imágenes y video, orientada a organizar criterios de autenticación, integridad y admisibilidad judicial, pero todavía con un desarrollo más compilatorio que crítico.

Discusión

Como revisión descriptiva exploratoria, este trabajo no pretende exhaustividad ni evaluación sistemática de calidad metodológica. La búsqueda se limitó a bases de datos académicas indexadas, la selección de fuentes.

El análisis forense de imágenes se ha consolidado como una disciplina crítica frente a la evolución tecnológica y las nuevas formas de manipulación visual. Además, la rápida obsolescencia tecnológica, particularmente en inteligencia artificial generativa, implica que las técnicas y herramientas actuales requieren actualización continua.

Al contrastar de forma analítica el Manual de Mejores Prácticas de ENFSI (Europa) con las Guías de SWGDE/OSAC (Estados Unidos), se observa un esfuerzo explícito de concordancia internacional. Se presentan divergencias terminológicas; no obstante, el análisis descriptivo actual confirma que ambos bloques continentales coinciden en la adopción del modelo empírico-científico.

La concordancia metodológica se plasma de manera nítida en el tratamiento de las limitaciones del análisis. Ninguno de los estándares analizados promueve el uso de conclusiones absolutas basadas en un único indicador. Por ejemplo, la ausencia de metadatos EXIF no se tipifica automáticamente como prueba de falsificación, sino como un indicador de procesamiento posterior (como el paso de la imagen por servicios de mensajería instantánea que eliminan metadatos por políticas de privacidad). La inferencia de manipulación requiere la convergencia de anomalías en múltiples niveles (ej. discrepancia en las tablas de cuantificación JPEG combinada con discontinuidades en el gradiente de error de nivel, o ELA).

Conclusión

El análisis forense de imágenes y videos digitales se ha consolidado como una disciplina científica orientada a preservar la autenticidad, integridad y valor probatorio de la evidencia visual mediante procedimientos reproducibles, documentación técnica y cumplimiento de estándares internacionalmente reconocidos.

En este sentido la autenticación precisa exige un abordaje sobre el archivo, dispositivo y contenido, ya que ninguno de los estándares revisados respalda conclusiones absolutas. Metodologías como el análisis de ruido del sensor PRNU, por sus siglas en inglés Photo Response Non-Uniformity, deben describirse como una de las aproximaciones para la vinculación entre imagen y dispositivo de captura, pero no como una técnica universalmente aplicable ni suficiente por sí sola para sustentar una conclusión pericial.

El principal aporte del estudio consiste en articular un marco operativo armonizado que integra verificación de metadatos, análisis estructural y semántico, validación de herramientas, verificación independiente y documentación de limitaciones, con el fin de fortalecer la admisibilidad judicial de la prueba multimedia frente a escenarios de manipulación digital cada vez más complejos.

Declaración de uso de IA

Durante la preparación de este manuscrito se utilizaron herramientas de inteligencia artificial (IA), específicamente Consensus, Claude, Qwen y Microsoft Copilot, como herramientas de apoyo al proceso de investigación y redacción. Estas herramientas se emplearon para mejorar la redacción y claridad del texto, apoyar la búsqueda y localización de referencias bibliográficas y elaborar un cuadro explicativo del proceso PRISMA.

El uso de estas herramientas se limitó a funciones de asistencia y no sustituyó el análisis, la interpretación ni el criterio académico del autor. Todo el contenido generado o sugerido por las herramientas de IA fue revisado críticamente por el autor, quien verificó su pertinencia y, en el caso de las referencias, su correspondencia con las fuentes originales. El autor realizó y aprobó la versión final del manuscrito y asume plena responsabilidad por su contenido, precisión, integridad y redacción.

Referencias

1. Farid H. Photo forensics. Cambridge (MA): The MIT Press; 2016.
2. Fridrich J. Digital image forensics. IEEE Signal Processing Magazine. 2009;26(2):26-37. doi: 10.1109/MSP.2008.931078
3. Farid H. Mitigating the harms of manipulated media: confronting deepfakes and digital deception. PNAS Nexus. 2025;4(7): pgaf194. doi: 10.1093/pnasnexus/pgaf194
4. Agarwal S, Farid H, El-Gaaly T, Lim SN. Detecting deep-fake videos from appearance and behavior. En: Proceedings of the 2020 IEEE International Workshop on Information Forensics and Security (WIFS). New York: IEEE; 2020. p. 1-6. doi: 10.1109/WIFS49906.2020.9360904
5. Torres-Zúñiga V. Guía para la valoración judicial de la prueba pericial en materia de análisis de video digital. México: Consejo de la Judicatura Federal, Escuela Judicial; 2022 [citado el 22 de junio de 2026]. Disponible en: https://escuelajudicial.oaj.gob.mx/v2/MicrositioVinculacion/Docs/P01008.pdf
6. Scientific Working Group on Digital Evidence (SWGDE). Guidelines for forensic image analysis (16-I-002-1.1). SWGDE; 2024.
7. Zatyko K. Commentary: defining digital forensics. Forensic Magazine. 2007; 20:1-5.
8. UNE. UNE 71506:2013: Metodología para el análisis forense de las evidencias electrónicas. Madrid: UNE; 2013.
9. ENFSI. Best practice manual for digital image authentication (ENFSI-BPM-DI-03). ENFSI; 2021.
10. Scientific Working Group on Digital Evidence (SWGDE). Image processing guidelines (Version 1.0). SWGDE; 2016.
11. OSAC. Standard guide for image authentication (2021-S-0036). NIST; 2021.
12. Scientific Working Group on Digital Evidence (SWGDE). Guidelines for forensic image analysis (Draft, November 2024). SWGDE; 2024.
13. SWGDE. Legal and scientific support related to the admissibility of image examinations (23-I-001-1.0). Washington, D.C.: SWGDE; 2025.
14. Scientific Working Group on Digital Evidence (SWGDE). Best practices for maintaining the integrity of imagery. Version 17-I-001-1.1. SWGDE; March 2025 [citado el 22 de junio de 2026]. Disponible en: https://www.swgde.org/documents/published-complete-listing/17-i-001-best-practices-for-maintaining-the-integrity-of-imagery/
15. Scientific Working Group on Digital Evidence (SWGDE). Guidelines and recommendations for training in digital and multimedia evidence. Version 10-Q-002-3.0. SWGDE; 2024 [citado el 22 de junio de 2026]. Disponible en: https://www.swgde.org/documents/published-complete-listing/10-q-002-guidelines-and-recommendations-for-training-in-digital-and-multimedia-evidence/
16. OSAC. Standard practice for training in video analysis, image analysis, and photography (2023-S-0015). NIST; 2023.
17. SWGIT. Section 12: best practices for forensic image analysis (v.1.6). SWGIT; 2015.
18. Organización Internacional de Normalización. ISO/IEC 17025:2017: Requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y de calibración [Internet]. Ginebra: ISO; 2017 [citado el 22 de junio de 2026]. Disponible en: https://www.iso.org/standard/66912.html
19. OSAC. Standard guide for forensic digital image management (2024-N-0011). NIST; 2024.
20. Scientific Working Group on Digital Evidence (SWGDE). Best practices for image authentication (18-I-001-2.0). SWGDE; 2025.
21. Scientific Working Group on Digital Evidence. Technical overview of digital video files [Internet]. SWGDE; 2025 Dic 19 [citado 26 Jun 2026]. Informe No.: 17-V-001-1.4. Disponible en: https://www.swgde.org/wp-content/uploads/2025/12/2025-12-19-Technical-Overview-of-Digital-Video-Files-17-V-001-1.4.pdf

Grafoscopía forense: análisis comparativo y desafíos de validación científica del software NEGA en la pericia caligráfica

Rocha Yucra Rodolfo Bruno[1]✉
[1] Universidad San Francisco Xavier, Sucre, Bolivia.
✉ rodolforochay@gmail.com

Datos del artículo
Cita
Rocha-Yucra R.B. Grafoscopía forense: análisis comparativo y desafíos de validación científica del software NEGA en la pericia caligráfica. ReCiF,2026(2):88-100.

Editor
Torres Zúñiga Vicente

Revisión por pares
Uno

Recibido
27/junio/2026

Aceptado
18/agosto/2026

Publicado
30/oct/2026

Creative Commons
Creative Commons CC-BY-NC-SA 4.0

Resumen

La grafoscopía es una de las disciplinas periciales más antiguas de las ciencias forenses documentales, orientada a determinar la autoría de firmas y escritos manuscritos mediante el análisis comparativo de rasgos individuales. Esta disciplina se sustentó tradicionalmente en observación estereomicroscópica, iluminación especializada y cotejo manual; sin embargo, el software especializado de documentoscopia digital ha transformado progresivamente el registro, la medición y el cotejo de los grafismos. El presente artículo realiza una revisión narrativa de las técnicas tradicionales y del software disponible, contrastando sistemas institucionales de uso restringido (FISH, WANDA) con programas comerciales de uso individual, con énfasis en NEGA, desarrollado por MacWinLin CPS y la Asociación Colegial de Peritos Calígrafos y Documentólogos. Se describen sus funcionalidades medibles y se contrastan sus ventajas y limitaciones (curva de aprendizaje, dependencia de hardware, riesgo de error de calibración) frente a los métodos clásicos, junto con una reflexión sobre los estándares Daubert y Frye aplicables al software pericial no validado de forma independiente. Se concluye que ambos enfoques deben integrarse en un modelo pericial híbrido, con un plan de validación científica para NEGA basado en ensayos interlaboratorio y estudios de caja negra.

Palabras clave: grafoscopía; documentoscopia; pericia caligráfica; software forense; NEGA; admisibilidad probatoria.

Abstract

Graphoscopy is one of the oldest expert disciplines within forensic document sciences, aimed at determining the authorship of signatures and handwritten texts through comparative analysis of individual features. For decades, this work relied on traditional techniques (stereomicroscopic observation, specialized lighting, and manual comparison), a foundation that remains fully valid. However, specialized digital software has progressively transformed how examiners record, measure, and compare graphic features. This article reviews traditional graphoscopic techniques and currently available software, contrasting restricted-access institutional systems (FISH, WANDA) with commercial single-user programs, emphasizing NEGA, developed by MacWinLin CPS with the Asociación Colegial de Peritos Calígrafos y Documentólogos. Its measurable functionalities, advantages and limitations (learning curve, hardware dependency, calibration-error risk) are contrasted with classical methods, alongside a reflection on Daubert and Frye admissibility standards for independently unvalidated expert software. A hybrid expert model is proposed, with a validation plan for NEGA based on interlaboratory trials and black-box studies.

Key words: graphoscopy; document examination; forensic handwriting analysis; forensic software; NEGA; Forensic Sciences; evidentiary admissibility.

Introducción

La determinación de la autenticidad de firmas y escritos manuscritos ha acompañado el desarrollo del derecho probatorio desde que los documentos comenzaron a utilizarse como instrumento de constancia jurídica. Ya desde la Antigüedad clásica, la falsificación documental obligó a las autoridades a recurrir a comparaciones grafonómicas para resolver controversias sobre la autoría de un escrito, práctica que se fue sistematizando hasta consolidarse como una disciplina pericial autónoma (1). En este entendido, la obra clásica de Osborn sobre documentos cuestionados sentó buena parte de los principios que aún hoy orientan el examen pericial de la escritura, al establecer que la individualidad gráfica de cada persona constituye el fundamento científico sobre el cual descansa la identificación de escribientes (1).

Dicho de otro modo, la grafoscopía parte de la premisa de que ninguna persona reproduce su trazo de manera idéntica entre dos ejecuciones distintas, sino dentro de un rango de variación natural que el perito debe aprender a diferenciar de la variación atribuible a la falsificación (2). Tal como señalaba Huber y Headrick en su obra de referencia sobre identificación de escritura, esta variación natural (y no la búsqueda de una coincidencia exacta) es el criterio que permite sostener un juicio de identidad con fundamento científico (2). Osborn y Huber y Headrick coinciden, en este sentido, en situar la variación individual del trazo, y no la réplica exacta, como el verdadero objeto del examen pericial.

Durante la mayor parte del siglo XX, el examen grafoscópico se apoyó en instrumental óptico y en procedimientos manuales de comparación (3), caja de herramientas tradicional que continúa siendo recomendada por los principales estándares internacionales de la disciplina, entre ellos el Manual de Buenas Prácticas para el Examen Forense de Escritura de la ENFSI (3) y los estándares del antiguo Scientific Working Group for Forensic Document Examination, hoy incorporados al Academy Standards Board (4).

Paralelamente, distintas instituciones forenses de gran escala desarrollaron sistemas informáticos de uso restringido, entre los que destaca el Sistema Forense de Información para Escritura (FISH), creado por la policía federal alemana y adoptado por instituciones como el Servicio Secreto de los Estados Unidos y el Instituto Forense de los Países Bajos para la búsqueda de coincidencias entre escribientes dentro de bases de datos de gran tamaño (5), así como su herramienta de medición derivada, WANDA (WAM), descrita y evaluada en un artículo arbitrado de la revista Journal of Forensic Document Examination (6). Estos sistemas, sin embargo, no se encuentran disponibles para la práctica pericial individual ni para laboratorios de pequeña escala, dado que su acceso está reservado a instituciones gubernamentales con acuerdos de cooperación forense (5,6). En este vacío de mercado surgieron programas comerciales orientados a la pericia individual, entre ellos MovAlyzeR, desarrollado por la empresa estadounidense NeuroScript para el análisis cinemático del trazo y empleado en estudios arbitrados sobre enfermedades neurodegenerativas y detección de falsificaciones (7,8), y NEGA, orientado al cotejo general de firmas y documentos cuestionados (9).

