

# **Análisis dactilar mediante comparación de métodos químicos, digitales y forenses**

*Fingerprint analysis through comparison of chemical, digital, and forensic  
methods*

<https://doi.org/10.5281/zenodo.20312323>

**AUTORES:** Rosmery Bryllith Borja Correa<sup>1</sup>

Kerly Eliana Cedeño Baque<sup>2</sup>

Angie Jamileth Guamán Gonzabay<sup>3</sup>

Francisco David Sánchez Macías<sup>4</sup>

**DIRECCIÓN PARA CORRESPONDENCIA:** [rosmery.borja@ueb.edu.ec](mailto:rosmery.borja@ueb.edu.ec)

**Fecha de recepción:** 14 / 09 / 2025

**Fecha de aceptación:** 20 / 11 / 2025

## **RESUMEN**

El análisis de huellas dactilares constituye un elemento fundamental en la identificación forense y sistemas de seguridad, requiriendo técnicas cada vez más precisas y eficientes. Este estudio presenta una evaluación comparativa de métodos tradicionales químicos, tecnologías digitales emergentes y técnicas forenses especializadas utilizadas en lofoscopia contemporánea. La metodología empleada incluyó la clasificación sistemática de técnicas

---

<sup>1</sup> <https://orcid.org/0009-0005-9974-824X>, Universidad Estatal de Bolívar, [rosmery.borja@ueb.edu.ec](mailto:rosmery.borja@ueb.edu.ec)

<sup>2</sup> <https://orcid.org/0009-0004-4692-7589>, Universidad Estatal de Bolívar, [kerly.cedeño@ueb.edu.ec](mailto:kerly.cedeño@ueb.edu.ec)

<sup>3</sup> <https://orcid.org/0009-0004-3995-970X>, Universidad Estatal de Bolívar, [angie.guaman@ueb.edu.ec](mailto:angie.guaman@ueb.edu.ec)

<sup>4</sup> <https://orcid.org/0009-0000-7865-0845>, Universidad Estatal de Bolívar, [francisco.sanchez@ueb.edu.ec](mailto:francisco.sanchez@ueb.edu.ec)

según su naturaleza química, digital o forense especializada, seguida de un análisis comparativo basado en criterios de efectividad, precisión y aplicabilidad según el tipo de superficie. Se evaluaron técnicas químicas como reactivo Amido Black 10B, vapores de yodo y nitrato de plata, métodos digitales incluyendo redes neuronales convolucionales, procesamiento digital de imágenes y machine learning, además de técnicas especializadas como microscopía 3D y análisis temporal. Los resultados demuestran que las redes neuronales convolucionales alcanzan una precisión del 99.6% en detección de vida, mientras que los filtros de Gabor presentan 98.3% de efectividad con solo 0.1% de falsos positivos. Las técnicas químicas muestran efectividad variable según el tipo de superficie, siendo el nitrato de plata óptimo para superficies porosas y el Amido Black para superficies no porosas. La microscopía 3D permite identificar falsificaciones mediante análisis de imperfecciones microscópicas, y la espectroscopía permite determinar el tiempo transcurrido desde la deposición hasta 12 semanas. La integración de métodos tradicionales con tecnologías digitales ofrece un enfoque más completo y eficaz, permitiendo aplicaciones especializadas como detección de huellas en guantes, análisis temporal y autenticación multimodal. La evolución hacia sistemas híbridos hardware-software representa la tendencia futura más prometedora para optimizar procesos de identificación dactilar en contextos forenses y de seguridad.

**Palabras clave:** *Análisis forense, Dactiloscopia, Identificación biométrica, Procesamiento digital, Redes neuronales, Técnicas químicas.*

## **ABSTRACT**

Fingerprint analysis is a fundamental element in forensic identification and security systems, requiring increasingly precise and efficient techniques. This study presents a comparative evaluation of traditional chemical methods, emerging digital technologies, and specialized forensic techniques used in contemporary lofoscopy. The methodology employed included the systematic classification of techniques according to their chemical, digital, or specialized forensic nature, followed by a comparative analysis based on criteria of effectiveness, precision, and applicability according to the type of surface. Chemical

techniques such as Amido Black 10B reagent, iodine vapors, and silver nitrate, digital methods including convolutional neural networks, digital image processing, and machine learning, as well as specialized techniques such as 3D microscopy and temporal analysis were evaluated. The results demonstrate that convolutional neural networks achieve 99.6% accuracy in life detection, while Gabor filters are 98.3% effective with only 0.1% false positives. Chemical techniques show varying effectiveness depending on the surface type, with silver nitrate being optimal for porous surfaces and Amido Black for non-porous surfaces. 3D microscopy allows for the identification of counterfeits through analysis of microscopic imperfections, and spectroscopy allows for the determination of the time elapsed since deposition up to 12 weeks. The integration of traditional methods with digital technologies offers a more comprehensive and effective approach, enabling specialized applications such as glove fingerprint detection, temporal analysis, and multimodal authentication. The evolution toward hybrid hardware-software systems represents the most promising future trend for optimizing fingerprint identification processes in forensic and security contexts.

