

LAS HUELLAS DÉRMICAS MÁS ALLÁ DE LA IDENTIFICACIÓN: REVISIÓN DE LAS POTENCIALIDADES QUÍMICO-CRIMINALÍSTICAS PARA LA DETERMINACIÓN DEL SEXO

DERMAL TRACES BEYOND IDENTIFICATION: A REVIEW OF THE CHEMICAL-CRIMINALISTIC POTENTIAL FOR SEX DETERMINATION

Legrá Correa RR¹.

Posada Jeanjaques JA².

Fanego González A³.

¹Doctor en Ciencias Policiales.

²Doctor en Ciencias. Unidad de Preparación y Ciencias.

³Especialista de Posgrado en Criminalística.

Dirección de Criminalística.

Cuba.

Correspondencia: artdg1987@gmail.com

Resumen: Las huellas dérmicas, fundamento de la identificación criminalística por más de un siglo, están experimentando una revolución paradigmática, más allá de su patrón biométrico, la mezcla química que las compone ha emergido como una importante fuente de información diagnóstica sobre el donante. Esta revisión tiene como objetivo cartografiar el estado del arte de las metodologías para la determinación del sexo a partir de huellas dérmicas, con un enfoque crítico en las aristas químico-analíticas. Se realiza un análisis exhaustivo de los antecedentes históricos, el mecanismo de formación y la composición bioquímica del sudor, identificando a los aminoácidos como biomarcadores clave. Se contrastan las dos grandes líneas de investigación: la biométrica basada en la densidad de crestas y la química basada en la composición molecular. La evidencia revisada sugiere que, si bien las técnicas de alta sensibilidad ofrecen una caracterización molecular sin igual, las metodologías basadas en espectroscopía ultravioleta visible representan un equilibrio óptimo entre confiabilidad, costo y alcance nacional, posicionándose como herramientas viables para el direccionamiento diagnóstico en el campo de las investigaciones criminales.

Palabras clave: huellas dérmicas, determinación del sexo, biomarcadores, aminoácidos, sudor.

Abstract: Dermal fingerprints, the cornerstone of forensic identification for more than a century, are undergoing a paradigm shift. Beyond their biometric pattern, the chemical mixture that composes them has emerged as a significant source of diagnostic information about the donor. This review aims to map the state of the art of methodologies for sex determination based on dermal fingerprints, with a critical focus on chemical-analytical aspects. A comprehensive analysis is presented regarding historical background, formation mechanisms, and the biochemical composition of sweat, identifying amino acids as key biomarkers. Two major research approaches are contrasted: the biometric approach based on ridge density, and the chemical approach based on molecular composition. The reviewed evidence suggests that, while high-sensitivity techniques provide unmatched molecular characterization, methodologies based on ultraviolet-visible spectroscopy represent an optimal balance between reliability, cost, and nationwide applicability, positioning them as viable tools for diagnostic guidance in criminal investigations.

Keywords: dermal fingerprints, sex determination, biomarkers, amino acids, sweat.

1. INTRODUCCIÓN

La Criminalística, como ciencia dinámica, se encuentra en una búsqueda constante de maximizar la información obtenida de los vestigios en el lugar del hecho. Entre estos, las huellas dérmicas han sido el pilar áureo de la identificación individual desde finales del siglo XIX. La dermatoscopía, centrada en la singularidad y permanencia de los relieves papilares, ha permitido la individualización de incontables autores de delitos (1). Sin embargo, este enfoque, aunque poderoso, tradicionalmente ha pasado por alto una dimensión completa de información contenida en la propia huella: su composición química.

El concepto de la “huella dentro de la huella”, la impresión molecular dejada por el sudor, los sebáceos y los contaminantes ambientales, ha abierto un nuevo campo de investigación. Este residuo, lejos de ser una simple sustancia adherente para los polvos reveladores, es un reflejo bioquímico del donante. En la última década, particularmente a partir

de 2007, se ha descubierto que es posible extraer de él información diagnóstica valiosa, denominada “biometría suave” (soft biometrics), relativa al sexo, la edad aproximada, la dieta, el estilo de vida e incluso la exposición a drogas o explosivos (2).