El presente artículo selecciona a NEGA como caso de estudio central por tres razones concretas. En primer lugar, por tratarse de un programa diseñado y documentado en idioma español, lo cual facilita su análisis crítico para un público lector hispanohablante y reduce las barreras de acceso a su documentación técnica, a diferencia de los sistemas institucionales antes mencionados, cuya documentación es mayoritariamente inglesa y de circulación restringida. En segundo lugar, por su adopción reportada entre peritos calígrafos individuales y pequeños laboratorios en distintos países de

Europa, América Latina, Estados Unidos y Asia, lo que lo convierte en un caso representativo del software comercial de cotejo grafoscópico actualmente en uso fuera del ámbito institucional (9). En tercer lugar, precisamente por la escasez de literatura científica arbitrada que documente su desempeño, a diferencia de lo que ocurre con WANDA o con MovAlyzeR. Este vacío de literatura permite ilustrar, a través de un caso concreto, la brecha existente entre la adopción práctica de herramientas tecnológicas periciales y su validación científica independiente, brecha que constituye uno de los ejes centrales de discusión de este artículo. El propio Instituto Nacional de Estándares y Tecnología de los Estados Unidos (NIST) ha señalado, en su informe sobre factores humanos en el examen de escritura, que la incorporación de herramientas de medición asistida puede contribuir a reducir la variabilidad interobservador propia de un examen cualitativo, sin que ello suponga eliminar el componente subjetivo inherente a la interpretación pericial (10).

Grafoscopía: fundamentos conceptuales y marco pericial

La grafoscopía (también denominada pericia caligráfica o examen forense de escritura) se define como la disciplina forense encargada de determinar, mediante el análisis comparativo de rasgos gráficos individuales, si un escrito o una firma fueron ejecutados por la persona a quien se atribuyen (11). Conviene precisar que la grafoscopía debe diferenciarse claramente de la grafología, disciplina de naturaleza proyectiva orientada a inferir rasgos de personalidad a partir de la escritura, cuya falta de respaldo científico la excluye del ámbito pericial forense propiamente dicho (1).

El examen grafoscópico descansa sobre tres principios ampliamente aceptados. En primer lugar, que ningún escribiente diestro reproduce rasgos gráficos absolutamente idénticos entre dos ejecuciones. En segundo lugar, que toda persona posee un rango de variación natural propio. En tercer lugar, que ningún escribiente puede superar de manera sostenida su propio nivel de habilidad motriz, lo que limita la capacidad de un falsificador para reproducir con naturalidad un grafismo ajeno (1,11). A partir de estos principios, el perito contrasta el material dubitado con material indubitado, que idealmente debe ser contemporáneo, suficiente en cantidad y comparable en cuanto al contenido y a las condiciones de ejecución del documento cuestionado (11).

La interpretación conjunta de los elementos morfológicos, dinámicos y de organización general del escrito exige una valoración experta que continúa dependiendo del criterio del examinador, razón por la cual organismos como la ENFSI han desarrollado escalas de conclusión graduadas (que expresan el grado de apoyo de la evidencia a una u otra hipótesis, en lugar de afirmaciones categóricas) como una forma de comunicar con mayor honestidad epistemológica el nivel de certeza alcanzado en cada dictamen (3).

Técnicas tradicionales de análisis grafoscópico

Las técnicas tradicionales de grafoscopía se apoyan, en su mayoría, en la observación óptica no destructiva del documento cuestionado, complementada en ocasiones con métodos químicos o instrumentales de mayor especificidad.

Examen macroscópico y microscópico del trazo

El punto de partida de todo examen grafoscópico es la observación a simple vista y, posteriormente, bajo lupa o estereomicroscopio, de las características generales y particulares del trazado: arranques, remates, enlaces entre letras, presión ejercida sobre el soporte, retoques y correcciones. El estereomicroscopio, frecuentemente equipado con luz polarizada o ultravioleta, permite apreciar detalles de la carga de tinta y la superposición de trazos imperceptibles a simple vista (4,12).

Técnicas ópticas complementarias

La iluminación oblicua resulta especialmente útil para revelar irregularidades de la superficie del soporte, tales como indentaciones producidas por la presión de un instrumento de escritura sobre hojas superpuestas (12). Por su parte, el examen bajo luz ultravioleta e infrarroja, así como el uso de comparadores de espectro de video, permite identificar diferencias de absorción y reflexión entre tintas que, a simple vista, pueden parecer idénticas, lo cual resulta determinante para detectar adiciones, interpolaciones o alteraciones posteriores en el contenido de un documento (4).

Métodos comparativos clásicos

El cotejo manual mediante transparencias, calcos o superposición física de fotografías constituye el método comparativo más antiguo de la disciplina. Si bien su sencillez operativa lo mantiene vigente en numerosos laboratorios, este procedimiento presenta limitaciones evidentes en cuanto a la precisión de la superposición y a la posibilidad de reproducir exactamente las condiciones de un cotejo realizado con anterioridad, aspectos que han impulsado el desarrollo de alternativas digitales (9).

Métodos químicos e instrumentales complementarios

Cuando el caso lo requiere y media autorización para la realización de pruebas mínimamente invasivas, pueden emplearse técnicas instrumentales adicionales, tales como la cromatografía en capa fina o líquida de alta resolución para la diferenciación de tintas, o el dispositivo de detección electrostática (ESDA) para la revelación de indentaciones latentes en el papel. Estas técnicas suelen reservarse para los casos en que el examen óptico no destructivo resulta insuficiente (4,12).

Software especializado en grafoscopía y documentoscopia

Como se adelantó en la introducción, el software disponible para el examen de escritura puede agruparse en dos categorías claramente diferenciadas: los sistemas institucionales de uso restringido (orientados a la búsqueda de coincidencias dentro de bases de datos de gran tamaño y reservados a instituciones gubernamentales) y los programas comerciales orientados al cotejo individual de un número reducido de muestras, propios de la práctica pericial independiente o de pequeños laboratorios. La Tabla 1 compara tres herramientas representativas de ambas categorías: FISH y WANDA, como ejemplos institucionales, y NEGA, como ejemplo comercial de uso individual.

Criterio	FISH	WANDA / WAM	NEGA
Naturaleza y desarrollador	Sistema institucional desarrollado por la policía federal alemana (BKA) para la búsqueda de coincidencias de escritura en grandes bases de datos.	Herramienta de medición derivada de FISH, desarrollada a partir de un estudio comparativo entre los sistemas FISH y Script.	Software comercial desarrollado por la empresa española MacWinLin CPS en colaboración con la ACPC, de uso individual o por laboratorios pequeños.
Función principal	Digitalizar, medir y almacenar escritura cuestionada y conocida; búsqueda de coincidencias entre escribientes dentro de una población amplia.	Medición interactiva de nueve parámetros equivalentes a los de FISH, más una medición adicional de alógrafos.	Negatoscopio digital, calibración fotométrica y filtros de cotejo y superposición, que integra tres módulos analíticos principales: (i) medición geométrica de óvalos (módulo AOT), (ii) análisis de secuencia temporal en cruces de escritura (filtro SVF – Smart ViewFinder) y (iii) modelado de similitud proporcional para firmas y caracteres alfanuméricos (herramienta FDM – Fibonacci Digital Modeller).
Acceso y costo	Restringido a instituciones forenses gubernamentales (p. ej., Servicio Secreto de EE. UU., Instituto Forense de los Países Bajos); no disponible comercialmente.	Mismo régimen de acceso institucional restringido que FISH.	Disponible comercialmente; el fabricante no publica el precio en su web e invita a contactar directamente para conocer ofertas. Una entrada de un blog del fabricante de enero de 2016 señala precio de venta de la versión de NEGA era de 363 euros
Validación científica reportada	Empleado operativamente durante décadas por laboratorios forenses nacionales; existen estudios comparativos publicados entre FISH y otros sistemas de medición.	Su desarrollo y precisión fueron descritos y evaluados en un artículo arbitrado de la revista Journal of Forensic Document Examination.	Cuenta con un certificado de idoneidad técnica emitido por la ACPC (asociación profesional); no se identificaron estudios de validación independientes publicados en literatura científica arbitrada.
Alcance geográfico	Alemania, Estados Unidos, Países Bajos y otros países con acuerdos de cooperación forense institucional.	Mismas instituciones que utilizan FISH.	Adopción reportada por peritos individuales en Europa, América Latina, Estados Unidos y Asia.

Tabla 1. *Comparación entre FISH, WANDA/WAM y NEGA como sistemas de cotejo grafoscópico, según naturaleza, función, acceso, validación científica reportada y alcance geográfico.*

De la comparación anterior se desprende una diferencia sustancial en el grado de validación científica disponible para cada sistema: mientras que FISH cuenta con décadas de uso operativo documentado y WANDA fue objeto de un estudio de validación publicado en una revista arbitrada (6), NEGA se sostiene, hasta donde permite establecer la literatura disponible, en un certificado de idoneidad emitido por una asociación profesional de peritos (la ACPC) antes que en estudios de validación científica independientes (9). Esta asimetría no implica necesariamente que NEGA carezca de utilidad práctica, pero sí exige que su empleo en un dictamen pericial se acompañe de la cautela metodológica correspondiente, aspecto que se retoma en el apartado de discusión de este artículo.

Existen, sin embargo, otras herramientas de cotejo grafoscópico con desempeño documentado mediante revisión por pares, lo que permite calibrar mejor el caso de NEGA dentro de un panorama más amplio. MovAlyzeR, ya mencionado en la introducción, fue objeto de un estudio publicado en la revista Journal of Forensic Sciences que comparó sus mediciones cinemáticas con las del sistema FLASH ID®, encontrando una relación estadísticamente significativa entre ambos conjuntos de características (8). De manera similar, GRAPHJ, una herramienta académica desarrollada para implementar el protocolo de análisis grafométrico empleado por el Reparto Investigazioni Scientifiche (RIS) de la Arma dei Carabinieri en Italia, fue validada comparando sus mediciones automatizadas de altura y proporción de caracteres con las obtenidas manualmente por un perito, reportando un error porcentual medio reducido entre ambos métodos (13). Estos dos casos ilustran que la ausencia de validación científica independiente no es una limitación inherente al software de cotejo grafoscópico en general, sino una característica particular de NEGA dentro del panorama actual de herramientas disponibles.

El software NEGA: características técnicas medibles

NEGA es un software forense desarrollado por la empresa española MacWinLin CPS en colaboración con la Asociación Colegial de Peritos Calígrafos y Documentólogos (ACPC), razón por la cual también es referido como NEGA ACPC (9,14). Concebido originalmente como un negatoscopio digital (esto es, una superficie de visualización que sustituye o complementa al negatoscopio físico tradicional), el programa incorpora tres bloques funcionales medibles que resultan relevantes para la práctica pericial.

El primero es un módulo de calibración fotométrica que establece la correspondencia entre las dimensiones de la imagen digitalizada y las dimensiones reales del documento físico, requisito indispensable para que cualquier medición posterior de longitud, proporción o ángulo resulte comparable entre distintas muestras (9). El segundo es un conjunto de filtros de cotejo que permiten superponer dos grafismos con distintos niveles de transparencia, en color o en escala de grises, sumando, restando, desplazando o rotando las imágenes hasta lograr el ajuste óptimo de comparación (9). El tercero es el módulo AOT (Analysis Oval Text), orientado a la medición geométrica de los óvalos presentes en la escritura manuscrita (como los trazados en las letras «o», «a» o «e»), que produce métricas cuantitativas de forma y proporción utilizables para establecer similitudes o discrepancias entre la escritura cuestionada y la de referencia, en cuyo desarrollo el fabricante reporta haber incorporado algoritmos de apoyo basados en inteligencia artificial (9). Los óvalos constituyen una de las denominadas «constantes gráficas» más estudiadas en la pericia caligráfica, y su medición objetiva ha sido tradicionalmente uno de los pilares del análisis comparativo de escrituras. (1)(2).

Una funcionalidad adicional reportada es un filtro orientado a detectar cargas de tinta de trazos de bolígrafo que se superponen sobre un texto previamente impreso, útil para establecer la secuencia temporal entre un texto mecanografiado y una anotación manuscrita posterior (9). En cuanto a la

evidencia disponible sobre su uso efectivo, la única fuente identificada que documenta la experiencia de peritos con el programa es una entrevista divulgativa a su desarrollador, en la que distintos profesionales describen su utilidad práctica para el cotejo y la generación de capturas incorporables al dictamen (14); no se identificaron estudios de caso publicados en revistas científicas arbitradas que empleen NEGA como instrumento de medición, lo cual constituye una diferencia relevante respecto de WANDA, MovAlyzeR y GRAPHJ, cuya precisión sí fue documentada en publicaciones con revisión por pares (6,8,13).

Sobre validación y fundamentación técnica del software NEGA

Con el fin de documentar el estado actual de la validación del software, se tomó contacto con los desarrolladores de MacWinLin CPS para solicitar información complementaria sobre el rendimiento y el respaldo científico de NEGA. En su respuesta, los desarrolladores proporcionaron los siguientes elementos:

En primer lugar, una descripción detallada de la fundamentación metrológica y normativa del módulo AOT, señalando su adecuación a las normas ISO/IEC 17025:2017 (trazabilidad y validación de métodos analíticos), GUM/JCGM 100:2008 e ISO 21748 (estimación de incertidumbre de medida), ISO 5725-2 (control de repetibilidad mediante coeficiente de variación) e ISO 16269-4 (detección estadística de valores atípicos). Los desarrolladores declaran que el diseño del software se alinea con los requisitos metrológicos que facilitan la acreditación bajo ISO/IEC 17025, según la interpretación de la red ENFSI - Red Europea de Institutos de Ciencias Forenses (European Network of Forensic Science Institutes), para que el laboratorio que lo utiliza debe validar su uso conforme a las guías ENFSI.

En segundo lugar, los desarrolladores facilitaron enlaces a entradas de su blog corporativo que describen el fundamento de otras herramientas incluidas en NEGA: el filtro SVF (Smart ViewFinder), orientado al análisis de secuencia temporal en cruces de escritura, cuyo desarrollo se apoya en un estudio de perfilometría láser 3D realizado por el Departamento de Ingeniería Electrónica de la Universidad degli Studi "Roma Tre" (Italia); y la herramienta FDM (Fibonacci Digital Modeller), aplicada a firmas y caracteres alfanuméricos, para la cual se describe un estudio interno de validación que cuantifica el grado de similitud proporcional mediante índices porcentuales (IdentityScore, ConfidenceAdjusted, FinalScore) y establece rangos de interpretación (0-60% divergencia, 60-80% zona indeterminada, 80-100% coincidencia) (9).