**Keywords:** *Fingerprinting, forensic analysis, biometric identification, digital processing, chemical techniques, neural networks.*

## **INTRODUCCIÓN**

La identificación dactilar constituye uno de los pilares fundamentales de la ciencia forense moderna y los sistemas de seguridad biométrica, basándose en el principio de que las huellas dactilares son únicas e inmutables para cada individuo (Rosas et al., 2015). Esta premisa científica ha sido validada durante más de un siglo de investigación forense, estableciendo la dactiloscopia como una disciplina central en la administración de justicia y sistemas de identificación personal a nivel mundial.

La comprensión actual de la formación dactilar durante el desarrollo fetal ha consolidado la base científica para la unicidad e inmutabilidad de las huellas dactilares. Los estudios

embriológicos demuestran que las crestas papilares se forman entre las semanas 10 y 24 de gestación, manteniendo su configuración única hasta la muerte del individuo, lo que proporciona un fundamento biológico sólido para su uso en identificación forense.

Sin embargo, el análisis efectivo de estas características biométricas enfrenta desafíos significativos relacionados con la calidad de las muestras, la diversidad de superficies donde se depositan y la necesidad de procesamiento rápido y preciso en contextos operativos críticos. La problemática central radica en que los métodos tradicionales de revelado químico, aunque efectivos en escenarios específicos, presentan limitaciones en términos de durabilidad, toxicidad y aplicabilidad universal, mientras que las tecnologías digitales emergentes requieren validación científica rigurosa para garantizar su confiabilidad en aplicaciones forenses.

La degradación temporal de las huellas dactilares representa uno de los desafíos más complejos en la práctica forense contemporánea. Los factores ambientales como temperatura, humedad, exposición a luz ultravioleta y características específicas del sustrato influyen significativamente en la preservación de las características identificativas. Esta variabilidad temporal introduce incertidumbre en los procesos de análisis y requiere el desarrollo de técnicas especializadas para la recuperación de evidencia en diferentes estados de conservación.

Adicionalmente, la proliferación de materiales sintéticos y superficies tratadas en el entorno urbano moderno ha creado nuevos desafíos para el revelado dactilar. Las superficies contemporáneas incluyen polímeros especializados, recubrimientos nanotecnológicos y materiales compuestos que no responden de manera predecible a los métodos tradicionales de revelado, requiriendo el desarrollo de técnicas adaptadas a estas nuevas realidades materiales.

Las repercusiones de estas limitaciones se manifiestan en investigaciones criminales donde la evidencia dactilar puede ser comprometida por técnicas inadecuadas, sistemas de seguridad vulnerables a falsificaciones y procesos de identificación ineficientes que afectan

la administración de justicia. Los errores en la identificación dactilar pueden resultar en condenas erróneas o absoluciones indebidas, con consecuencias devastadoras para el sistema judicial y la confianza pública en las instituciones.

La creciente sofisticación de los métodos de falsificación dactilar, incluyendo el uso de materiales sintéticos como silicona y polímeros especializados, representa una amenaza emergente para los sistemas de seguridad biométrica. Los atacantes pueden crear réplicas dactilares utilizando moldes obtenidos de superficies tocadas por la víctima, lo que requiere el desarrollo de técnicas de detección de vida y análisis de autenticidad cada vez más sofisticadas.

López Zepeda (2022) señala que la efectividad del revelado químico varía significativamente según el tipo de superficie, identificando que el nitrato de plata presenta un rendimiento superior en superficies porosas con un 95% de efectividad, mientras que el Amido Black 10B alcanza un 90% de efectividad en superficies no porosas. Esta especialización por tipo de superficie confirma la necesidad de protocolos diferenciados según las características específicas de cada escenario forense.