La determinación del sexo constituye un dato de primordial importancia en la fase crítica inicial de una investigación criminal, permitiendo filtrar y acotar de manera significativa el universo de sospechosos. Las técnicas actualmente disponibles para este fin, la identificación de la cromatina sexual X (3), el análisis de marcadores específicos del cromosoma Y en el ADN nuclear, y los perfiles de olor mediante Cromatografía de Gases-Espectrometría de Masas (GC-MS), si bien son altamente precisas, presentan obstáculos insalvables para su uso masivo e inmediato: elevados costos, disponibilidad restringida a laboratorios de alta especialización, y, en el caso del análisis de olor, una vulnerabilidad extrema a la contaminación, una condición casi utópica en la escena de un crimen.

Esta revisión se propone realizar un análisis exhaustivo y crítico de los fundamentos científicos y los avances metodológicos en la determinación químico-criminalística del sexo a partir de las huellas dérmicas. El objetivo central es sintetizar la literatura existente, con especial énfasis en la viabilidad de los aminoácidos del sudor como biomarcadores robustos y en la evaluación de técnicas analíticas que equilibren la confiabilidad con la practicidad operativa, particularmente en contextos con recursos limitados.

2. DESARROLLO

2.1. Las huellas dérmicas: evolución conceptual de la identificación al valor diagnóstico

Las huellas dérmicas son el resultado de un proceso de transferencia físico-químico, donde el material de la piel (sudor, grasa, células epiteliales) se deposita sobre una superficie receptora. Su valor probatorio ha residido históricamente en la individualidad de los patrones de crestas y surcos, un principio establecido por Galton y consolidado en los sistemas de identificación dactilar (4).

No obstante, la perspectiva contemporánea amplía este paradigma. Las investigaciones realizadas por Posada (1), enfatizan que el objeto de estudio de la Dermoscopía Criminalística no son solo los relieves, sino también “la composición de las sustancias de excreción humana”. Este cambio de enfoque ha sido catalizado por el desarrollo de técnicas analíticas sensibles capaces de caracterizar trazas moleculares. Hoy, una huella dérmica es vista como un archivo bioquímico que registra el estado fisiológico del donante en el momento de su deposición. Investigaciones recientes han logrado detectar en ellas desde metabolitos de cafeína y fármacos (5) hasta péptidos que permiten inferir el sexo (6), transformando a la huella dérmica de un mero molde topográfico a una rica fuente de información contextual.

2.2. Tendencias actuales en la determinación del sexo: biométrica vs. química

La literatura especializada revela dos estrategias principales, con filosofías y aplicaciones distintas:

Enfoque biométrico (análisis de la densidad de crestas): predominante en regiones con alta homogeneidad poblacional como Asia y África, este método se basa en premisas establecidas por criminalistas soviéticos en el siglo pasado. Utiliza parámetros como el número de crestas en un área determinada, el ancho de los surcos y las relaciones de asimetría. Estudios como los de (7) y (8) reportan precisiones de clasificación superiores al 85-90% empleando algoritmos complejos como Máquinas de Soporte Vectorial (SVM) o Transformadas de Onda. Sin embargo, esta aproximación adolece de limitaciones significativas: su precisión es altamente dependiente de la etnia, la edad y la calidad de la impresión; es vulnerable a la presencia de cicatrices o deformaciones; y, crucialmente, aún requiere una considerable intervención humana para el conteo y la preparación de las muestras, lo que la hace lenta y subjetiva (9).

Enfoque químico (análisis de la composición molecular): Esta línea, de mayor interés para esta revisión, se centra en explotar las diferencias en la composición química del sudor entre sexos. El principio subyacente es que el metabolismo, regulado por perfiles hormonales distintos, se refleja en la excreción de metabolitos a través del sudor. Este enfoque es intrínsecamente más objetivo, ya que analiza señales químicas medibles, y puede realizarse sobre fragmentos de huella insuficientes para la identificación dermatoscópica.

