

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR

FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS, NATURALES Y AMBIENTALES

QUÍMICA

Nombre del estudiante: Carolina Alejandra Hinojosa Gómez

Nombre del director de la disertación: Katherine Rocío Vaca Escobar

Título de monografía: Polvos ecológicos derivados de cáscaras cítricas para la revelación de huellas dactilares.

Área en la que se inscribe la investigación: Química Forense y Sostenibilidad Ambiental

Quito, 2026

CERTIFICACIÓN

Certifico que la Monografía de la carrera de Química, de la Srta. Carolina Alejandra Hinojosa Gómez ha sido concluida de conformidad con las normas establecidas; por lo tanto, puede ser presentada para la calificación correspondiente.

Validar únicamente en FirmaEC.
Firmado electrónicamente por:
KATHERINE ROCIO
VACA ESCOBAR

Firma del tutor de la monografía

Katherine Rocío Vaca Escobar

Quito, 12 de junio de 2026

DEDICATORIA

Dedico esta monografía, especialmente, a mi mamá, por ser mi mayor apoyo en cada etapa de mi vida. Gracias por creer en mí incluso cuando yo dudaba, por darme siempre las mejores oportunidades de estudio y por acompañarme con amor y esfuerzo en cada decisión, incluyendo mi cambio de carrera de Derecho a Química. Gracias por cada sacrificio, por ayudarme con mis estudios y por nunca rendirte conmigo a pesar de las dificultades.

A mi abuelito, que en paz descanse, y a mi abuelita, por su amor, consejos y apoyo constante durante mi formación académica y personal.

También a mi tío Juan y a mi tía Irma, quienes me brindaron su apoyo durante una importante experiencia universitaria en Brasil.

Este logro no habría sido posible sin cada una de las personas que confiaron en mí y me motivaron a seguir adelante.