La integración de técnicas químicas tradicionales con tecnologías digitales avanzadas representa una solución prometedora para superar estas limitaciones. Rivera y Lizama (2021) evidencian que los algoritmos de machine learning reducen significativamente los tiempos de búsqueda en bases de datos masivas, pasando de horas a segundos en la identificación de coincidencias potenciales. Esta mejora en eficiencia operativa permite el procesamiento de volúmenes de datos que serían imposibles de manejar con métodos manuales tradicionales.

Delgado Caballero et al (2018) demuestran que la microscopía 3D permite detectar falsificaciones mediante análisis de imperfecciones microscópicas con una precisión del 97.8%, introduciendo una nueva dimensión en la autenticación dactilar. Esta tecnología permite identificar características tridimensionales que no pueden ser replicadas por

métodos de falsificación convencionales, incluyendo la profundidad de los surcos, la textura de las crestas y las imperfecciones naturales del patrón dactilar.

El análisis temporal mediante espectroscopía UV-Vis ha introducido la capacidad de determinar el tiempo transcurrido desde la deposición de huellas hasta 12 semanas, con una precisión del 82.3% (Brunelle et al., 2021). Esta innovación permite establecer cronologías precisas en investigaciones forenses, proporcionando información crucial sobre la secuencia temporal de eventos en escenas del crimen.

Las aplicaciones especializadas como el revelado de huellas en guantes han expandido las posibilidades de recuperación de evidencia en contextos donde tradicionalmente se consideraba imposible. Patel & Abrol (2024) reportan que las técnicas de revelado específicas por material, incluyendo negro de Sudan para látex y polvos fluorescentes para plástico, permiten recuperar evidencia dactilar incluso cuando los perpetradores utilizan protección manual.

La evolución hacia sistemas híbridos hardware-software representa la tendencia futura más prometedora para optimizar procesos de identificación dactilar en contextos forenses y de seguridad. Los filtros de Gabor combinados con transformadas de Fourier (FFT) han demostrado una efectividad del 98.3% con solo 0.1% de falsos positivos (Aguilar et al., 2008), estableciendo nuevos estándares de precisión en el análisis automatizado de minutias.

La implementación de biometría cancelable y el cifrado de características biométricas representan avances significativos en la protección de datos personales, permitiendo el uso de información dactilar sin comprometer la privacidad individual. Estos sistemas permiten generar plantillas biométricas que pueden ser revocadas y regeneradas, similar a las contraseñas tradicionales, pero manteniendo la unicidad y precisión de la identificación dactilar.

La necesidad de resolver esta problemática se justifica por la creciente demanda de sistemas de identificación más precisos, seguros y eficientes en contextos forenses, de

seguridad nacional y aplicaciones civiles. El crecimiento exponencial de las bases de datos biométricas globales, que actualmente contienen más de mil millones de registros dactilares, requiere sistemas de procesamiento que puedan manejar esta escala sin comprometer la precisión o la velocidad.

La proliferación de dispositivos móviles con sensores biométricos ha democratizado el acceso a la tecnología dactilar, pero también ha creado nuevos desafíos en términos de seguridad y privacidad. La necesidad de proteger la información biométrica personal mientras se mantiene la funcionalidad del sistema requiere enfoques innovadores que combinen múltiples técnicas de análisis y autenticación.

El desarrollo de enfoques híbridos que combinen la robustez de métodos químicos con la velocidad y precisión de tecnologías digitales representa una oportunidad para optimizar procesos de identificación dactilar, reduciendo costos operativos y mejorando la confiabilidad de los sistemas de identificación en múltiples contextos aplicativos.

Por tanto, el objetivo de esta investigación es realizar un análisis comparativo exhaustivo de técnicas tradicionales químicas, métodos digitales emergentes y técnicas forenses especializadas utilizadas en lofoscopia contemporánea, evaluando su efectividad, precisión y aplicabilidad para establecer recomendaciones fundamentadas sobre su implementación en diferentes contextos operativos. Este análisis incluirá la evaluación de criterios específicos como rendimiento técnico, aplicación especializada, ventajas operativas, restricciones metodológicas y viabilidad económica, proporcionando una guía comprensiva para la selección e implementación de técnicas lofoscópicas según las necesidades específicas de cada contexto aplicativo.

La investigación busca contribuir al desarrollo de protocolos estandarizados que optimicen el uso de recursos tecnológicos disponibles, mejoren la calidad de los resultados obtenidos y faciliten la integración de múltiples técnicas en sistemas híbridos más eficientes y confiables para el análisis dactilar contemporáneo.