2.3. El sudor como matriz bioquímica: los aminoácidos como biomarcadores clave

El sudor es una secreción compleja con un pH entre 3.8 y 5.6, compuesta principalmente por agua (~97%), electrolitos (ClNa, KCl, ~2.5%) y una fracción orgánica minoritaria (~0.5%) de inmenso valor informativo (9; 10). Entre sus componentes se encuentran urea, ácido láctico, ácidos grasos y, de particular relevancia, aminoácidos libres.

Los aminoácidos, como bloques constituyentes de las proteínas, son productos y reguladores del metabolismo. Investigaciones citadas en la tesis de Legrá (2020) indican que la concentración total de aminoácidos en el sudor de las mujeres es consistentemente más alta, aproximadamente el doble que en los hombres. Si bien el perfil completo puede variar, aminoácidos como la serina, la glicina y la alanina suelen mostrar diferencias significativas. Una ventaja criminalística crucial de los aminoácidos es su estabilidad en las huellas reveladas con agentes físicos (polvos como negro de humo, aluminio o carmelita). Estos polvos, con una granulometría entre 70-100 μm , se adhieren mecánicamente al residuo sin reaccionar químicamente con los aminoácidos, permitiendo su posterior extracción y análisis (9).

2.4. Estructura general de los aminoácidos.

La estructura general de un alfa-aminoácido (Figura 1) se establece por la presencia de un carbono central (alfa) unido a un grupo carboxilo (rojo en la figura), un grupo amino (verde), un hidrógeno (en negro) y la cadena lateral (azul):

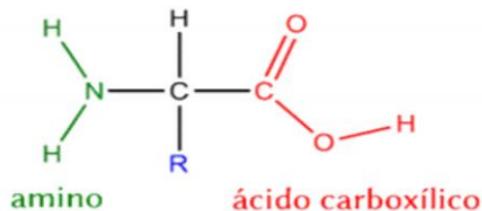


Figura 1. Estructura general de un aminoácido.

"R" representa la cadena lateral, específica para cada aminoácido. Tanto el carboxilo como el amino son grupos funcionales susceptibles de ionización dependiendo de los cambios de pH, por eso ningún aminoácido en disolución se encuentra realmente en la forma representada en la figura, sino que se encuentra ionizado (Figura 2).



Figura 2. Representación ionizada de un aminoácido en solución

A pH bajo (ácido), los aminoácidos se encuentran mayoritariamente en su forma catiónica (con carga positiva), mientras que a pH alto (básico) se encuentran en su forma aniónica (con carga negativa). Para valores de pH intermedios, como los propios de los medios biológicos, los aminoácidos se encuentran habitualmente en una forma de ion dipolar o zwitterión (con un grupo catiónico y otro aniónico).

2.5. Potencialidades químico criminalísticas de los aminoácidos

Los aminoácidos, como componentes del sudor, presentan un conjunto de características que los convierten en biomarcadores ideales para la investigación criminalística, extendiendo su utilidad mucho más allá de la mera determinación del sexo. Su explotación forense se sustenta en varias potencialidades clave:

1. Estabilidad y persistencia: a diferencia de otros componentes volátiles del sudor, los aminoácidos exhiben una estabilidad química extraordinaria en las huellas dérmicas una vez depositadas (9). Esta estabilidad se mantiene incluso después de los procesos de revelado con agentes físicos convencionales (como polvos de aluminio, negro de humo o carmelita). Dado que estos reveladores actúan mediante adhesión física y no reaccionan químicamente con los aminoácidos, no alteran su composición ni impiden su posterior extracción y análisis. Esta característica es crucial, ya que permite el análisis de huellas que ya han sido procesadas para identificación dermatoscópica, aprovechando vestigios que de otra manera agotarían su utilidad.

2. Accesibilidad y Abundancia Relativa: Aunque constituyen aproximadamente solo el 0.5% de la composición del sudor, los aminoácidos están siempre presentes en las secreciones sudoríparas de cualquier individuo. Esta presencia universal los convierte en un blanco analítico confiable. Además, la cantidad depositada en una huella dérmica, si bien pequeña, es suficiente para ser cuantificada mediante técnicas sensibles como la espectroscopía UV-Vis, sin necesidad de recurrir a equipos de última generación (9; 12).