A la luz de la información proporcionada por los desarrolladores, se denota, por un lado, el software NEGA incorpora una arquitectura de medición con fundamentos metrológicos normalizados (módulo AOT), respaldo académico externo (filtro SVF) y estudios internos de validación (herramienta FDM), lo que demuestra que no carece de base técnica. Por otro lado, es preciso distinguir entre la solidez del diseño normativo y la validación empírica independiente de su desempeño en condiciones de uso pericial real. Los estudios de la herramienta FDM son internos, realizados por el propio fabricante, por lo que podrían no ser del todo imparciales, no han sido publicados en revistas arbitradas ni sometidos a revisión por pares independientes. Tampoco se han facilitado estudios de caja negra con tasas de error, ensayos interlaboratorio o publicaciones en revistas especializadas. Por tanto, aunque existe un sustrato científico-técnico preliminar (normativo y con algún respaldo académico puntual), este no alcanza el estándar de validación independiente que exigen estándares probatorios como Daubert o por las recomendaciones del President's Council of Advisors on Science and Technology (PCAST), que requieren estudios replicados por terceros y tasas de error documentadas.

Ventajas y limitaciones: análisis comparado

La comparación entre técnicas tradicionales y software especializado no debe entenderse en términos de sustitución, sino de complementariedad funcional, dado que ambos enfoques comparten el mismo sustento teórico pero difieren en el grado de mediación tecnológica que introducen en el proceso de observación y medición. La Tabla 2 amplía la comparación incorporando limitaciones concretas del software especializado, más allá de la genérica referencia al costo de licenciamiento.

Criterio	Técnicas tradicionales	Software especializado
Fundamento del análisis	Observación directa con instrumentos ópticos (lupas, estereomicroscopios, lámparas UV/IR) y cotejo manual entre grafismos dubitados e indubitados.	Digitalización de las imágenes y aplicación de filtros, superposiciones y mediciones asistidas por algoritmos.
Precisión métrica	Dependiente de la pericia manual del examinador; las mediciones con regla o plantilla introducen un margen de error humano.	Mediciones calibradas en píxeles convertidos a unidades reales, con menor variabilidad entre repeticiones del mismo examinador, siempre que la calibración inicial sea correcta.
Reproducibilidad	Limitada, ya que depende de las condiciones de iluminación y del registro fotográfico al momento del examen.	Alta para los parámetros cuantitativos, porque el archivo digital y los parámetros de calibración permiten repetir el análisis en cualquier momento.
Documentación pericial	Requiere transcripción manual de hallazgos y fotografías independientes para el dictamen.	Exporta capturas, superposiciones y mediciones directamente utilizables en el cuerpo del dictamen.
Curva de aprendizaje	Requiere formación prolongada en el manejo de instrumental óptico, pero suele formar parte de la malla curricular de formación pericial.	A pesar de que el fabricante declara una interfaz sencilla, la calibración correcta y la interpretación de los filtros de cotejo exigen una curva de aprendizaje adicional no evaluada de forma independiente.
Dependencia de hardware	Bajo costo de instrumental básico, aunque el equipo óptico avanzado (VSC, ESDA) es costoso y poco portátil.	Requiere equipo informático actualizado y un escáner de alta resolución correctamente calibrado; un escaneo deficiente compromete la totalidad del análisis posterior.
Riesgo de error de calibración	Bajo, dado que el examinador trabaja directamente sobre el documento físico o sobre fotografías a escala conocida.	Si la calibración fotométrica inicial no se realiza correctamente, el error se propaga de manera sistemática a todas las mediciones subsecuentes (longitudes, proporciones, métricas del módulo AOT).

Licenciamiento y dependencia del proveedor	No aplica; el instrumental, una vez adquirido, no requiere renovación contractual.	Licencia anual de pago y soporte técnico sujetos a la continuidad comercial del proveedor (dependencia tecnológica del fabricante).
Validación científica	Respaldada por décadas de práctica pericial y estándares como los del SWGDOC/ASB y la ENFSI.	En desarrollo; requiere estudios de validación independientes que confirmen tasas de error y reproducibilidad entre laboratorios.
Riesgo de subjetividad	Mayor influencia de la interpretación del examinador sobre rasgos cualitativos (presión, ritmo, espontaneidad).	Persiste en la selección de los grafismos a comparar y en la interpretación de los resultados, aunque se reduce en las mediciones cuantitativas.

Tabla 2. *Ventajas y limitaciones comparadas entre las técnicas tradicionales de grafoscopía y el software especializado, ejemplificado en NEGA y herramientas afines.*

Conviene detenerse en tres limitaciones específicas que suelen omitirse en la documentación comercial de este tipo de programas. En primer lugar, la curva de aprendizaje: aunque el fabricante de NEGA declara haber priorizado una interfaz sencilla e intuitiva (9), dicha afirmación proviene de la propia documentación comercial y no ha sido contrastada mediante estudios de usabilidad independientes que midan, por ejemplo, el tiempo de adiestramiento requerido para alcanzar un desempeño consistente. En segundo lugar, la dependencia de hardware: la fiabilidad de cualquier medición posterior depende íntegramente de la calidad del escaneo inicial y de la calibración fotométrica, de modo que un escáner de baja resolución o una calibración deficiente introducen un error sistemático que el software no está en condiciones de detectar ni de corregir por sí mismo.

En tercer lugar, el riesgo de error de calibración se traslada de manera acumulativa a todas las métricas derivadas (incluidas las del módulo AOT), por lo que un único error inicial puede comprometer la totalidad del análisis sin que ello resulte evidente para un examinador con formación limitada en el manejo del programa.

Discusión

Los hallazgos descritos sugieren que la incorporación de software especializado constituye una continuidad instrumental de los principios fundamentales de la grafoscopía, mediada por nuevas herramientas de digitalización y medición, sin que ello suponga sustituir la interpretación final del examinador (15).

Esta discusión adquiere especial relevancia jurídica al considerar los estándares de admisibilidad de la prueba pericial vigentes en numerosas jurisdicciones. En el sistema estadounidense, el estándar Frye, formulado en 1923, exige que la técnica empleada cuente con aceptación general dentro de la comunidad científica correspondiente (16), mientras que el estándar Daubert, derivado del caso Daubert v. Merrell Dow Pharmaceuticals de 1993 e incorporado a la Regla 702 de las Reglas Federales de

Evidencia, exige adicionalmente que el juez evalúe si la técnica ha sido sometida a prueba empírica, si ha sido objeto de revisión por pares y publicación, si se conoce su tasa de error, y si existen estándares que controlen su aplicación (17).

En este contexto, resulta pertinente considerar la información facilitada por los desarrolladores de NEGA, a la que se ha hecho referencia al final del apartado dedicado a este software. Según comunicaron los desarrolladores del software, el diseño del programa se apoya en estándares metrológicos reconocidos (ISO/IEC 17025, GUM/JCGM 100:2008, ISO 5725-2 e ISO 16269-4) y, en el caso del filtro SVF, en una colaboración académica con la Universidad Roma Tre para el estudio de secuencias temporales mediante perfilometría láser 3D. Adicionalmente, la herramienta FDM cuenta con estudios internos de validación que proponen rangos de interpretación porcentuales para la similitud entre grafismos. Sin embargo, estos elementos, por sólidos que sean desde el punto de vista del diseño normativo y la colaboración académica puntual, no equivalen a los estudios de validación independiente que exige el estándar Daubert. En particular, no se han identificado publicaciones en revistas arbitradas que reporten tasas de error de NEGA, ni ensayos interlaboratorio diseñados específicamente para medir su fiabilidad en condiciones de uso pericial real, a diferencia de lo que ocurre con WANDA, MovAlyzeR y GRAPHJ (6,8,13). Esta circunstancia sitúa a NEGA en una posición de vulnerabilidad probatoria en jurisdicciones que apliquen un estándar tipo Daubert, precisamente por la ausencia del requisito de "prueba empírica" y "tasa de error conocida" (17,18).

El Consejo Asesor de Ciencia y Tecnología de la Presidencia de los Estados Unidos (PCAST) incluyó expresamente al examen de escritura dentro de los métodos forenses de comparación de características cuya validez científica fundacional requiere ser demostrada mediante estudios diseñados específicamente para medir tasas de error, recomendando para ello el diseño metodológico conocido como estudio de caja negra (18,19).

Trasladado al caso de NEGA, este marco normativo implica que un dictamen que incorpore mediciones obtenidas mediante el programa podría enfrentar objeciones de admisibilidad en jurisdicciones que apliquen un estándar tipo Daubert, precisamente porque no se identificaron estudios independientes que reporten su tasa de error o que hayan sido sometidos a revisión por pares, a diferencia de lo que ocurre con WANDA, MovAlyzeR y GRAPHJ (6,8,13,17,18). Ello no implica que el software carezca de valor probatorio, sino que su empleo debería presentarse ante el tribunal con la debida transparencia metodológica, distinguiendo explícitamente entre las mediciones cuantitativas que el programa permite obtener (cuya fiabilidad depende de una calibración correcta) y la interpretación cualitativa final, que continúa siendo responsabilidad exclusiva del perito y que debe sustentarse, en todo caso, en los principios y estándares de la disciplina con respaldo científico consolidado (3,4,11).

Es necesario precisar, sin embargo, que el marco Daubert/Frye descrito corresponde específicamente al sistema procesal estadounidense y no debe extrapolarse sin matices a otras jurisdicciones, en particular a aquellas de tradición jurídica continental donde tiene previsible audiencia este artículo. En el espacio de la Unión Europea no existe un estándar judicial único y vinculante equivalente a Daubert, dado que el procedimiento penal continúa siendo, en lo sustancial, competencia de cada Estado miembro. El Manual de Buenas Prácticas de la ENFSI opera, en consecuencia, como un estándar de autorregulación profesional adoptado voluntariamente por los institutos forenses asociados, y no como un filtro judicial de admisibilidad previo a la valoración de la prueba (3).

En España y en la generalidad de los sistemas latinoamericanos de tradición civilista, por su parte, rige el principio de libre apreciación de la prueba pericial conforme a las reglas de la sana crítica: el

artículo 348 de la Ley de Enjuiciamiento Civil española dispone expresamente que el tribunal valorará los dictámenes periciales conforme a dichas reglas, sin que exista una fase previa de exclusión de la prueba comparable al filtro Daubert (20), y la jurisprudencia de la región confirma que, en general, el juez no está obligado a aceptar el dictamen pericial como verdad absoluta, sino que debe motivar su decisión de aceptarlo o rechazarlo a la luz del conjunto del acervo probatorio (21). En este contexto, la ausencia de validación científica independiente de NEGA no opera como una barrera de admisibilidad automática en estas jurisdicciones, como sí podría ocurrir bajo un estándar Daubert estricto, pero ello no exime al perito de la obligación de motivar con rigor metodológico su dictamen, dado que un análisis insuficientemente fundamentado puede de todos modos ser descartado por el juzgador en ejercicio de su libre valoración (20,21).

Es pertinente reconocer, como limitación de la presente revisión narrativa, que la mayor parte de la información disponible sobre el funcionamiento específico de NEGA procede de fuentes divulgativas, entrevistas a su desarrollador y documentación comercial del propio fabricante. Esta carencia de literatura sometida a revisión por pares no responde a una impresión subjetiva, sino a los resultados de una búsqueda bibliográfica exhaustiva, realizada en seis bases de datos y repositorios académicos (Scopus, Web of Science, Dialnet, Redalyc, SciELO y Google Scholar/ResearchGate). Para ello se combinaron los términos «NEGA», «MacWinLin», «ACPC» y «NEGA ACPC» con «grafoscopia», «documentoscopia», «pericia caligráfica», y «forensic software», sin restricción de idioma ni de fecha. Dicha búsqueda arrojó cero artículos, capítulos o tesis arbitrados que documentaran el uso, la validación o la evaluación del software NEGA. Los únicos resultados recuperados se limitaron a la página comercial del fabricante, su descarga de prueba, perfiles profesionales en redes sociales y la entrevista divulgativa ya citada en este artículo (14).

Por contraste, la misma estrategia de búsqueda sí permitió recuperar literatura arbitrada para FISH, WANDA, MovAlyzeR y GRAPHJ, lo que descarta que la ausencia de resultados para NEGA se deba a una limitación general de las bases consultadas y refuerza la conclusión de que se trata de una brecha de validación específica de este software. Esta circunstancia no invalida la utilidad práctica reportada por sus usuarios, pero sí constituye una línea de investigación pendiente que futuros trabajos deberían abordar, idealmente mediante los estudios de validación propuestos en el apartado de conclusiones.

Conclusión

La grafoscopía tradicional mantiene plena validez normativa y operativa, mientras que el software especializado, ejemplificado en NEGA, aporta ventajas métricas y documentales que agilizan el cotejo cuando se manejan múltiples muestras. Su arquitectura incorpora fundamentos metrológicos normalizados (módulo AOT), colaboración académica externa (filtro SVF) y estudios internos de validación (herramienta FDM), lo que demuestra que no es un producto carente de base técnica. Sin embargo, estos elementos, por rigurosos que sean en su diseño, no equivalen a la validación empírica independiente que exigen estándares como Daubert y las recomendaciones del PCAST: no se han publicado tasas de error, ensayos interlaboratorio o estudios de caja negra sometidos a revisión por pares.

Para cerrar la brecha de validación identificada, se propone un plan de acción en cuatro líneas: Primero, estudios de fiabilidad intra e interexaminador, en los que distintos peritos analicen las mismas muestras con el software y se contrasten los resultados con técnicas tradicionales; Segundo, estudios de tipo caja negra, siguiendo el diseño recomendado por el PCAST, que permitan calcular tasas de error reales al desconocer los examinadores la respuesta correcta; Tercero, ensayos interlaboratorio

coordinados por asociaciones profesionales, como la ACPC, mediante paneles ciegos de firmas distribuidos entre laboratorios de distintos países; y cuarto, publicación de los resultados en revistas científicas arbitradas.