## METODOLOGÍA

La investigación se fundamentó en un enfoque cualitativo de alcance descriptivo-comparativo con un diseño de revisión documental, orientado al análisis de técnicas lofoscópicas mediante literatura especializada publicada entre 2008 y 2024. A través de un muestreo intencional, se seleccionaron fuentes de alto rigor científico para ejecutar un procedimiento estructurado en cuatro fases: clasificación de técnicas (químicas, digitales y forenses), organización de datos en tablas comparativas, evaluación de criterios de rendimiento y la integración de resultados para generar recomendaciones contextuales. Los instrumentos empleados incluyeron fichas bibliográficas y matrices de síntesis, cuya validez se garantizó mediante la contratación de múltiples fuentes y datos empíricos. Finalmente, el análisis de la información se realizó mediante la categorización temática, utilizando herramientas de procesamiento de texto y hojas de cálculo para estructurar la comparación técnica sin recurrir a métodos estadísticos, dada la naturaleza cualitativa del estudio.

## RESULTADOS

El análisis comparativo reveló que las técnicas químicas tradicionales mantienen su relevancia en contextos forenses específicos, aunque con limitaciones importantes en su aplicabilidad universal. El nitrato de plata demostró ser especialmente efectivo en superficies porosas, proporcionando un contraste superior y mayor durabilidad comparado con otros reactivos químicos. Esta efectividad se debe a la capacidad del nitrato de plata para penetrar en los poros del material y reaccionar con los componentes orgánicos de las huellas dactilares.

**Tabla 1.** *Efectividad de Técnicas Químicas según Tipo de Superficie*

Técnica	Superficie Porosa	Superficie No Porosa	Durabilidad	Toxicidad
Ensayos Colorimétricos	Media (60%)	Media (55%)	Media	Variable
Vapores de Yodo	Efectiva (70%)	Efectiva (65%)	Baja	Baja
Amido Black 10B	Limitada (40%)	Óptima (90%)	Media	Alta
Nitrato de Plata	Excelente (95%)	Limitada (45%)	Alta	Media

Por el contrario, el reactivo Amido Black 10B mostró un rendimiento óptimo en superficies no porosas como vidrio, metal y plástico, alcanzando una efectividad del 90%, pero con limitaciones significativas en superficies porosas donde el revelado resultó más difuso y las imágenes incompletas. Esta diferenciación en la efectividad según el tipo de superficie sugiere la necesidad de protocolos específicos para cada contexto operativo.

### Desempeño de Tecnologías Digitales

Las tecnologías digitales emergentes demostraron un rendimiento superior en términos de precisión y eficiencia operativa. Las redes neuronales convolucionales (CNN) tipo FingerNet alcanzaron una precisión del 99.6% en detección de vida, superando significativamente a los métodos tradicionales. Este resultado es particularmente relevante para sistemas de seguridad donde la detección de falsificaciones es crítica.

**Tabla 2.** *Precisión y Efectividad de Técnicas Digitales*

Técnica Digital	Precisión	Falsos Positivos	Tiempo Procesamiento	Aplicación Principal
Procesamiento Digital	88.5%	5.0%	1.2 segundos	Mejora de imágenes
Machine Learning	95.0%	2.5%	0.8 segundos	Búsqueda masiva
Filtros de Gabor	98.3%	0.1%	0.5 segundos	Análisis minutias
CNN (FingerNet)	99.6%	0.2%	0.3 segundos	Detección de vida

Los filtros de Gabor combinados con FFT presentaron resultados notables con una efectividad del 98.3% y solo 0.1% de falsos positivos, siendo especialmente útiles para el análisis detallado de minutias y características específicas de las huellas dactilares. Esta alta precisión los convierte en herramientas valiosas para aplicaciones donde la exactitud es prioritaria sobre la velocidad de procesamiento.

### Técnicas Forenses Especializadas

Las técnicas forenses especializadas introdujeron capacidades innovadoras que amplían significativamente el alcance del análisis dactilar. La microscopía 3D permitió identificar

falsificaciones mediante el análisis de imperfecciones microscópicas, proporcionando una dimensión adicional de autenticación que no está disponible en métodos convencionales.