3. Valor como biomarcador diagnóstico (sexo): La variación cuantitativa predecible en la concentración total de aminoácidos entre sexos es su potencialidad más estudiada. La investigación de Legrá (2020) corrobora que las concentraciones en mujeres duplican aproximadamente a las de los hombres, permitiendo una discriminación con un 99% de confiabilidad. Más allá del sexo, el perfil de aminoácidos parece contener información sobre la edad del donante. El método enzimático desarrollado por (9) determinó una perturbación en los resultados que al estudiarla le permitió asociarla a tres grupos etarios (juventud, adultez, vejez) a partir del comportamiento de las curvas de absorbancia, lo que sugiere que los cambios metabólicos asociados al envejecimiento se reflejan en la composición del sudor. Esta capacidad de proporcionar una "radiografía" bioquímica del donante (sexo y grupo de edad) a partir de un solo vestigio multiplica exponencialmente el valor informativo de una huella dérmica.

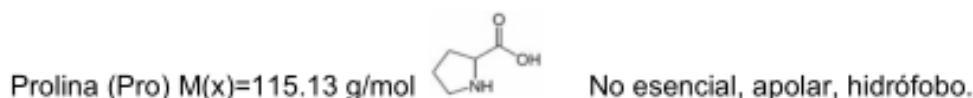
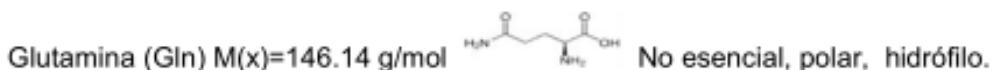
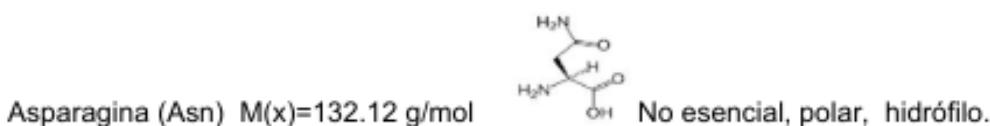
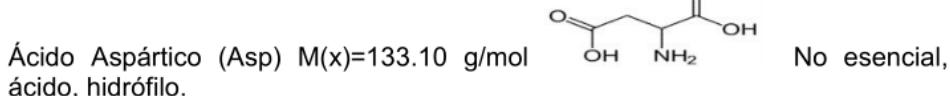
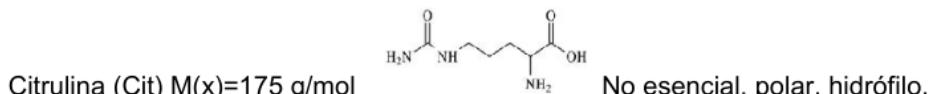
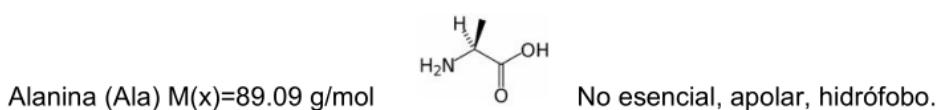
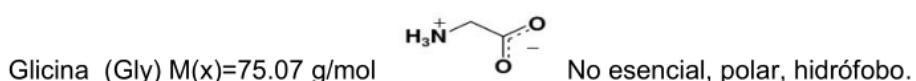
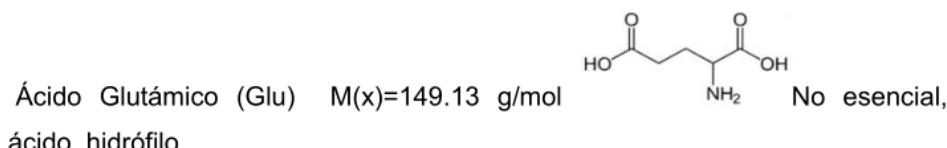
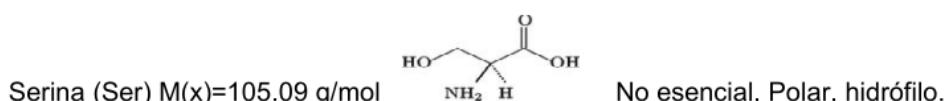
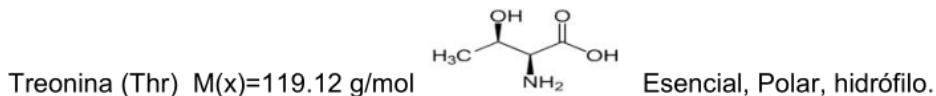
4. Versatilidad analítica: los aminoácidos pueden ser determinados mediante una amplia gama de técnicas analíticas, lo que permite adaptar la metodología a las capacidades de cualquier laboratorio. Desde técnicas de alta resolución como la espectrometría de masas (MALDI-MS) para una caracterización molecular profunda, hasta métodos más accesibles como las reacciones colorimétricas (con ninhidrina) o enzimáticas acopladas a UV-Vis, existe un protocolo viable para cada contexto. Esta versatilidad asegura que la técnica pueda ser implementada indistintamente en todos los laboratorios, democratizando el acceso a esta pericia diagnóstica.