Hasta que dicha validación se complete, el perito debe emplear el software como una herramienta auxiliar, no como sustituto del criterio experto, documentar rigurosamente la calibración, distinguir entre mediciones cuantitativas e interpretaciones cualitativas, y fundamentar estas últimas en los principios consolidados de la grafoscopía, sin atribuir al programa una objetividad que la evidencia disponible aún no respalda. La integración híbrida entre tradición y tecnología es el camino, pero solo será científicamente sólida cuando la tecnología haya superado el escrutinio empírico que la comunidad forense exige y los tribunales merecen.

Agradecimientos

El autor agradece a los revisores de la Revista Digital de Ciencia Forense de UNAM por sus comentarios, que han contribuido a mejorar la calidad del manuscrito. No se recibió financiamiento institucional, ni patrocinio para la elaboración de este trabajo.

Declaración de conflicto de intereses

El autor declara no tener ningún conflicto de intereses en relación con el contenido del presente artículo. No existe vínculo contractual, laboral, de asesoría remunerada, patrocinio ni ningún otro tipo de relación financiera o profesional con MacWinLin CPS, la Asociación Colegial de Peritos Calígrafos y Documentólogos (ACPC), ni con ninguna otra empresa, asociación o desarrollador de software mencionado en este trabajo. El análisis de los programas descritos se realiza exclusivamente con fines académicos y a partir de información de acceso público, sin que el autor haya recibido compensación alguna por su mención o participado en su desarrollo, comercialización o promoción.

Declaración de uso de inteligencia artificial generativa

El autor declara que ha utilizado herramientas de inteligencia artificial generativa (modelos de lenguaje de gran tamaño) exclusivamente como apoyo en la revisión y refinamiento de la redacción del manuscrito. Todo el contenido sustancial, el análisis crítico, las interpretaciones y las conclusiones son responsabilidad exclusiva del autor.

Referencias

1. Osborn AS. Questioned documents. 2.a ed. Albany: Boyd Printing Co.; 1929.
2. Huber RA, Headrick AM. Handwriting identification: facts and fundamentals. Boca Ratón: CRC Press; 1999. DOI: 10.1201/9781420048773
3. European Network of Forensic Science Institutes (ENFSI). ENFSI-BPM-FHX-01 (Ed. 04): best practice manual for the forensic handwriting examination [Internet]. 2023 [citado 18 jun 2026]. Disponible en: https://enfsi.eu/wp-content/uploads/2023/02/BPM-Handwriting-Ed.-4.pdf
4. Scientific Working Group for Forensic Document Examination (SWGDOC) / Academy Standards Board. Standards for forensic document examination [Internet]. [citado 18 jun 2026]. Disponible en: https://www.swgdoc.org/
5. Sociedad de Investigación Forense y Científica (SIFS). Forensic Information System for Handwriting (FISH) [Internet]. 2022 [citado 18 jun 2026]. Fuente divulgativa, no arbitrada. Disponible en: https://www.sifs.in/blog-details/forensic-information-system-for-handwriting-fish
6. Van Erp M, Vuurpijl L, et al. The WANDA measurement tool for forensic document examination. J Forensic Doc Exam. 2018 [citado 18 jun 2026]. Disponible en: https://jfde.org/index.php/jfde/article/download/237/139/491
7. Grafística Forense. Equipamiento de documentoscopia y pericia caligráfica [Internet]. 2016 [citado 18 jun 2026]. Fuente divulgativa, no arbitrada. Disponible en: https://grafisticaforense.com/equipamiento-documentoscopia/
8. Fuglsby C, Saunders C, Ommen DM, Buscaglia J, Caligiuri MP. Elucidating the relationships between two automated handwriting feature quantification systems for multiple pairwise comparisons. J Forensic Sci. 2022;67(2):642-650. DOI: 10.1111/1556-4029.14914
9. MacWinLin CPS. NEGA: negatoscopio digital, software para pericia caligráfica y documentoscopia [Internet]. [citado 18 jun 2026]. Incluye la descripción del módulo AOT (Analysis Oval Text). Fuente comercial del fabricante. Disponible en: https://www.macwinlincps.com/es/nega-negatoscopio-digital-macwinlin-cps/
10. National Institute of Standards and Technology (NIST). Forensic handwriting examination and human factors: improving the practice through a systems approach. Report of the Expert Working Group for Human Factors in Handwriting Examination [Internet]. 2020 [citado 18 jun 2026]. DOI: 10.6028/NIST.IR.8282
11. Galekovic J, Tkalac Z, Ledic A. Forensic examination of handwriting and documents. En: Primorac D, editor. Forensic Science and Molecular Anthropology. Londres: IntechOpen; 2024. DOI: 10.5772/intechopen.115118
12. Forensic Sciences Simplified. A simplified guide to forensic document examination [Internet]. [citado 18 jun 2026]. Disponible en: https://www.forensicsciencesimplified.org/docs/QuestionedDocuments.pdf
13. Guarnera L, Farinella GM, Furnari A, Salici A, Ciampini C, Matranga V, Battiato S. GRAPHJ: a forensics tool for handwriting analysis. En: Battiato S, Gallo G, Schettini R, Stanco F, editores. Image Analysis and Processing, ICIAP 2017. Cham: Springer; 2017. p. 591-601. DOI: 10.1007/978-3-319-68548-9_54
14. Merayo LP. NEGA software pericia caligráfica: entrevista a Manel de Vicente [Internet]. Grafística Forense; 2016 [citado 18 jun 2026]. Entrevista divulgativa, no arbitrada. Disponible en: https://grafisticaforense.com/nega-software-pericia-caligrafica-entrevista/
15. Orta Martínez R. Análisis forense de documentos en México: grafoscopía y documentoscopía [Internet]. Documentoscopia y Pericia Caligráfica Internacional; [citado 18 jun 2026]. Fuente divulgativa, no arbitrada. Disponible en: https://grafotecnica.com/analisis-forense-de-documentos-en-mexico-grafoscopia-y-documentoscopia-24/
16. Frye v. United States, 293 F. 1013 (D.C. Cir. 1923).
17. Daubert v. Merrell Dow Pharmaceuticals, Inc., 509 U.S. 579 (1993).
18. President's Council of Advisors on Science and Technology (PCAST). Forensic science in criminal courts: ensuring scientific validity of feature-comparison methods [Internet]. Washington D. C.: Executive Office of the President; 2016 [citado 18 jun 2026]. Disponible en: https://obamawhitehouse.archives.gov/sites/default/files/microsites/ostp/PCAST/pcast_forensic_science_report_final.pdf
19. Lander ES. Fixing Rule 702: the PCAST report and steps to ensure the reliability of forensic feature-comparison methods in criminal courts. Fordham Law Review. 2018;86(4):1661-1693.
20. España. Ley 1/2000, de 7 de enero, de Enjuiciamiento Civil. Boletín Oficial del Estado, núm. 7 (8 enero 2000), art. 348.
21. Orta Martínez R. La grafotécnica, grafoscopía y la pericia caligráfica en el ámbito judicial [Internet]. Documentoscopia y Pericia Caligráfica Internacional; 2025 [citado 18 jun 2026]. Fuente divulgativa, no arbitrada. Disponible en: https://grafotecnica.com/la-grafotecnica-grafoscopia-y-la-pericia-caligrafica-en-el-ambito-judicial/

Displasia alveolocapilar con mala alineación de venas pulmonares en una muerte perinatal investigada por presunta mala praxis: relevancia médico-legal

Martínez Gómez, José Steven [1]✉
[1]Licenciado en Medicina y Cirugía; médico residente de Medicina Legal y Forense, Poder Judicial / Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.
✉ jsmartinez@poder-judicial.go.cr

Datos del artículo
Cita
Martínez-Gómez, J. S. Displasia alveolocapilar con mala alineación de venas pulmonares en una muerte perinatal investigada por presunta mala praxis: relevancia médico-legal. ReCiF, 2026(2):101-107

Editor
Torres Zúñiga Vicente

Revisión por pares
Tres

Recibido
28/julio/2026

Aceptado
3/sept/2026

Publicado
30/oct/2026

Creative Commons CC-BY-NC-SA 4.0 Internacional.

Resumen

La displasia alveolocapilar con mala alineación de las venas pulmonares es una malformación congénita infrecuente, generalmente letal en el periodo neonatal y diagnosticada mediante histopatología. Se presenta la investigación médico-legal de la muerte perinatal del primer gemelo de un embarazo monocoriónico biamniótico de aproximadamente 36 semanas de gestación. La madre ingresó en fase activa avanzada; ambos fetos se encontraban en presentación cefálica y se atendió un parto vaginal. El primer gemelo fue extraído sin signos detectables de vitalidad y no respondió a la reanimación, mientras el segundo evolucionó favorablemente. La denuncia atribuyó el fallecimiento a la elección de la vía vaginal. La autopsia no mostró traumatismo letal ni malformaciones externas. El estudio pulmonar reveló venas anómalamente situadas alrededor de vías aéreas, edema y congestión, compatibles con displasia alveolocapilar con mala alineación de las venas pulmonares. La neuropatología demostró lesión hipóxico-isquémica leve y la toxicología fue negativa. La integración clínico-patológica permitió establecer una causa congénita de muerte y no aportó sustento para una relación causal entre la vía vaginal y el desenlace. El caso destaca el valor de la autopsia para diferenciar temporalidad, causalidad y adecuación de la atención en denuncias por presunta mala praxis obstétrica.

Palabras clave: displasia alveolocapilar; autopsia médico-legal; muerte perinatal; mala praxis médica; embarazo gemelar.

Abstract

Alveolar capillary dysplasia with misalignment of pulmonary veins is a rare congenital malformation that is usually lethal during the neonatal period and is diagnosed by histopathology. This report presents the medicolegal investigation of the perinatal death of the first twin from a monochorionic diamniotic pregnancy at approximately 36 weeks of gestation. The mother was admitted in advanced active labor; both fetuses were in cephalic presentation, and vaginal delivery was performed. The first twin was delivered without detectable signs of life and did not respond to resuscitation, whereas the second twin had a favorable outcome. The complaint attributed the death to the choice of vaginal delivery. Autopsy showed neither lethal trauma nor external malformations. Pulmonary histopathology revealed abnormally positioned veins around the airways, edema, and congestion, consistent with alveolar capillary dysplasia with misalignment of pulmonary veins. Neuropathology showed mild hypoxic-ischemic injury, and toxicology results were negative. Clinicopathologic integration established a congenital cause of death and provided no support for a causal relationship between vaginal delivery and the outcome. This case highlights the value of autopsy in distinguishing temporality, causation, and appropriateness of care in allegations of obstetric malpractice.

Key words: alveolar capillary dysplasia; medicolegal autopsy; perinatal death; medical malpractice; twin pregnancy.

Introducción

La displasia alveolocapilar con mala alineación de las venas pulmonares (DAC/MAVP) es un trastorno del desarrollo pulmonar caracterizado por una relación anómala entre los capilares alveolares, los septos y el sistema venoso pulmonar. Su expresión clásica produce hipoxemia grave e hipertensión pulmonar persistente, con respuesta transitoria o nula a las medidas terapéuticas y una mortalidad muy elevada. Aunque existen presentaciones tardías o menos difusas, la mayoría de los casos se manifiestan durante el periodo neonatal (1,2).

El diagnóstico prenatal es difícil y las alteraciones macroscópicas pueden ser discretas. Por ello, la histopatología pulmonar continúa siendo decisiva: los hallazgos incluyen disminución o separación de los capilares respecto del epitelio alveolar, engrosamiento septal y venas pulmonares situadas de manera anómala junto a bronquiolos y arterias pulmonares. Las variantes patogénicas o alteraciones regulatorias del gen FOXF1 (forkhead box F1) explican una proporción relevante de los casos, aunque un resultado genético negativo no excluye el diagnóstico morfológico (3-6).

En el ámbito médico-legal, una muerte temporalmente próxima al parto puede generar la inferencia inmediata de que la vía de finalización del embarazo o una decisión intraparto ocasionó el desenlace. Esa proximidad cronológica, sin embargo, no demuestra por sí misma una relación de causalidad. El análisis pericial exige reconstruir la evolución obstétrica, identificar las indicaciones y contraindicaciones documentadas, valorar la respuesta fetal, excluir lesiones traumáticas letales y confrontar todos estos elementos con la causa de muerte establecida por autopsia.

Se trata de un caso de DAC/MAVP identificada post mortem en el primer gemelo de una gestación monocoriónica biamniótica, investigado a raíz de una denuncia por presunta mala praxis relacionada con la elección del parto vaginal. El objetivo de este reporte es exponer la utilidad de la correlación clínico-patológica para distinguir entre un evento adverso coincidente con la atención y un daño causalmente atribuible a esta.

Presentación del caso

Antecedentes obstétricos

Una mujer primigesta de 27 años cursaba una gestación gemelar monocoriónica biamniótica. Durante el embarazo presentó consultas por sangrado vaginal, procesos infecciosos y amenaza de parto pretérmino, por lo que recibió seguimiento especializado y, alrededor de las 32 semanas de embarazo, un ciclo de corticoesteroides prenatales. Los controles ecográficos describieron crecimiento concordante, líquido amniótico conservado, flujo diastólico umbilical presente y ambos fetos en presentación cefálica. La diferencia estimada de peso fue baja y no se documentaron criterios de restricción selectiva del crecimiento, síndrome de transfusión feto-fetal ni secuencia anemia-policitemia.

En la documentación clínica se hacía referencia a un ingreso programado posterior. La familia interpretó que existía una indicación previa de cesárea; sin embargo, en los documentos revisados no se identificó una contraindicación obstétrica inequívoca para el trabajo de parto ni una orden operatoria definitiva aplicable al momento del ingreso urgente.