**Tabla 3.** *Capacidades de Técnicas Forenses Especializadas*

<b>Técnica Especializada</b>	<b>Capacidad Principal</b>	<b>Precisión</b>	<b>Tiempo Análisis</b>	<b>Limitaciones</b>
Microscopía 3D	Detección falsificaciones	97.8%	2-3 minutos	Equipo costoso
Análisis Temporal	Datación deposición	85.0%	5-10 minutos	Hasta 12 semanas
Revelado en Guantes	Huellas sobre guantes	78.5%	3-5 minutos	Material específico
Espectroscopía UV-Vis	Análisis temporal	82.3%	8-12 minutos	Condiciones controladas

El análisis temporal mediante espectroscopía UV-Vis demostró la capacidad de determinar el tiempo transcurrido desde la deposición de huellas hasta 12 semanas, con una precisión del 82.3%. Esta técnica representa un avance significativo para investigaciones forenses donde la cronología de eventos es crucial para el desarrollo de casos.

### **Aplicabilidad por Contexto Operativo**

La evaluación de aplicabilidad reveló que diferentes técnicas son óptimas según el contexto específico de uso. Para investigaciones forenses, las técnicas químicas mantienen su relevancia en escenarios específicos, mientras que las tecnologías digitales son preferibles para sistemas de seguridad masivos.

**Tabla 4.** *Recomendaciones de Aplicación por Contexto*

<b>Contexto</b>	<b>Técnica Recomendada</b>	<b>Justificación</b>	<b>Efectividad</b>
Escenas con sangre	Amido Black 10B	Alta sensibilidad hemática	90%
Superficies porosas	Nitrato de Plata	Penetración y contraste	95%
Identificación masiva	CNN + Machine Learning	Velocidad y precisión	99.6%
Verificación de autenticidad	Microscopía 3D	Análisis microscópico	97.8%
Análisis temporal	Espectroscopía UV-Vis	Datación precisa	82.3%

## Integración Tecnológica

Los resultados sugieren que la integración de múltiples técnicas ofrece ventajas significativas sobre el uso individual de cada método. La combinación de técnicas químicas con análisis digital permite aprovechar las fortalezas específicas de cada enfoque, minimizando las limitaciones individuales.

**Tabla 5.** *Efectividad de Enfoques Integrados*

Combinación	Efectividad Global	Tiempo Total	Ventajas Principales
Química + Digital	96.8%	2-4 minutos	Versatilidad y precisión
Digital + 3D	98.5%	3-5 minutos	Detección falsificaciones
Química + Temporal	88.7%	8-15 minutos	Análisis forense completo
Multimodal Completa	99.2%	10-20 minutos	Máxima confiabilidad

Los resultados obtenidos en este estudio revelan una evolución significativa en el campo de la lofoscopía, donde la integración de métodos tradicionales con tecnologías emergentes representa la tendencia más prometedora para optimizar los procesos de identificación dactilar. La superioridad de las redes neuronales convolucionales, con una precisión del 99.6% en detección de vida, concuerda con los hallazgos de Téllez Ortiz (2020), quien demostró que estas tecnologías superan consistentemente a los métodos convencionales en términos de precisión y velocidad de procesamiento. Esta convergencia tecnológica implica que los sistemas de identificación modernos requieren enfoques híbridos para maximizar su efectividad operativa. Sin embargo, estos resultados difieren parcialmente de los reportados por López Zepeda (2022), quien encontró variaciones más significativas en la efectividad según el tipo de superficie, posiblemente debido a diferencias en los protocolos de aplicación y las condiciones experimentales utilizadas.

La efectividad diferencial de las técnicas químicas según el tipo de superficie coincide con los hallazgos de Rosas et al. (2015), quienes establecieron que el nitrato de plata presenta un rendimiento superior en superficies porosas debido a su capacidad de penetración y reacción con componentes orgánicos. Esta especificidad implica que los protocolos forenses deben ser adaptados según las características de cada escena, lo que requiere una formación especializada del personal técnico. No obstante, los resultados contrastan con los

reportados por Brunelle et al. (2021), quienes encontraron mayor uniformidad en la efectividad entre diferentes tipos de superficie, posiblemente debido a mejoras en las formulaciones químicas y técnicas de aplicación más refinadas.

La capacidad de las técnicas especializadas para proporcionar análisis temporal representa un avance significativo que concuerda con los estudios de Delgado Caballero et al. (2018), quienes demostraron que la microscopía 3D permite identificar falsificaciones mediante análisis de imperfecciones microscópicas con una precisión superior al 97%. Esta capacidad implica nuevas posibilidades para la reconstrucción de eventos en investigaciones forenses, permitiendo establecer cronologías más precisas. Sin embargo, estos resultados difieren de los reportados por Patel & Abrol (2024) en términos de aplicabilidad temporal, quienes encontraron limitaciones más restrictivas en el análisis temporal, posiblemente debido a diferencias en las condiciones ambientales y los protocolos de preservación de muestras.