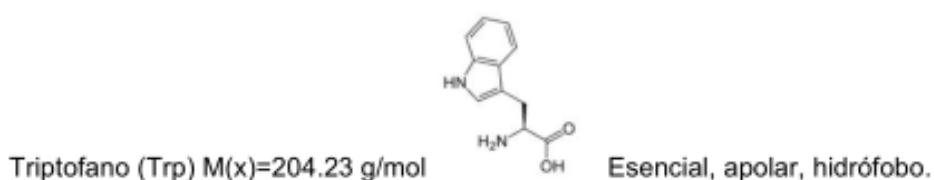
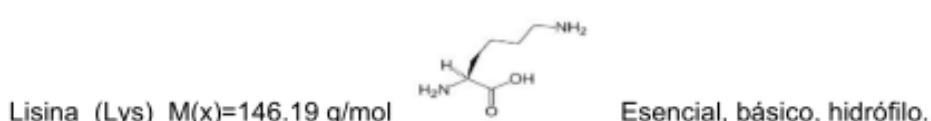
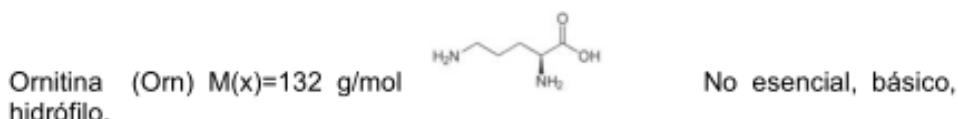
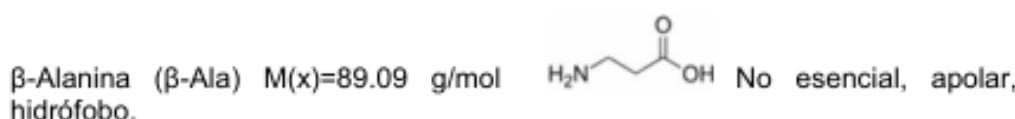
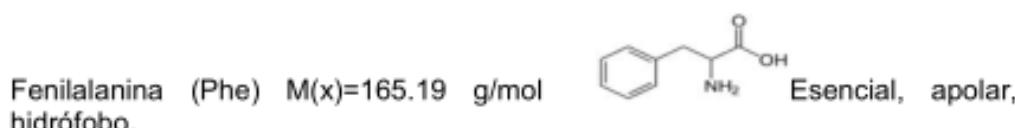
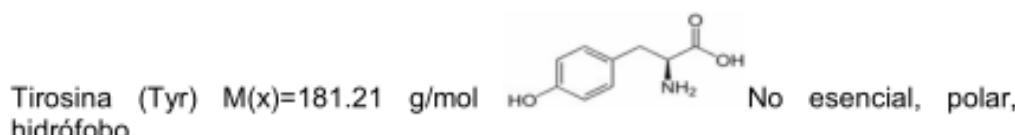
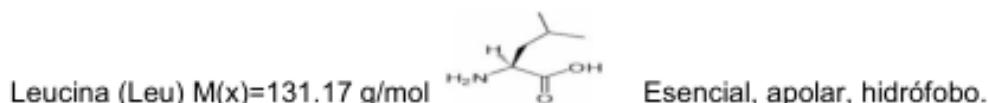
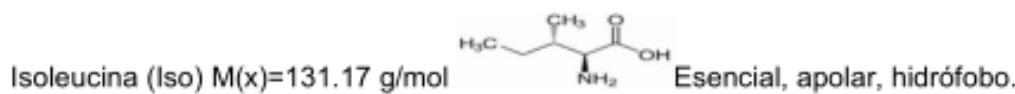
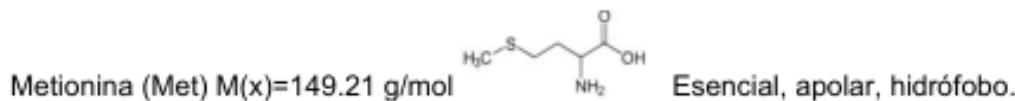
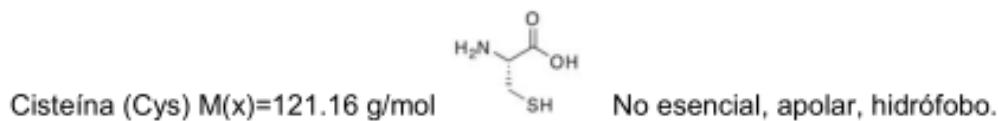
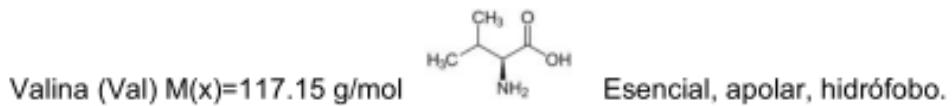
5. Compatibilidad con los flujos de trabajo criminalísticos existentes: la extracción y análisis de aminoácidos no interfiere con los procedimientos periciales establecidos. Una huella puede ser primero revelada, fotografiada y utilizada para búsquedas en bases de datos dermatoscópicas. Posteriormente, sin que ello invalide la huella para otros fines, puede procederse a la extracción de los aminoácidos para la determinación del sexo. Esta retrocompatibilidad es fundamental