Atención intraparto y desenlace perinatal

Aproximadamente a las 36 semanas de gestación, la paciente consultó con contracciones regulares y se constató una fase activa avanzada, inicialmente con siete centímetros de dilatación y borramiento cervical marcado. Ambos fetos permanecían cefálicos y sus frecuencias cardiacas fueron registradas al ingreso. Debido al antecedente materno pertinente se inició profilaxis antibiótica y se notificó al equipo neonatal.

La vigilancia cardiotocográfica fue consignada como categoría II, con pérdidas intermitentes del foco de uno de los gemelos. Se efectuaron cambios de posición materna, hidratación intravenosa y aviso al equipo médico. Las notas posteriores describieron mejoría del registro; al traslado a la sala de expulsivo se documentaron frecuencias cardiacas de 140 y 150 latidos por minuto.

Durante la amniotomía del primer saco se observó líquido meconial abundante. El primer gemelo, de sexo masculino, nació en presentación cefálica, flácido, sin tono y sin frecuencia cardiaca detectable. El equipo de neonatología inició maniobras de reanimación de manera inmediata, sin lograr actividad cardiaca; el puntaje de Apgar fue 0/0. Siete minutos después nació el segundo gemelo, también masculino y cefálico, con peso cercano a 2650 gramos y adecuada adaptación inicial. La placenta fue descrita clínicamente como completa, pero no fue remitida al análisis médico forense.

La denuncia por mala praxis contra el personal médico de ginecología sostuvo que la muerte del primer gemelo obedeció a que el nacimiento se atendió por vía vaginal y no mediante cesárea. A partir de esa hipótesis, en el marco de la investigación judicial, se ordenó una autopsia médico-legal y la revisión integral de la atención.

Examen post mortem

La autopsia correspondió al primer gemelo masculino de aproximadamente 36 semanas de periodo de gestación, con peso de 2300 gramos y longitud de 48 centímetros. Presentaba adecuada nutrición para la edad gestacional, sin malformaciones externas ni lesiones corporales letales. Se observó meconio en espacios interdigitales y bajo las uñas. El cordón umbilical presentaba una línea arterial como evidencia de intervención médica.

En el examen de la cabeza se identificaron hematomas epidurales biparietales, sin fracturas craneales descritas ni lesión encefálica macroscópica de magnitud suficiente para explicar la muerte. Los pulmones eran violáceos, de consistencia aumentada y liberaban abundante líquido espumoso rojizo-amarillento al corte. El corazón era estructuralmente normal y no se encontraron anomalías viscerales mayores.

Estudios complementarios

El examen histopatológico pulmonar mostró proliferación vascular venosa alrededor de las vías aéreas y venas situadas fuera de los septos, asociadas con edema y congestión. La correlación morfológica permitió diagnosticar DAC/MAVP con edema pulmonar (Figura 1). El corazón y el nodo atrioventricular no mostraron alteraciones histopatológicas significativas; el cordón umbilical contenía tres vasos. El timo presentó cambios de estrés agudo.

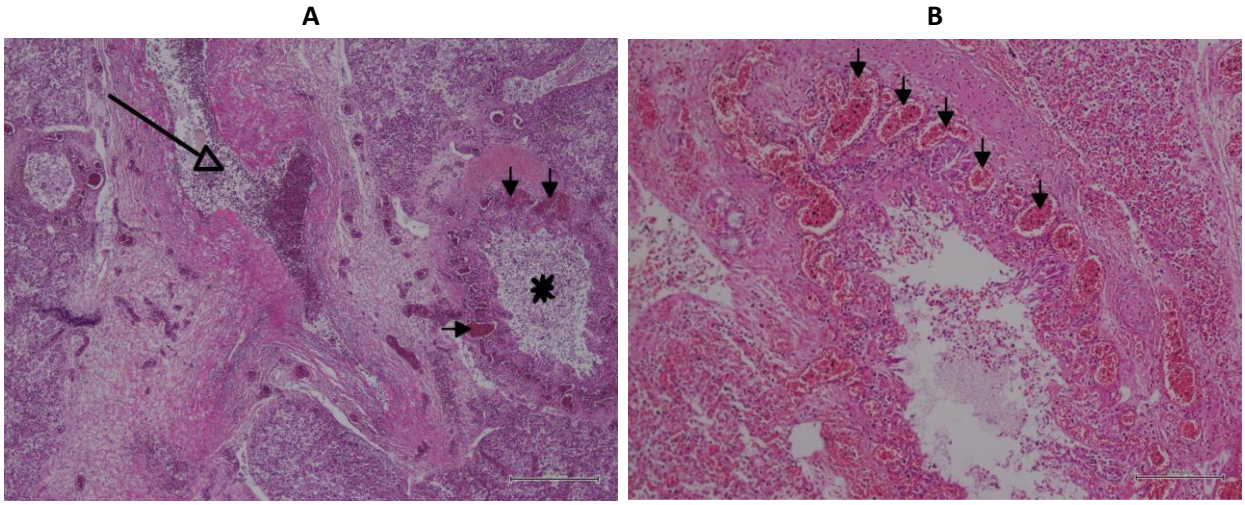


Figura 1. *Cortes histológicos de pulmón. El asterisco (✱) señala un bronquio y la flecha abierta (⇨) una arteria pulmonar, mostrando su relación anatómica habitual. Las flechas negras (↓ / →) señalan vasos de tipo venoso distribuidos anómalamente alrededor de las estructuras bronquiales (A y B), hallazgo compatible con displasia alveolocapilar con mala alineación de las venas pulmonares.*

El estudio neuropatológico evidenció edema cerebral, encefalopatía hipóxico-isquémica leve y hemorragia de la matriz germinal grado 1. No se documentaron herniación, hemorragia intracraneal extensa ni daño encefálico grave. El análisis toxicológico de sangre periférica fue negativo para etanol, metanol, isopropanol y acetona, así como para las sustancias incluidas en el escrutinio general.

La integración de la autopsia, la histología y los estudios complementarios estableció como causa de muerte la displasia alveolocapilar con mala alineación de las venas pulmonares, asociada con edema pulmonar.

Discusión

La DAC/MAVP altera la arquitectura necesaria para una transición cardiopulmonar eficaz. La escasez y la localización inadecuada de los capilares limitan el intercambio gaseoso, mientras que la remodelación vascular contribuye al aumento de la resistencia pulmonar. La posición de las venas pulmonares junto a las arterias y vías aéreas constituye una clave diagnóstica, pero su distribución puede ser parcheada y requerir un muestreo pulmonar suficiente (2,4). En el presente caso, la localización venosa peribronquial anómala, el edema y la congestión sustentaron el diagnóstico aun en ausencia de manifestaciones prenatales específicas.

La mayoría de los casos descritos desarrolla hipoxemia e hipertensión pulmonar refractaria durante las primeras horas o días de vida. No obstante, la expresión clínica es variable y no siempre guarda una relación lineal con la extensión aparente de los cambios histológicos (2). También existen comunicaciones de diagnóstico por biopsia y confirmación por autopsia, así como casos en los que la autopsia aportó la primera explicación etiológica del fallecimiento (6,7). En esta muerte perinatal, la ausencia de una evolución neonatal prolongada impidió documentar hipertensión pulmonar, pero la

malformación ofreció un sustrato biológicamente plausible para el fracaso de la transición cardiopulmonar.

La DAC/MAVP se ha relacionado con variantes de FOXF1 y con deleciones que afectan sus regiones reguladoras. La secuenciación rápida dirigida puede ser clínicamente útil cuando la enfermedad se sospecha en vida y también aporta información para el asesoramiento familiar (3). Casos familiares y deleciones de un potenciador situado corriente arriba de FOXF1 apoyan la relevancia de estos mecanismos (5). En este caso no se realizó análisis molecular, por lo que no es posible establecer la etiología genética ni inferir riesgo de recurrencia. La supervivencia inmediata del cogemelo tampoco demuestra discordancia genética o histológica, aunque refuerza el interés de valorar el diagnóstico en el contexto de embarazos múltiples. Se han descrito gemelos afectados con estrategias diagnósticas basadas en biopsia pulmonar, lo que ilustra la variabilidad posible y la necesidad de evitar conclusiones genéticas sin pruebas específicas (8).

Desde la perspectiva obstétrica, una gestación gemelar monocoriónica biamniótica no impone por sí sola una cesárea. En embarazos gemelares no complicados que han superado las 32 semanas de embarazo, sin contraindicación para el trabajo de parto, con el primer gemelo cefálico y sin discordancia significativa de tamaño, las guías consideran seguras tanto la planificación vaginal como la cesárea (9). De forma concordante, el ensayo Twin Birth Study no identificó una reducción significativa de la mortalidad perinatal o de la morbilidad neonatal grave con la cesárea planificada frente al parto vaginal planificado cuando el primer gemelo se encontraba en presentación cefálica entre las 32 y 38 semanas con seis días de gestación (10). Estas referencias no sustituyen la valoración individual, pero proporcionan el marco para analizar si existía una obligación técnica de elegir una vía específica.

En el caso estudiado, los elementos disponibles describían una gestación de aproximadamente 36 semanas, ambos gemelos cefálicos, baja discordancia ponderal y trabajo de parto avanzado. No se documentó una indicación absoluta de cesárea en la información revisada. La categoría II y las pérdidas de señal justificaban vigilancia y medidas de corrección; las notas consignaron su implementación y una mejoría posterior. Sin los trazados originales no es posible auditar de forma independiente su duración, variabilidad o relación exacta con cada gemelo. Por ello, el análisis pericial debe limitarse a lo documentado y evitar tanto normalizar automáticamente el registro como convertir una categoría indeterminada en prueba retrospectiva de hipoxia letal.

El líquido meconial y la encefalopatía hipóxico-isquémica leve son compatibles con fenómenos de estrés perinatal, pero no establecen por sí solos la causa primaria de muerte. No se describió aspiración meconial histológica, la neuropatología no mostró daño hipóxico-isquémico grave y los hematomas epidurales carecían de fractura o lesión cerebral destructiva asociada. En consecuencia, estos hallazgos se consideraron secundarios o concomitantes, y no suficientes para desplazar a la malformación pulmonar como explicación principal.

La valoración causal puede resumirse en cuatro preguntas: si la conducta cuestionada era contraria al estándar aplicable; si produjo un mecanismo lesivo demostrable; si ese mecanismo explica los hallazgos post mortem; y si una conducta alternativa habría tenido una probabilidad razonable de evitar el resultado. La proximidad entre el parto vaginal y la muerte satisface únicamente una relación temporal. La DAC/MAVP se origina durante el desarrollo embriofetal y no puede ser causada por la vía del parto. Además, no se identificó un mecanismo traumático, hipóxico o tóxico de intensidad suficiente que enlazara el nacimiento vaginal con el fallecimiento. Por tanto, la evidencia disponible no sustentó la atribución causal planteada en la denuncia.

Esta conclusión debe expresarse con precisión. La autopsia no permite afirmar que el momento exacto del fallecimiento habría sido idéntico bajo cualquier vía de nacimiento. Sí permite sostener que la malformación era previa e independiente de la decisión obstétrica, que constituía una enfermedad potencialmente letal y que no hay fundamento para asumir que una cesárea habría evitado el fallecimiento. La distinción evita transformar una opinión pericial razonable en una afirmación contrafáctica imposible de demostrar.

El caso también muestra por qué la autopsia perinatal debe incluir muestreo pulmonar amplio, examen neuropatológico, evaluación placentaria y preservación de material para estudios moleculares. Cuando existe una denuncia por presunta mala praxis, el objetivo no consiste únicamente en nombrar una causa de muerte, sino en establecer si los hallazgos son congruentes con el mecanismo alegado. En este caso, la histología modificó de manera sustancial la interpretación: de una sospecha centrada en la vía de nacimiento a una explicación basada en una alteración congénita del desarrollo pulmonar.

Conclusión

La autopsia médico-legal identificó una displasia alveolocapilar con mala alineación de las venas pulmonares y edema pulmonar en el primer gemelo de una gestación monocoriónica biamniótica cuya muerte fue denunciada como consecuencia del parto vaginal. La revisión obstétrica mostró ambos fetos en presentación cefálica, baja discordancia ponderal y trabajo de parto avanzado; los hallazgos post mortem no demostraron traumatismo letal, aspiración meconial ni lesión hipóxico-isquémica grave.

La malformación pulmonar era congénita y capaz de explicar el fracaso de la transición cardiopulmonar. Con los elementos disponibles no se estableció un nexo causal entre el parto vaginal y el fallecimiento, ni puede asumirse que una cesárea lo habría evitado. El caso subraya que, ante una denuncia por presunta mala praxis obstétrica, la autopsia y la correlación clínico-patológica son esenciales para separar temporalidad, causalidad y valoración de la *lex artis*.

Agradecimientos

Al Doctor Jorge Aguilar Pérez, jefe de la Sección de Patología Forense del Departamento de Medicina Legal del Organismo de Investigación Judicial de Costa Rica, por la revisión del contenido técnico antes de su envío a la revista.

A la Doctora Lisa Miranda Solís, médico anatomopatóloga de la Sección de Patología Forense del Departamento de Medicina Legal del Organismo de Investigación Judicial de Costa Rica, por el análisis conjunto de las imágenes reales del caso.

Declaración de conflicto de intereses

No existe ningún tipo de conflicto de interés directo o indirecto relacionado con el tema del trabajo. El autor no recibió ningún patrocinio para llevar a cabo la investigación reportada en el presente manuscrito.

Declaración de uso de inteligencia artificial generativa

Se utilizó ChatGPT (OpenAI; versión disponible en julio de 2026) como apoyo editorial para organizar el manuscrito, corregir gramática y estilo. Las indicaciones dadas a la herramienta se limitaron a esas tareas editoriales. La interpretación médico-legal, el análisis de los hallazgos, la selección y verificación de las fuentes y las conclusiones fueron realizados y revisados por el autor, quien asume la responsabilidad íntegra del contenido.