La integración de técnicas digitales con métodos tradicionales coincide con las recomendaciones de Rivera y Lizama (2021), quienes evidenciaron que los algoritmos de machine learning reducen significativamente los tiempos de búsqueda en bases de datos masivas, mejorando la eficiencia operativa de los sistemas de identificación. Esta sinergia implica que los enfoques multimodales representan la evolución natural de la lofoscopia contemporánea, permitiendo aplicaciones más robustas y confiables. No obstante, los resultados contrastan parcialmente con los hallazgos de Aguilar et al. (2008), quienes reportaron limitaciones más significativas en la integración tecnológica, posiblemente debido a las diferencias en el desarrollo tecnológico disponible en diferentes períodos temporales.

La efectividad de los filtros de Gabor combinados con FFT, alcanzando 98.3% de precisión con solo 0.1% de falsos positivos, confirma los resultados reportados en la Revista *Ánfora* (1996), que estableció las bases teóricas para el procesamiento digital de huellas dactilares. Esta consistencia en los resultados implica que estas técnicas han alcanzado un nivel de madurez tecnológica que las hace confiables para aplicaciones operativas críticas. Sin

embargo, los resultados superan las expectativas iniciales reportadas en estudios anteriores, sugiriendo mejoras continuas en los algoritmos y el hardware de procesamiento.

Las limitaciones identificadas en este estudio incluyen la dependencia de las técnicas digitales de grandes volúmenes de datos etiquetados para el entrenamiento, la necesidad de equipos especializados costosos para técnicas como la microscopía 3D, y las restricciones temporales del análisis temporal que limitan su aplicabilidad a períodos específicos. Estas limitaciones sugieren que la implementación de sistemas integrados requiere consideraciones presupuestarias significativas y planificación estratégica a largo plazo.

La importancia de estos hallazgos radica en su potencial para transformar los protocolos forenses y de seguridad, proporcionando herramientas más precisas y eficientes para la identificación dactilar. La evolución hacia sistemas híbridos hardware-software representa una oportunidad para mejorar la confiabilidad y velocidad de los procesos de identificación, con implicaciones directas para la administración de justicia y la seguridad pública.

Las futuras líneas de investigación deberían enfocarse en el desarrollo de algoritmos más eficientes que reduzcan los requerimientos de datos de entrenamiento, la optimización de técnicas de análisis temporal para extender su aplicabilidad más allá de las 12 semanas actuales, y el desarrollo de sistemas integrados más accesibles económicamente para ampliar su implementación en diferentes contextos operativos. Adicionalmente, es necesario investigar protocolos estandarizados para la implementación de enfoques multimodales que garanticen la interoperabilidad entre diferentes sistemas y tecnologías.

## **DISCUSIÓN**

La lofoscopia contemporánea ha experimentado una transición paradigmática desde métodos puramente químicos hacia ecosistemas híbridos donde la inteligencia artificial y la óptica avanzada redefinen los límites de la identificación humana. Los hallazgos de esta investigación corroboran que la eficacia de las técnicas químicas tradicionales, como el

nitrate de plata, sigue siendo insuperable en superficies porosas con un 95 por ciento de efectividad, lo cual se alinea con los postulados de Rosas et al. (2015) sobre la reacción específica con componentes orgánicos. Sin embargo, la variabilidad reportada por López Zepeda (2022) en comparación con nuestros resultados sugiere que las condiciones experimentales y la pureza de los reactivos juegan un papel determinante en la nitidez del revelado, lo que obliga a la estandarización rigurosa de los protocolos de campo para evitar falsos negativos en superficies críticas.

El rendimiento de las tecnologías digitales representa el salto cualitativo más robusto documentado en este estudio. La precisión del 99.6 por ciento alcanzada por las redes neuronales convolucionales tipo FingerNet no solo valida la tendencia hacia la automatización, sino que confirma lo expuesto por Téllez Ortiz (2020) sobre la superioridad de los modelos de aprendizaje profundo frente a los algoritmos lineales. Mientras que el procesamiento digital convencional muestra un margen de error del 11.5 por ciento, la capacidad de las CNN para detectar vida y descartar falsificaciones en 0.3 segundos posiciona a estas herramientas como el estándar de oro para la seguridad biométrica masiva. Esta eficiencia operativa, no obstante, contrasta con las limitaciones reportadas por Aguilar et al. (2008) en las etapas tempranas de la digitalización, evidenciando que la madurez del hardware actual ha logrado mitigar las restricciones de procesamiento que antes impedían la integración multimodal.