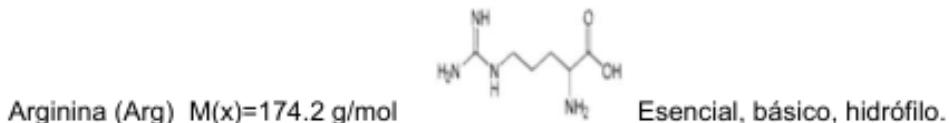
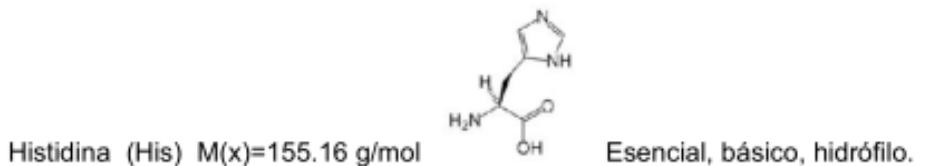
para la adopción de la metodología, ya que se integra de manera no destructiva o secuencial en la cadena de custodia y análisis del vestigio.

6. Potencial para otras determinaciones: si bien la mirada actual está en la determinación de sexo, el perfil de aminoácidos es una puerta de entrada a otras líneas de investigación. Futuros estudios podrían explorar su relación con condiciones médicas específicas, desbalances metabólicos, o incluso como un sustrato para detectar la presencia de nanohuellas de drogas, explosivos y otras sustancias de interés criminalístico que alteren el perfil normal de excreción.