Declaración ética y confidencialidad

El reporte fue elaborado a partir de documentación clínica y médico-legal. Se eliminaron nombres, números de expediente, fechas exactas, establecimientos de atención y demás identificadores directos o indirectos innecesarios. No se incorporaron fotografías que permitieran reconocer a la persona fallecida o a sus familiares.

Referencias

1. Atun ML, Fernandez Jonusas SA, Acosta CM. Alveolar capillary dysplasia with misalignment of pulmonary veins in a premature newborn: the role of lung ultrasound. Ultrasound J. 2023;15:10. https://doi.org/10.1186/s13089-023-00310-z
2. Alturkustani M, Li D, Byers JT, Szymanski L, Parham DM, Shi W, et al. Histopathologic features of alveolar capillary dysplasia with misalignment of pulmonary veins with atypical clinical presentation. Cardiovasc Pathol. 2021;50:107289. https://doi.org/10.1016/j.carpath.2020.107289
3. Edel GG, Hol JA, Slot E, von der Thüsen JH, van Bever Y, de Jonge RCJ, et al. Clinical relevance of rapid FOXF1-targeted sequencing in patients suspected of alveolar capillary dysplasia with misalignment of pulmonary veins. Lab Invest. 2023;103(11):100233. https://doi.org/10.1016/j.labinv.2023.100233
4. Guo M, Wikenheiser-Brokamp KA, Kitzmiller JA, Jiang C, Wang G, Wang A, et al. Single cell multiomics identifies cells and genetic networks underlying alveolar capillary dysplasia. Am J Respir Crit Care Med. 2023;208(6):709-725. https://doi.org/10.1164/rccm.202210-2015OC
5. Kawasaki H, Nakabayashi K, Ikeda M, Onda T, Tomotaki S, Torishima M, et al. Familial alveolar capillary dysplasia with misalignment of pulmonary veins caused by paternal FOXF1 upstream enhancer deletion: a case report. Am J Med Genet A. 2025;197(7):e64056. https://doi.org/10.1002/ajmg.a.64056
6. Lynch JM, Harley R, Butler DC, Thompson CT. Alveolar capillary dysplasia with misaligned pulmonary veins diagnosed at autopsy in association with novel FOXF1 variant. Am J Clin Pathol. 2024;162(Suppl 1):S1-S2. https://doi.org/10.1093/ajcp/aqae129.002
7. Rodríguez García C, López Valdivia C, Ferrer Lozano J, Mancheño Franch N. Alveolar capillary dysplasia with misalignment of the pulmonary veins: a surgical lung biopsy and autopsy in a full-term newborn. Rev Esp Patol. 2024;57(4):305-308. https://doi.org/10.1016/j.patol.2024.06.005
8. Brady S, Krishnan U, Saqi A, Vargas D. Twins with alveolar capillary dysplasia with misalignment of pulmonary veins: strategies for diagnosis and management. J Neonatal Perinatal Med. 2024;17(1):147-152. https://doi.org/10.3233/NPM-230085
9. National Institute for Health and Care Excellence. Twin and triplet pregnancy [Internet]. London: NICE; 2019 [citado 27 jul 2026]. Disponible en: https://www.nice.org.uk/guidance/ng137/chapter/recommendations
10. Barrett JFR, Hannah ME, Hutton EK, Willan AR, Allen AC, Armson BA, et al. A randomized trial of planned cesarean or vaginal delivery for twin pregnancy. N Engl J Med. 2013;369(14):1295-1305. https://doi.org/10.1056/NEJMoa1214939

Autenticación de fragmentos óseos humanos mediante el complejo mayor de histocompatibilidad clase I

Morales Malagón Uziel[1]✉

[1]Secretaría de Salud de la Ciudad de México. Av. Insurgentes Norte #423 piso 20. Colonia Nonoalco Tlatelolco, Código postal 06900, Alcaldía Cuauhtémoc, Ciudad de México.

✉ uziel.legal@hotmail.com

Datos del artículo
Cita
Morales-Malagón, U. Autenticación de fragmentos óseos humanos mediante el Complejo Mayor de Histocompatibilidad Clase I. ReCiF, 2026,(2):108-119.

Editor
Henrik Bernhard Lindskoug

Revisión por pares
Dos

Recibido
21/sept/2025

Aceptado
28/sept/2026

Publicado
30/oct/2026

Creative Commons CC-BY-NC-SA 4.0 Internacional

Resumen

Contenido: La autenticación de elementos óseos humanos fragmentados es uno de los desafíos más complejos en investigación forense. Los métodos histológicos actuales presentan limitaciones importantes, con precisiones que oscilan entre 70% y 88.5%.

Objetivo: Evaluar la utilidad del Complejo Mayor de Histocompatibilidad clase I (MHC-I) como marcador específico para diferenciar fragmentos óseos de origen humano mediante técnica inmunohistoquímica.

Materiales y métodos: Se realizó un estudio observacional, transversal y comparativo con 25 muestras de fragmentos óseos: 15 de origen humano (*Homo sapiens*) y 10 de especies no humanas (incluyendo *Bos taurus*, *Ovis aries*, *Cervus elaphus*, *Gallus gallus*, *Sus scrofa*, *Mephitis mephitis*, *Dasypus novemcinctus*, *Panthera leo* y *Ateles geoffroyi*). Para detectar el origen humano se realizó inmunohistoquímica utilizando un anticuerpo monoclonal anti-MHC-I conjugado con peroxidasa de rábano y posterior observación en microscopía óptica para identificar positividad.

Resultados: Las 15 muestras de origen humano presentaron reacción positiva al anticuerpo anti-MHC-I, mientras que las diez muestras no humanas no mostraron reacción positiva. El análisis estadístico mediante la Prueba Exacta de Fisher mostró asociación significativa ($p = 0.00000031$) entre el origen de la muestra y la reacción antígeno-anticuerpo.

Conclusiones: El MHC-I demostró un alto potencial para ser un marcador confiable para autenticar fragmentos óseos de origen humano, superando las limitaciones conocidas de los métodos histológicos convencionales.

Palabras clave: Osteología forense, autenticación ósea, humano, anti-MHC-I, inmunohistoquímica.

Abstract

Content The authentication of fragmented human skeletal remains is one of the most complex challenges in forensic anthropology. Current histological methods exhibit significant limitations, with diagnostic accuracies ranging from 70% to 88.5%.

Objective: To evaluate the utility of Major Histocompatibility Complex class I (MHC-I) as a species-specific marker to differentiate human bone fragments using an immunohistochemical approach.

Materials and methods: An observational, cross-sectional, and comparative pilot study was conducted using 25 cortical bone samples: 15 of human origin (Homo sapiens) and 10 from various non-human species. To detect human origin, immunohistochemistry was performed using an anti-human MHC-I monoclonal antibody conjugated with horseradish peroxidase, followed by light microscopy to evaluate reactivity.

Results: All 15 samples of human origin exhibited a robust, positive immunolabeling (*chromogenic ocre staining*) across various tissue types and cellular debris, even within highly degraded extracellular matrices. Conversely, none of the ten non-human simples showed cross-reactivity. Statistical analysis using Fisher's Exact Test demonstrated a highly significant association between sample origin and antigen-antibody reactivity ($p = 0.00000031$).

Conclusions: MHC-I represents a highly promising, reliable, and non-destructive marker for the taxonomic identification of human bone fragments. This biomolecular technique successfully overcomes the morphological and preservation constraints of conventional forensic osteology.

Keywords: Forensic osteology, bone authentication, human, anti-MHC-I, immunohistochemistry.

Introducción

La autenticación de elementos óseos humanos representa uno de los desafíos más complejos en la investigación forense contemporánea. Esta problemática se intensifica cuando se trata de fragmentos óseos muy deteriorados o de pequeño tamaño, donde las características morfológicas macroscópicas resultan insuficientes para establecer su origen (1).

Los métodos histológicos tradicionales, basados en el análisis de la estructura microscópica del hueso cortical, constituyen actualmente la herramienta principal para la diferenciación entre hueso humano y no humano. Estos análisis evalúan parámetros como la forma y tamaño de las osteonas, la diferenciación entre hueso plexiforme y haversiano, la densidad de canales de Havers por mm^2, el diámetro del canal de Havers y el diámetro del sistema haversiano (2).

Sin embargo, estos métodos presentan limitaciones significativas. Los estudios reportan precisiones que oscilan entre 70% y 88.5% para la identificación de hueso humano, incluso cuando se analiza hueso largo adulto (3). Una limitación particularmente crítica es la incapacidad para distinguir el patrón histológico humano del de otros primates, ya que estas especies comparten características microscópicas similares (4).

Adicionalmente, los métodos histológicos convencionales requieren matriz extracelular conservada y específicamente tejido óseo compacto, lo que limita su aplicación en muestras fragmentadas o degradadas (5).

Como alternativa, se han desarrollado radioinmunoensayos de fase sólida con doble anticuerpo para determinación de especies. Aunque efectivos, estos métodos requieren la pulverización del fragmento óseo, necesitándose aproximadamente 200 miligramos (6). El empleo de este método implica la destrucción parcial o total del material, lo que impide análisis posteriores si se dispone de escaso material para análisis (7).

El Complejo Mayor de Histocompatibilidad clase I (MHC-I) representa una alternativa prometedora para superar estas limitaciones. El MHC-I humano es un conjunto de glucoproteínas específicas expresadas en la superficie de todas las células humanas, excepto en trofoblasto, eritrocitos y neuronas (8). Estas moléculas presentan gran variación respecto al MHC de otros vertebrados, proporcionando especificidad de especie (9).

La técnica inmunohistoquímica utilizando anticuerpos específicos contra MHC-I humano podría permitir la detección de estas proteínas, humano-específicas, mediante reacciones antígeno-anticuerpo visualizables microscópicamente (10). Esta aproximación metodológica no requiere destrucción de la muestra y permite análisis repetidos del mismo material, requiriéndose cortes con espesor de 3 a 4 micrómetros (11).

El objetivo del presente estudio fue evaluar la utilidad del MHC-I como marcador específico para diferenciar fragmentos óseos de origen humano mediante técnica inmunohistoquímica, estableciendo su efectividad comparativa con los métodos histológicos convencionales.

Materiales y métodos

Diseño del estudio

Se realizó un estudio piloto, observacional, transversal y comparativo, utilizando muestras de fragmentos óseos de diferentes orígenes tratados de manera que no fuera posible determinar su procedencia mediante características macroscópicas.

Material biológico

Se utilizaron 25 fragmentos de hueso cortical, distribuidos en 15 muestras de origen humano (*Homo sapiens*) y diez muestras de origen no humano. Las especies no humanas incluyeron bovino (Bos taurus), cordero (*Ovis aries*), venado rojo (*Cervus elaphus*), gallina (*Gallus gallus domesticus*), cerdo (*Sus scrofa domesticus*), jabalí (*Sus scrofa*), zorrillo rayado (*Mephitis mephitis*), armadillo de nueve bandas (*Dasypus novemcinctus*), león (*Panthera leo*) y mono araña (*Ateles geoffroyi*).

Las muestras se etiquetaron con un código alfanumérico (M-001 a M-025) para garantizar el análisis ciego (Figura 1). Los fragmentos humanos se obtuvieron del Servicio de Patología del Hospital General Xoco de la entonces Secretaría de Salud de la Ciudad de México con autorización institucional, provenientes de miembros amputados por patología no traumática. Las muestras no humanas se adquirieron de animales destinados al abasto, en el Mercado de San Juan, ubicado en la alcaldía Cuauhtémoc, Ciudad de México.

Se emplearon muestras diversas de origen no humano debido a la posibilidad de encontrar elementos óseos de especies no humanas en contextos forenses en distintas localizaciones geográficas.

La totalidad de las muestras, por su origen, sólo fueron sometidas a refrigeración previa a la obtención de los fragmentos óseos empleados en este estudio. Ninguna muestra fue sometida a fenómenos que pudieran causar la desnaturalización de las proteínas presentes en los tejidos, tales como cocción, exposición a fuego o aplicación de cáusticos. Asimismo, las muestras tampoco fueron sometidas a condiciones que pudieran promover la diagénesis, como la inhumación.

El presente estudio, al ser piloto, no incluyó muestras sometidas a procesos tafonómicos. Resulta recomendable la ampliación de este estudio empleando muestras que hayan sufrido procesos tafonómicos para determinar la persistencia del MHC-I en muestras con distintos estados de degradación.

Procedimiento de inmunohistoquímica

En el área de Anatomía Patológica del Hospital General Xoco, las muestras fueron procesadas mediante protocolo estandarizado que inició con la fijación en formol, descalcificación, seguida de deshidratación e inclusión en parafina. Posteriormente, se realizaron cortes de 3 micrómetros en microtomo, los cuales fueron desparafinados mediante dos baños de xilol por cinco minutos cada uno. La hidratación se llevó a cabo con alcoholes decrecientes hasta agua destilada. Para la recuperación antigénica se utilizó citrato de sodio 0.01 M en olla de presión durante diez minutos.

Se aplicó anticuerpo monoclonal anti-MHC-I humano (No. catálogo: sc-32235 HRP, Santa Cruz Biotechnology) en dilución 1:100, con incubación de 30 minutos a temperatura ambiente. El revelado se realizó con DAB (3,3'-diaminobencidina) como cromógeno, seguido de contraste con hematoxilina por tres minutos. Finalmente se procedió al montaje mediante deshidratación, aclaramiento y montaje con resina sintética.

El procedimiento anterior resulta necesario para contrastar y visualizar estructuras celulares y tisulares transparentes al microscopio.

Control positivo

Se utilizó ganglio linfático humano como control positivo para confirmar la especificidad de la reacción antígeno-anticuerpo.

Observación microscópica

Las muestras se observaron con microscopio óptico de fondo claro (Velab VE-M1), evaluando la presencia o ausencia de reacción positiva (coloración ocre) en células y detritos celulares.