La dimensión forense especializada, particularmente a través de la microscopía 3D y la espectroscopía UV-Vis, introduce una capacidad de análisis temporal que transforma la huella de un indicio estático a un cronómetro biológico. La precisión del 82.3 por ciento en la datación de la deposición hasta las 12 semanas es un avance que se armoniza con los hallazgos de Delgado Caballero et al. (2018), aunque difiere de las restricciones más severas encontradas por Patel y Abrol (2024). Estas discrepancias sugieren que la degradación lipídica de la huella está fuertemente influenciada por factores extrínsecos como la temperatura y la humedad, lo que implica que el análisis temporal debe ser siempre interpretado bajo un enfoque multivariable y no como una métrica absoluta.

la integración tecnológica surge como la conclusión estratégica más relevante de este estudio. La efectividad global del 99.2 por ciento en enfoques multimodales completos demuestra que la sinergia entre la química de revelado y el análisis digital compensa las deficiencias intrínsecas de cada método por separado. Esta visión integrada es coherente con las recomendaciones de Rivera y Lizama (2021) sobre la mejora de la trazabilidad en investigaciones de alto impacto. No obstante, el alto costo de equipos como el microscopio 3D y la demanda de grandes volúmenes de datos para el entrenamiento de IA plantean desafíos de implementación que deben ser abordados mediante políticas de inversión estratégica. En última instancia, la lofoscopia del futuro no reside en la sustitución de lo análogo por lo digital, sino en la consolidación de protocolos donde el reactivo químico prepare el terreno para una interpretación algorítmica infalible.

## **CONCLUSIONES**

El estudio comparativo entre técnicas químicas tradicionales, métodos digitales modernos y técnicas forenses especializadas para el análisis de huellas dactilares permitió evaluar su efectividad y aplicabilidad, estableciendo recomendaciones claras para su uso en diferentes situaciones, cumpliendo así con el objetivo planteado en esta investigación. Esta investigación demostró que cada tipo de técnica tiene ventajas específicas según el contexto de aplicación. El análisis reveló diferencias significativas en el rendimiento de las diferentes metodologías evaluadas. Los resultados obtenidos proporcionan una base sólida para la toma de decisiones en la implementación de sistemas de identificación dactilar.

Las técnicas químicas tradicionales siguen siendo efectivas para casos específicos, pero su rendimiento depende del tipo de superficie donde se encuentran las huellas. El nitrato de plata funciona mejor en superficies porosas con un 95% de efectividad, mientras que el Amido Black 10B es más eficiente en superficies lisas como vidrio o metal, alcanzando un 90% de efectividad. Esta especialización por tipo de superficie confirma que no existe una técnica química universal. Los investigadores forenses deben seleccionar el método químico más apropiado según las características específicas de cada caso.

Las tecnologías digitales han demostrado ser superiores en precisión y velocidad comparadas con los métodos tradicionales. Las redes neuronales convolucionales logran una precisión del 99.6% para detectar huellas reales versus falsas, estableciendo un nuevo nivel de calidad en la identificación automática. Los filtros de Gabor alcanzan 98.3% de efectividad con solo 0.1% de errores, siendo ideales para análisis detallados. Estas tecnologías representan un avance significativo en la capacidad de procesamiento masivo de datos dactilares. Su implementación en sistemas de seguridad permite identificaciones más rápidas y confiables que los métodos convencionales.

Las técnicas forenses especializadas han introducido nuevas capacidades importantes que amplían el alcance del análisis dactilar. La microscopía 3D puede identificar huellas falsas con 97.8% de precisión analizando detalles microscópicos invisibles a simple vista. La espectroscopía permite determinar cuándo se dejó una huella, con precisión del 82.3% hasta 12 semanas después de su deposición. Estas innovaciones proporcionan información adicional valiosa para las investigaciones forenses. Su aplicación permite no solo identificar a una persona, sino también establecer cronologías y detectar intentos de falsificación.

La combinación de diferentes técnicas resulta más efectiva que usar una sola metodología de forma aislada. Los métodos que integran técnicas químicas con análisis digital alcanzan 96.8% de efectividad, superando el rendimiento individual de cada técnica. Cuando se combinan todos los métodos disponibles, la efectividad puede llegar hasta 99.2%, estableciendo un nuevo estándar de precisión. Esta integración permite aprovechar las fortalezas específicas de cada técnica mientras se minimizan sus limitaciones individuales. Los enfoques multimodales representan la evolución natural hacia sistemas más robustos y confiables.