Los aminoácidos determinados para la investigación, teniendo en cuenta sus características y propiedades son:







2.6. Panorama de técnicas analíticas: de la alta tecnología a la practicidad operativa

El abanico de técnicas disponibles para el análisis de aminoácidos es amplio y refleja un compromiso entre sensibilidad y accesibilidad.

· Técnicas de alta resolución y costo elevado:

· Espectrometría de masas (MS): Técnicas como la MALDI-MS (6) han demostrado la capacidad de detectar directamente péptidos y pequeñas proteínas en huellas dérmicas, correlacionando su presencia con el sexo del donante. La GC-MS, por su parte, ha permitido un mapeo exhaustivo de los componentes volátiles y semivolátiles de huellas estudiadas (9). Si bien ofrecen una caracterización molecular profunda y una sensibilidad inigualable, su alto costo y limitada disponibilidad las convierten en herramientas poco accesibles para la mayoría de los laboratorios y para el “primer ataque” investigativo.

· Técnicas sencillas y de amplia cobertura:

· Espectroscopía ultravioleta-visible (UV-Vis) con reactivos cromogénicos: esta es la estrategia más prometedora para la implementación masiva. Se basa en provocar una reacción química que genere un compuesto coloreado cuya intensidad sea proporcional a la concentración de aminoácidos.

· Reacción con ninhidrina: es un estándar en criminalística para revelar huellas en superficies porosas. Reacciona con los aminoácidos primarios para formar el “púrpura de Ruhemann”, un complejo de color violeta que presenta su máxima absorbancia a 570 nm. Su aplicación cuantitativa es sencilla y robusta.

· Reacción enzimática en cascada: es una alternativa más específica. Implica el uso de dos enzimas: la L-Aminoácido Oxidasa (L-AAO) oxida los aminoácidos, generando peróxido de hidrógeno (H_2O_2). Este, a su vez, es utilizado por la Horseradish Peroxidasa (HRP) para oxidar un sustrato cromogénico incoloro, como la o-Dianisidina, transformándolo en un compuesto coloreado que se mide a 436 nm (10).

La validación experimental de estos métodos, como la reportada por Legrá (2020) (9), demuestra que ambos (enzimático y colorimétrico) pueden discriminar entre sexos con un 99% de confiabilidad.

2.7. Discusión

La evidencia revisada consolida la viabilidad de la determinación química del sexo. La investigación de Legrá (2020) (9) no solo replica los hallazgos de Halamek et al. (2015, 2016) (12;13) en un contexto cubano, sino que los valida con huellas reales de casos criminalísticos, demostrando que la metodología es robusta frente a variables del mundo real como el tipo de superficie (vidrio, metal, madera) y el agente revelador físico utilizado.

La ventaja estratégica de las metodologías basadas en UV-Vis es innegable: se enfatiza el uso de la pericia diagnóstica avanzada. Permiten que un laboratorio provincial, con equipamiento estándar y personal entrenado, genere

información crucial para direccionar una investigación en sus primeras y más críticas horas, sin depender de la logística y el costo de equipamientos de alto costo, mayor sensibilidad y mucho menor distribución nacional.

Sin embargo, es crucial reconocer las limitaciones y áreas de incertidumbre. La influencia de factores como la dieta, el estrés agudo, el estado de salud, la actividad física reciente y la variabilidad interindividual en el perfil de aminoácidos requiere una investigación más profunda. La estandarización del protocolo de extracción es crítica para garantizar la reproducibilidad entre laboratorios. Además, la posible interferencia de contaminantes exógenos en la escena del crimen debe ser estudiada de manera sistemática.

2.8. Las perspectivas futuras son enormemente prometedoras:

1. Refinamiento de los biomarcadores: en lugar de medir el contenido total de aminoácidos, futuras investigaciones podrían identificar ratios o perfiles específicos de unos pocos aminoácidos clave que maximicen la discriminación entre sexos.

2. Ampliación de superficies y agentes: es imperativo extender la validación a una gama más amplia de superficies receptoras (plásticos, textiles) y agentes reveladores químicos (como el cianoacrilato).

3. Multianálisis integrado: El futuro reside en extraer múltiples capas de información de una sola huella. Una misma extracción podría ser utilizada, secuencial o paralelamente, para determinar sexo, detectar metabolitos de drogas o explosivos, e incluso estimar la antigüedad de la huella.