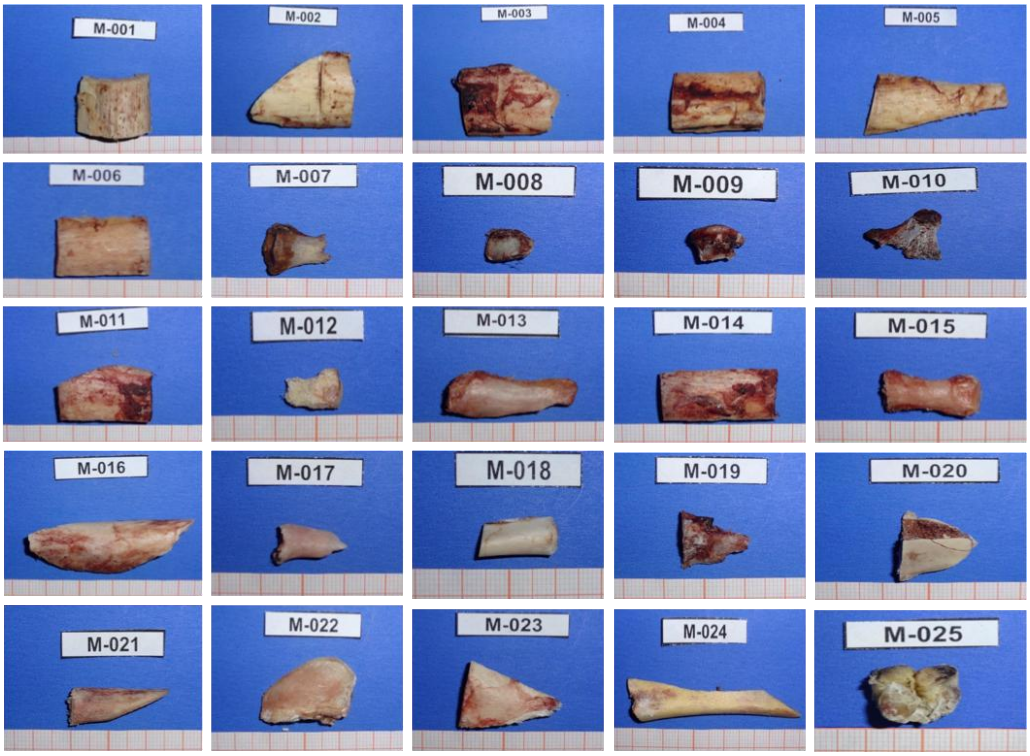


Figura 1. *Fragmentos óseos de humano y no humano que fueron procesados. Nota: Las muestras M-001 a M-015 corresponden a fragmentos óseos humanos y M-016 a M-025 a fragmentos óseos no humanos.*

Análisis estadístico

Se aplicó la Prueba Exacta de Fisher para determinar la asociación de las variables analizadas empleando una tabla de contingencia 2x2 (Tabla 1).

Origen	Reactividad Positiva	Reactividad Negativa	Total
Humano	15	0	15
No humano	0	10	10
Total	15	10	25

Tabla 1. *Tabla de contingencia 2x2 empleada para la Prueba Exacta de Fisher.*

Consideraciones éticas

El estudio se realizó conforme al Reglamento de la Ley General de Salud en Materia de Investigación para la Salud, con aprobación del Comité de Enseñanza, Investigación y Ética del Hospital General Xoco.

Resultados

Resultado de la inmunohistoquímica anti- MHC-I

Todas las muestras de origen humano (n=15) presentaron reacción positiva al anticuerpo anti-MHC-I, evidenciada por coloración ocre característica (Figura 2). El ganglio linfático humano utilizado como control mostró reacción positiva específica en células foliculares, mientras que la cápsula permaneció negativa, confirmando la especificidad del anticuerpo (Figura 2).

En contraste, ninguna de las muestras no humanas (n=10) mostró reacción con el anticuerpo empleado (Figura 3).

Características histológicas observadas

Se encontraron muestras con matriz celular conservada, que permitía la identificación del tejido, asimismo, se observaron muestras con degradación de la matriz celular severa, que no permitía la identificación del tejido.

Este daño de la matriz ósea puede explicarse por la acción mecánica de los instrumentos de corte empleados al seccionar los segmentos óseos (12).

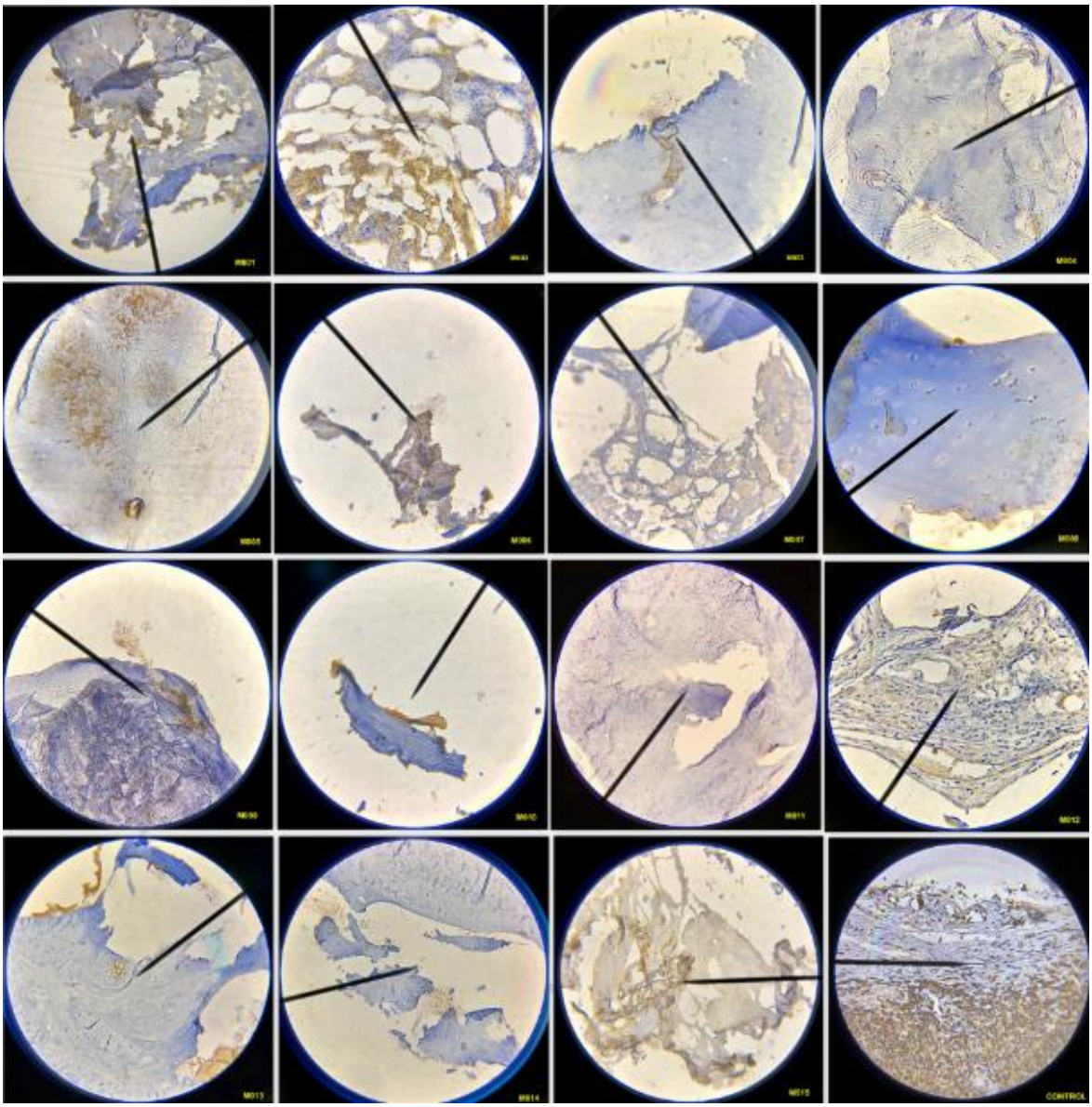


Figura 2. *Inmunohistoquímica anti-MHC-I en muestras de origen humano. Microfotografías ópticas (tinción de contraste con hematoxilina) que muestran una reacción positiva específica (coloración ocre) en células y detritos celulares de diversas muestras óseas humanas (M-001 a M-015; ver desglose de tejidos en Tabla 2). En el recuadro Control se observa el ganglio linfático humano (control positivo) con marcaje intenso en células foliculares y cápsula negativa.*

En las muestras con matriz extracelular conservada, se observaron osteocitos en lagunas óseas, que reaccionaron positivamente (M-004, M-011), restos vasculares en conductos de Havers (M-003, M-005, M-013) y osteoblastos con reacción positiva (M-013). Incluso en muestras con matriz extracelular degradada y fragmentación severa, los detritos celulares mantuvieron reacción positiva (M-001, M-004, M-006, M-008, M-009, M-010, M-014, M-015), permitiendo la autenticación del origen. Se identificaron diferentes tipos tisulares con reacción positiva: tejido óseo compacto (M-003, M-004, M-005, M-007, M-011, M-012, M-014), tejido óseo trabecular (M-014), cartílago articular (M-008, M-012), médula ósea (M-002, M-007), membrana sinovial (M-012), vasos sanguíneos (M-013) y células osteogénicas (M-013) (Figura 2).

Todas las muestras no humanas, incluyendo la de mono araña (Ateles geoffroyi) filogenéticamente cercana al humano, resultaron negativas para el anticuerpo anti-MHC-I. Se observaron estructuras histológicas bien conservadas en varias muestras, pero sin reacción inmunológica (Figura 3).

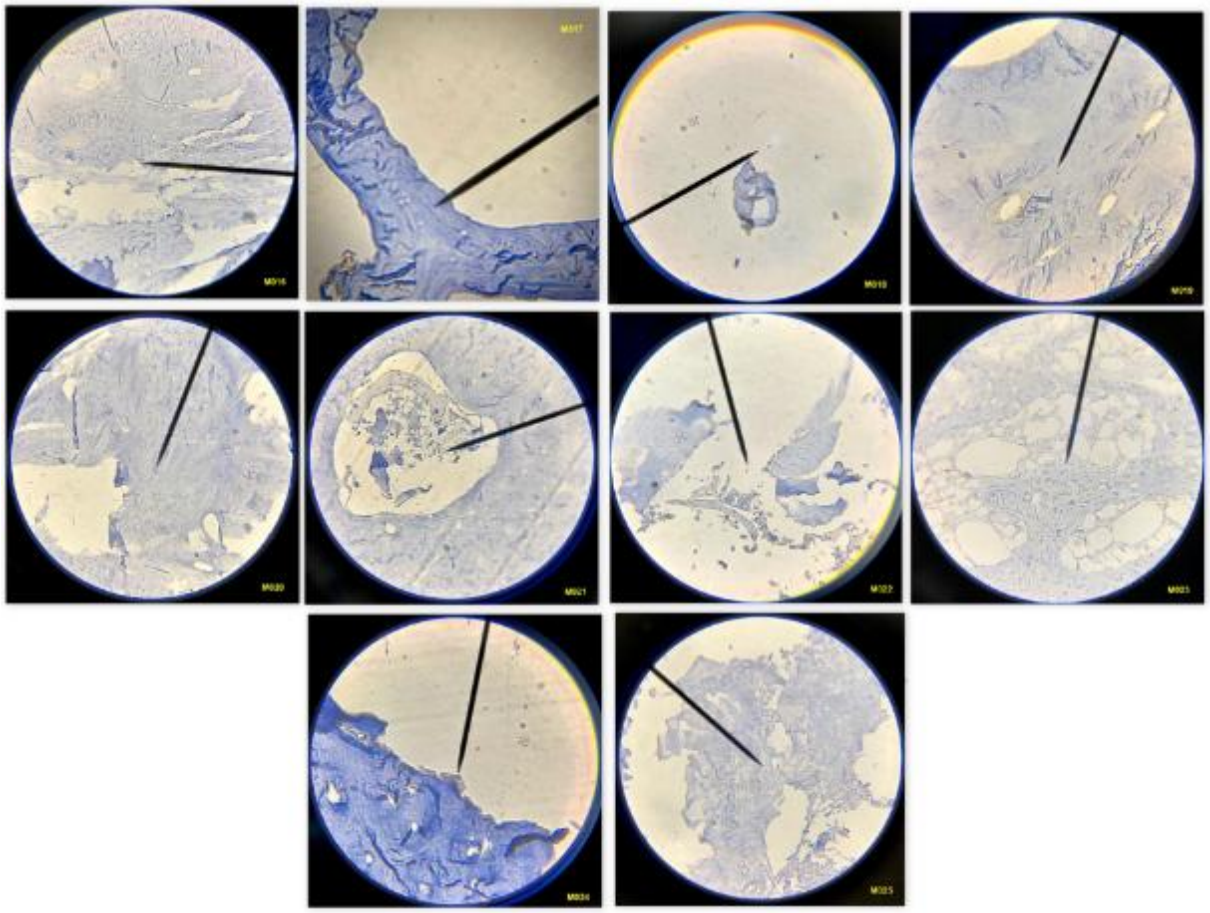


Figura 3. *Inmunohistoquímica anti-MHC-I en muestras no humanas. Microfotografías ópticas de fragmentos óseos provenientes de diez especies de vertebrados no humanos (M-016 a M-025; ver desglose en Tabla 3). Se observa una ausencia total de reacción inmunológica (sin coloración ocre), confirmando la especificidad del anticuerpo.*

En las siguientes tablas se resumen las características de las muestras analizadas.