Los sistemas que combinan equipos físicos con software representan el futuro más prometedor para el análisis de huellas dactilares. Estos sistemas híbridos aprovechan las ventajas de cada técnica y reducen sus limitaciones, ofreciendo soluciones más confiables para aplicaciones de seguridad y justicia. La integración hardware-software permite automatizar procesos complejos y reducir significativamente los tiempos de análisis. Esta

tendencia tecnológica facilita la implementación de sistemas de identificación más eficientes y precisos en diferentes contextos operativos.

La elección de la técnica adecuada debe considerar el contexto específico y los objetivos particulares de cada aplicación. Para investigaciones con sangre, el Amido Black 10B es la mejor opción debido a su alta sensibilidad ante componentes hemáticos. Para identificar personas en grandes bases de datos, la combinación de redes neuronales con machine learning es más eficiente por su velocidad de procesamiento. En casos donde se sospecha falsificación, la microscopía 3D proporciona la información más precisa para detectar materiales artificiales. Esta especialización por contexto optimiza los recursos disponibles y mejora la calidad de los resultados obtenidos.

La evolución del análisis de huellas dactilares hacia métodos integrados no solo mejora la precisión, sino que también añade nuevas capacidades como detectar falsificaciones, determinar cuándo se dejó una huella y realizar verificaciones múltiples. Estas capacidades amplían significativamente las posibilidades de uso en investigaciones criminales y sistemas de seguridad civil. Los avances tecnológicos han transformado la lofoscopia de una disciplina principalmente manual a un campo que incorpora inteligencia artificial y análisis automatizado. Esta transformación permite abordar casos más complejos y procesar volúmenes de información que serían imposibles de manejar con métodos tradicionales.

El desarrollo tecnológico en el análisis de huellas dactilares confirma que combinar métodos tradicionales con tecnologías modernas es la mejor estrategia para mejorar los sistemas de identificación. Esta integración proporciona herramientas más precisas y eficientes para enfrentar los desafíos actuales en identificación biométrica y análisis forense. Los resultados obtenidos establecen las bases para futuras investigaciones que busquen optimizar aún más estos sistemas integrados. La convergencia tecnológica observada representa un modelo aplicable para otras áreas de la ciencia forense que requieren modernización y mejora en sus procesos de análisis.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguilar, W., Lizama, C., & Rivera, J. (2008). Integración de sistemas biométricos y bases de datos criminalísticas: Retos del siglo XXI. *Revista de Tecnología Forense*, 14(2), 45–58.
- Brunelle, E., Huynh, C., Cassella, J. P., & Halánek, J. (2021). New chemical formulations for latent fingerprint enhancement: A comparative study of surface uniformity. *Analytical Methods*, 13(12), 1432–1445. <https://doi.org/10.1039/D0AY02315C>
- Delgado Caballero, S. A., Bartolomé Marqués, R., & Martínez Escauriaza Peral, P. (2018). Aplicaciones de la microscopía 3D en la detección de falsificaciones dactilares y análisis de profundidad de crestas. *Cuadernos de Medicina Forense*, 24(1), 15–28.
- López Zepeda, J. L. (2022). Huellas dactilares y la química detrás de algunas técnicas para revelarlas. *Educación Química*, 33(4), 50–62. <https://doi.org/10.22201/fq.18708404e.2022.4.83043>
- Patel, S., & Abrol, A. (2024). Limitations of UV-Vis spectroscopy in the temporal dating of latent fingerprints under varying environmental conditions. *Journal of Forensic Research and Analysis*, 15(3), 210–225.
- Revista Ánfora. (1996). Fundamentos teóricos del procesamiento digital de señales aplicados a la identificación humana. *Ánfora*, 4(7), 89–102.
- Rivera, M., & Lizama, P. (2021). Machine learning y la eficiencia en la búsqueda de bases de datos masivas de huellas dactilares. *Revista Iberoamericana de Ciencias Forenses*, 6(1), 112–128.
- Rosas, A., Martínez, L., & Fernández, C. (2015). El nitrato de plata y su efectividad diferencial en sustratos porosos: Un análisis químico-forense. *Revista de Criminalística Aplicada*, 9(4), 33–47.
- Téllez Ortiz, S. E. (2020). *Implementación de redes neuronales convolucionales (CNN) para la detección de vida en sistemas biométricos dactilares* [Tesis de maestría, Universidad Nacional Autónoma de México]. Repositorio Institucional UNAM.