4. Automatización y miniaturización: El desarrollo de kits reactivos pre-dosificados o incluso de dispositivos portátiles podría llevar esta capacidad analítica directamente a la escena del crimen.

3. CONCLUSIÓN

Esta revisión corrobora que las huellas dérmicas han trascendido su papel histórico como meros moldes de identificación. La explotación de su composición química, particularmente del perfil de aminoácidos en el sudor, representa un avance significativo en la criminalística moderna. Frente a las limitaciones de las técnicas biométricas y el alto costo de las metodologías de espectrometría de masas, los enfoques basados en reacciones colorimétricas y enzimáticas con espectroscopía UV-Vis se erigen como una solución óptima. Estos métodos ofrecen una combinación única de confiabilidad estadística, bajo costo, rapidez y, lo más importante, una capacidad de despliegue nacional que los hace ideales para el direccionamiento operativo inicial. La implementación de estas metodologías no sustituye a las técnicas de identificación tradicional, sino que las complementa de manera poderosa, permitiendo a los investigadores criminalísticos extraer, de un vestigio clásico, respuestas innovadoras para los desafíos del siglo XXI.

4. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Posada J. A. Teoría Criminalística de las Huellas. Ed. Capitán San Luis. ISBN 978-959-211-451-7.
2. Girod A, Ramotowski R, Weyermann C. Composition of fingermark residue: A qualitative and quantitative review. *Forensic Science International*, 223(1-3), 10-24. <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2012.05.018>.
3. Barr M. L, Bertram E. G. A morphological distinction between neurones of the male and female, and the behaviour of the nucleolar satellite during accelerated nucleoprotein synthesis. *Nature*, 163(4148), 676-7. <https://doi.org/10.1038/163676a0>

4. Thorwald J. El Siglo de la Investigación Criminal. Edición Revolucionaria. Instituto del Libro. La Habana.
5. Boddis A, Russell D. Simultaneous development and detection of drug metabolites in latent fingermarks using antibody-magnetic particle conjugates. *Analytical Methods*, 3(3), 519–523. <https://doi.org/10.1039/C1AY05009E>
6. Carolan V, Wulfert F, Wolstenholme R, Fonville J, Clench M. Direct detection of peptides and small proteins in fingermarks and determination of sex by MALDI mass spectrometry profiling. *Analyst*, 137(20), 4686–4692. <https://doi.org/10.1039/C2AN35722D>
7. Ahmed B, Mahfouz M, Elhak E, Fatah A, Kuhn M, Merkl B. Fingerprint-Based Gender Classification. *Proceedings of the International conference on Image Processing Computer Vision and Pattern Recognition (IPCV'06)*, 345-349.
8. Gnanasivam P, Muttan S. Fingerprint Gender Classification Using Wavelet Transform and Singular Value Decomposition. *International Journal of Computer Science Issues*, 9(2), No 3, 274-282.
9. Legrá R. Metodología para la determinación químico criminalística del sexo a partir de huellas dérmicas. [tesis doctoral], Ministerio del Interior; 2020
10. Ramotowski R. Composition of latent print residue. In Lee, H. C., *Advances in fingerprint technology*", 2001, 2nd edn. CRC Press, Boca Raton.
11. Hartzell-Baguley B, Hipp R, Morgan N, Morgan S. Chemical composition of latent fingerprints by gas chromatography-mass spectrometry. *Journal of Chemical Education*, 84(4), 689-695. <https://doi.org/10.1021/ed084p689>
12. Huynh C, Brunelle E, Halámková L, Agudelo J, Halamek J. Forensic Identification of Gender from Fingerprints. *Journal of Analytical Chemistry*, 87(22), 11531–11536. <https://doi.org/10.1021/acs.analchem.5b03323>
13. Halamek J, Huynh C, Halámková E. Gender Determination from Latent Fingerprin Analytical Chemistry, 88(4), 2413–2420. <https://doi.org/10.1021/acs.analchem.5b04518> |