MUESTRA	ORIGEN	EXPOSICIÓN DE LOS SEGMENTOS ANATÓMICOS A FUEGO, CALOR O CÁUSTICOS PREVIA A LA TOMA DE MUESTRA	MÉTODO DE CONSERVACIÓN DE LOS SEGMENTOS ANATÓMICOS PREVIO A LA TOMA DE MUESTRA	TEJIDOS OBSERVADOS EN LA MUESTRA	REACTIVIDAD ANTÍGENO-ANTICUERPO (MHC-I)
M-001	Humano	No	Refrigeración	Matriz ósea degradada, detritos celulares	Positiva
M-002	Humano	No	Refrigeración	Médula ósea	Positiva
M-003	Humano	No	Refrigeración	Matriz ósea conservada, vasos sanguíneos, lagunas óseas, detritos celulares	Positiva
M-004	Humano	No	Refrigeración	Matriz ósea conservada, lagunas óseas con osteocitos, Matriz ósea degradada con detritos celulares	Positiva
M-005	Humano	No	Refrigeración	Matriz ósea conservada, vasos sanguíneos y detritos celulares	Positiva
M-006	Humano	No	Refrigeración	Tejido degradado con abundantes detritos celulares	Positiva
M-007	Humano	No	Refrigeración	Matriz ósea conservada con abundantes detritos celulares y médula ósea	Positiva
M-008	Humano	No	Refrigeración	Cartílago hialino con condrocitos conservados y detritos celulares, matriz ósea degradada con abundantes detritos celulares	Positiva
M-009	Humano	No	Refrigeración	Matriz ósea degradada con abundantes detritos celulares	Positiva
M-010	Humano	No	Refrigeración	Matriz ósea fragmentada con células planas (posible periostio)	Positiva
M-011	Humano	No	Refrigeración	Matriz ósea conservada, lagunas óseas con osteocitos	Positiva
M-012	Humano	No	Refrigeración	Matriz ósea conservada con osteocitos, cartílago hialino, membrana sinovial	Positiva
M-013	Humano	No	Refrigeración	Matriz ósea conservada, vasos sanguíneos, capa de osteoblastos y detritos celulares	Positiva
M-014	Humano	No	Refrigeración	Hueso compacto y trabecular con abundantes detritos celulares	Positiva
M-015	Humano	No	Refrigeración	Matriz ósea degradada con abundantes detritos celulares	Positiva

Tabla 2. *Características de las muestras de origen humano analizadas.*

MUESTRA	ORIGEN	EXPOSICIÓN DE LOS SEGMENTOS ANATÓMICOS A FUEGO, CALOR O CÁUSTICOS PREVIA A LA TOMA DE MUESTRA	MÉTODO DE CONSERVACIÓN DE LOS SEGMENTOS ANATÓMICOS PREVIO A LA TOMA DE MUESTRA	TEJIDOS OBSERVADOS EN LA MUESTRA	REACTIVIDAD ANTÍGENO-ANTICUERPO (MHC-I)
M-016	Venado rojo	No	Refrigeración	Matriz ósea conservada, vasos sanguíneos y detritos celulares	Negativa
M-017	Jabalí	No	Refrigeración	Hueso trabecular	Negativa
M-018	Zorrillo rayado	No	Refrigeración	Matriz ósea degradada y detritos celulares	Negativa
M-019	León	No	Refrigeración	Matriz ósea conservada, lagunas óseas	Negativa
M-020	Armadillo de nueve bandas	No	Refrigeración	Matriz ósea conservada, osteocitos y detritos celulares	Negativa
M-021	Cordero	No	Refrigeración	Hueso trabecular, endostio, médula ósea y detritos celulares	Negativa
M-022	Bovino	No	Refrigeración	Tejido óseo fragmentado, hueso trabecular con osteoblastos, endostio y médula ósea	Negativa
M-023	Cerdo	No	Refrigeración	Hueso trabecular, médula ósea y detritos celulares	Negativa
M-024	Gallina	No	Refrigeración	Tejido óseo compacto y trabecular, endostio y médula ósea	Negativa
M-025	Mono araña	No	Refrigeración	Hueso compacto y trabecular, abundantes detritos celulares	Negativa

Tabla 3. *Características de las muestras de origen no humano analizadas.*

Resultados del análisis inferencial

El análisis mediante la Prueba Exacta de Fisher mostró Valor p= 0.00000031, manifestando una asociación significativa entre el origen (humano / no humano) y el tipo de reacción antígeno-anticuerpo anti-MHC-I.

Discusión

En las diversas muestras que presentaron una reacción positiva al anticuerpo anti-MHC-I, se mostraron diferentes tonalidades de color ocre. Se ha reportado previamente, que las distintas tonalidades o intensidades de color ocre en las muestras de inmunohistoquímica pueden deberse tanto a

diferencias biológicas reales en la cantidad de antígeno como a variaciones técnicas del procesamiento y de la tinción (13).

En el presente estudio, las muestras fueron procesadas en el laboratorio bajo exactamente las mismas condiciones y la misma tinción, por lo que, las distintas tonalidades de ocre observadas muestran una diferencia real en la cantidad-distribución del antígeno MHC-I expresado en distintos tejidos.

Los resultados del presente estudio sugieren que el MHC-I constituye un marcador útil para la autentificación de fragmentos óseos humanos mediante técnica inmunohistoquímica. Los resultados obtenidos superan la precisión reportada para métodos histológicos convencionales, como el de Cattaneo et al. (2009) quienes reportaron una tasa de identificación exitosa de 70% de fragmentos óseos humanos mediante el análisis de la morfometría de osteonas (3). Martiniaková y cols. por su parte, evaluaron los canales haversianos y las osteonas de fragmentos de fémur de humano, cerdo, vaca, oveja y conejo demostrando una precisión de este método morfométrico de 76.17% (14). En otro estudio Crescimanno y cols. evaluaron la circularidad microscópica ósea para distinguir fragmentos humanos de los no humanos, encontrando diferencias significativas entre los hallazgos de fragmentos humanos y no humanos (2). Aunque la precisión del método de circularidad de fragmentos humanos fue menor (76.5%) a la de la inmunohistoquímica anti- MHC-I encontrada en nuestro estudio. Por tanto, el empleo de inmunohistoquímica con anticuerpos anti- MHC-I tiene un mejor desempeño que métodos previamente reportados.

El método propuesto demostró utilidad en el análisis de muestras con matriz celular degradada, ya que a diferencia de los métodos histológicos tradicionales que requieren matriz extracelular conservada, la técnica inmunohistoquímica mostró reactividad antígeno-anticuerpo incluso en muestras con matriz celular degradada. Esta característica podría resultar útil en casos forenses reales. Adicionalmente, mostró versatilidad de tejidos analizables, pues mientras que la histología convencional se limita al tejido óseo compacto, el MHC-I se detectó en diversos componentes del órgano óseo, incluyendo tejido óseo compacto y trabecular, cartílago, médula ósea, membrana sinovial y células osteogénicas. Esta versatilidad es particularmente relevante cuando los fragmentos disponibles no contienen hueso cortical.

La diferenciación interespecífica constituye otra ventaja significativa, ya que en ninguna de las diez muestras no humanas evaluadas se encontró expresión de MHC-I, demostrándose así la especificidad. Además, la preservación de la muestra representa una mejora sustancial, pues a diferencia del radioinmunoensayo que requiere pulverización del material, la técnica inmunohistoquímica preserva la integridad de la muestra, permitiendo análisis repetidos y estudios complementarios (11).

En términos moleculares, la especificidad del MHC-I humano radica en su función biológica como sistema de reconocimiento inmunológico propio de cada especie. Estas glucoproteínas, expresadas constitutivamente en células nucleadas humanas, presentan variaciones estructurales específicas que las distinguen de las moléculas homólogas en otras especies (15).

De hecho, el análisis de los genes del MHC de clase I de simios y monos revela el grado diferencial de conservación de estos genes durante la evolución de los primates. Los simios africanos poseen ortólogos de los seis genes humanos, y aunque comparten linajes alélicos de los loci A y C, estas especies no comparten ninguno de los alelos humanos (16). Esto provee las bases para la especificidad encontrada de los anticuerpos anti-MHC clase I en los fragmentos óseos humanos y la no reacción cruzada con otras especies.

Los resultados de este estudio son prometedores; sin embargo, al ser un estudio piloto, es importante considerar diversas limitaciones: el tamaño de la muestra es reducido, lo que no permite establecer valores predictivos positivo y negativo, ni la exactitud global.

Asimismo, las muestras empleadas en el presente estudio sólo fueron sometidas a refrigeración, por lo que resulta pertinente ampliar este estudio con muestras sometidas a otros procesos tafonómicos complejos, tales como intemperización, meteorización, calcinación, cocción o diagénesis.

Otra limitación para considerar es el empleo de solamente una especie de primate no humano (*Ateles geoffroyi*), lo que hace conveniente el estudio de muestras provenientes de primates filogenéticamente más cercanos al humano, tales como el chimpancé, para descartar posibles reacciones cruzadas.

Conclusiones

El Complejo Mayor de Histocompatibilidad clase I demostró un alto potencial para ser un marcador confiable para la autenticación de fragmentos óseos humanos, con expresión del 100% en las muestras humanas analizadas.

La técnica inmunohistoquímica propuesta permitió la autenticación al emplear no solamente el tejido óseo compacto, sino también diversos tejidos presentes en las muestras analizadas.

El método permite, además, la preservación de la integridad de la muestra, así como análisis repetidos y estudios complementarios, lo que representa una ventaja significativa sobre métodos destructivos como el radioinmunoensayo.

La aplicación de esta metodología en la práctica forense podría incrementar significativamente la precisión y confiabilidad de la autenticación del origen biológico de fragmentos óseos.

El establecimiento del MHC-I como marcador en Antropología Forense podría contribuir a la práctica de identificación de especies. Asimismo, futuras investigaciones deberían evaluar la sensibilidad de la técnica en condiciones extremas de degradación y explorar la aplicación en casos de cremación parcial o exposición a condiciones ambientales severas que induzcan mayores cambios tafonómicos.

Referencias

1. Stan E, Muresan CO, Daescu E, Dumache R, Ciocan V, Ungureanu S, et al. A Review of Histological Techniques for Differentiating Human Bone from Animal Bone. Methods Protoc [Internet]. 2024 Aug 1 [cited 2025 Aug 7];7(4):51. Available from: https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11270420/
2. Crescimanno A, Stout SD. Differentiating Fragmented Human and Nonhuman Long Bone Using Osteon Circularity. J Forensic Sci [Internet]. 2012 Mar [cited 2025 Aug 7];57(2):287–94. Available from: https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/22103892/
3. Cattaneo C, Porta D, Gibelli D, Gamba C. Histological determination of the human origin of bone fragments. J Forensic Sci [Internet]. 2009 May [cited 2025 Aug 7];54(3):531–3. Available from: https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/19298464/
4. Mulhern D, Ubelaker D. Differences in Osteon Banding Between Human and Nonhuman Bone. Journal of Forensic Sciences 1972-2005 [Internet]. 2001 Mar 1 [cited 2025 Aug 7];46(2):220–2. Available from: https://dx.doi.org/10.1520/JFS14952J
5. Andronowski JM, Crowder C, Soto Martinez M. Recent advancements in the analysis of bone microstructure: New dimensions in forensic anthropology. Forensic Sci Res [Internet]. 2018 Oct 2 [cited 2025 Aug 7];3(4):278. Available from: https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC6374927/
6. Ubelaker D, Lowenstein J, Hood D. Use of Solid-Phase Double-Antibody Radioimmunoassay to Identify Species from Small Skeletal Fragments. Journal of Forensic Sciences 1972-2005 [Internet]. 2004 Sep 1 [cited 2025 Aug 7];49(5): JFS2003399-6. Available from: https://dx.doi.org/10.1520/JFS2003399
7. Ubelaker DH, Wu Y. Fragment Analysis in Forensic Anthropology. Forensic Sci Res [Internet]. 2020 Oct 1 [cited 2025 Aug 7];5(4):260–5. Available from: https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/33457044/
8. López-Martínez A, Chávez-Muñoz C, Granados J. Función biológica del complejo principal de histocompatibilidad. Revista de Investigación Clínica. 2005;57(2):132–41.
9. Araújo A, Nathália I, Vieira U, Nayara J, Da Silva F, Pereira De Faria S, et al. The major histocompatibility complex and its functions. Referências em Saúde do Centro Universitário Estácio de Goiás [Internet]. 2001 [cited 2025 Aug 7];3(01):18–26. Available from: https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK27156/
10. Mebratie DY, Dagnaw GG. Review of immunohistochemistry techniques: Applications, current status, and future perspectives. Semin Diagn Pathol [Internet]. 2024 May 1 [cited 2025 Aug 7];41(3):154–60. Available from: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0740257024000467
11. Kim SW, Roh J, Park CS. Immunohistochemistry for Pathologists: Protocols, Pitfalls, and Tips. J Pathol Transl Med [Internet]. 2016 [cited 2025 Aug 7];50(6):411. Available from: https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC5122731/
12. Taqi SA, Sami SA, Sami LB, Zaki SA. A review of artifacts in histopathology. J Oral Maxillofac Pathol [Internet]. 2018 [cited 2025 Aug 7];22(2):279. Available from: https://doi.org/10.4103/jomfp.JOMFP_125_15
13. Meyerholz DK, Beck AP. Principles and approaches for reproducible scoring of tissue stains in research. Lab Invest. 2018 Jul;98(7):844-855. Available from: https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/29849125/
14. Martiniaková M, Grosskopf B, Omelka R, Vondráková M, Bauerová M. Differences among species in compact bone tissue microstructure of mammalian skeleton: Use of a discriminant function analysis for species identification. J Forensic Sci [Internet]. 2006 Nov [cited 2025 Aug 24];51(6):1235–9. Available from: https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/17199608/
15. Bruijnesteijn J. HLA/MHC and KIR characterization in humans and non-human primates using Oxford Nanopore Technologies and Pacific Biosciences sequencing platforms. HLA [Internet]. 2023 Mar 1 [cited 2025 Aug 24];101(3):205–21. Available from: https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/36583332/
16. Adams EJ, Parham P. Species-specific evolution of MHC class I genes in the higher primates. Immunol Rev [Internet]. 2001 [cited 2025 Aug 7]; 183:41–64. Available from: https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/11782246/

Revista Digital de Ciencia Forense (ReCiF)
Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, 2026
ISSN 3061-7588