Tabla de contenido

1. RESUMEN 1

2. ABSTRACT 2

3. INTRODUCCIÓN 3

4. OBJETIVOS 6

5. MARCO TEORICO 7

5.1 HUELLAS DACTILARES Y SU IMPORTANCIA EN LA IDENTIFICACIÓN FORENSE 7

5.2 MÉTODOS TRADICIONALES PARA LA REVELACIÓN DE HUELLAS DACTILARES CON POLVOS 8

5.3. QUÍMICA VERDE Y SOSTENIBILIDAD EN LAS CIENCIAS FORENSES 9

5.3.1 SOSTENIBILIDAD 9

5.3.2 REDUCCIÓN DE TOXICIDAD 9

5.3.3 MATERIALES BIODEGRADABLES 10

5.3.4 POTENCIAL DE LAS CÁSCARAS CÍTRICAS COMO MATERIAL ECOLÓGICO PARA APLICACIONES FORENSES 10

5.4 BIODIVERSIDAD Y PRODUCCIÓN DE CÍTRICOS EN ECUADOR 11

5.5 VENTAJAS AMBIENTALES Y ECONÓMICAS 13

5.5.1 APLICACIÓN EN LA REVELACIÓN DE HUELLAS DACTILARES LATENTES 14

5.5.2 POTENCIAL PARA IMPULSAR INVESTIGACIONES FORENSES SOSTENIBLES EN ECUADOR 15

5.5.3 USO DE POLVOS NATURALES Y ALTERNATIVOS PARA LA REVELACIÓN DE HUELLAS DACTILARES 17

5.6 VENTAJAS DE LOS POLVOS ECOLÓGICOS FRENTE A LOS POLVOS TRADICIONALES 19

5.6.1 LIMITACIONES DE LOS POLVOS TRADICIONALES EN LA REVELACIÓN DE HUELLAS DACTILARES 20

5.7 CLASIFICACIÓN DE LOS POLVOS UTILIZADOS EN LA REVELACIÓN DE HUELLAS DACTILARES 21

5.8 PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS RELEVANTES 22

5.8.1 ADHESIÓN 22

5.8.2 GRANULOMETRÍA 23

5.8.3 CONTRASTE 25

5.8.4 COLOR 27

5.8.5 SUPERFICIE 29

5.8.6 MORFOLOGÍA DE PARTÍCULAS 31

5.8.7 HIDROFOBICIDAD E HIDROFILICIDAD 33

5.8.8 INTERACCIÓN CON LOS LÍPIDOS DEL SUDOR 35

5.8.9 APLICACIÓN SOBRE SUPERFICIES NO POROSAS 36

5.9 COMPARACIÓN ENTRE POLVOS TRADICIONALES Y ECOLÓGICOS 38

5.10 PERSPECTIVAS Y DESAFÍOS FUTUROS 40

5 CONCLUSIONES 43

6 RECOMENDACIONES 45

7 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 46

1. RESUMEN

La presente monografía analiza el potencial de las cáscaras cítricas como materia prima para la elaboración de polvos ecológicos destinados al revelado de huellas dactilares latentes. Para ello, se estudia la importancia de las huellas dactilares en la identificación criminalística, los principios de funcionamiento de los polvos reveladores convencionales y las limitaciones asociadas a su uso desde una perspectiva ambiental y de salud ocupacional. Asimismo, se revisan los fundamentos de la química verde y la sostenibilidad aplicados a las ciencias forenses, así como las características químicas y fisicoquímicas de las cáscaras cítricas que podrían favorecer su desempeño como agentes reveladores. El análisis se centra en determinar si propiedades como la adhesión, granulometría, color y composición de estos residuos agroindustriales podrían contribuir a la visualización de huellas latentes. Se concluye que las cáscaras cítricas poseen características que respaldan su potencial uso como polvos reveladores sostenibles, constituyendo una alternativa prometedora para el desarrollo de metodologías forenses más seguras y amigables con el medio ambiente.

Palabras clave: biodegradable, cáscaras cítricas, dactiloscopía, huellas dactilares, polvos ecológicos.

2. ABSTRACT

This monograph analyzes the potential of citrus peels as a raw material for the development of eco-friendly powders for latent fingerprint detection. To achieve this, the importance of fingerprints in forensic identification, the operating principles of conventional fingerprint powders, and the limitations associated with their use from environmental and occupational health perspectives are examined. In addition, the principles of green chemistry and sustainability in forensic science are reviewed, together with the chemical and physicochemical characteristics of citrus peels that may support their performance as fingerprint development agents. The analysis focuses on determining whether properties such as adhesion, particle size distribution, color, and composition of these agro-industrial residues could contribute to the visualization of latent fingerprints. It is concluded that citrus peels possess characteristics that support their potential use as sustainable fingerprint powders, representing a promising alternative for the development of safer and more environmentally friendly forensic methodologies

Keywords: biodegradable, citrus peels, eco-friendly powders, fingerprints, science, latent fingerprint development.

3. INTRODUCCIÓN

La identificación de personas mediante huellas dactilares constituye uno de los pilares fundamentales de las ciencias forenses, debido a que las crestas papilares presentan características únicas y permanentes que permiten una identificación confiable. Sin embargo, en la mayoría de los casos las huellas dactilares se encuentran en forma latente, es decir, no visibles a simple vista, lo que hace necesario el empleo de técnicas específicas para su revelación (Sodhi & Kaur, 2001).

Entre los métodos más utilizados para la visualización de huellas latentes se encuentra la técnica del espolvoreo, la cual consiste en la aplicación de polvos finos que se adhieren a los residuos dejados por el contacto de los dedos con distintas superficies. Tradicionalmente, estos polvos han sido de origen sintético y contienen compuestos químicos que, aunque efectivos, pueden representar riesgos para la salud del personal forense y generar impactos ambientales negativos cuando son utilizados de manera frecuente (Bleay et al., 2018; Mong et al., 2012).

En respuesta a estas limitaciones, diversas investigaciones han explorado el uso de materiales naturales y biodegradables como alternativas a los polvos convencionales. Estudios recientes han demostrado que polvos obtenidos a partir de fuentes vegetales poseen propiedades físicas adecuadas para la adhesión a las huellas dactilares latentes, logrando niveles de contraste y definición comparables a los métodos tradicionales (Bumbrah & Sharma, 2016; Ravindran & Philip, 2018). Estos hallazgos han impulsado el interés por el desarrollo de técnicas de revelado más seguras y alineadas con los principios de sostenibilidad.

Diversos estudios han evaluado materiales naturales como carbón vegetal, almidón, cúrcuma, café, cenizas vegetales y residuos agrícolas para la revelación de huellas dactilares latentes. Los resultados obtenidos indican que varios de estos materiales presentan una adecuada capacidad de adhesión a los residuos dactilares y permiten obtener niveles satisfactorios de

contraste y definición sobre superficies no porosas. Sin embargo, la mayoría de las investigaciones se han concentrado en materiales vegetales convencionales, existiendo aún información limitada sobre el uso específico de residuos cítricos procesados como polvos reveladores. Esta situación evidencia la necesidad de profundizar en el análisis de las propiedades fisicoquímicas de las cáscaras cítricas y su posible aplicación dentro del desarrollo de alternativas sostenibles para la identificación forense.

Asimismo, el enfoque de la química verde ha promovido la reducción del uso de sustancias tóxicas en los procesos científicos, incentivando el aprovechamiento de residuos orgánicos como materia prima para nuevas aplicaciones. En el ámbito forense, el uso de materiales de desecho ha sido propuesto como una estrategia viable para disminuir el impacto ambiental sin comprometer la eficacia técnica de los procedimientos (Houck, 2015; Sharma & Gupta, 2019).

Dentro de este marco, las cáscaras de cítricos representan un recurso abundante y subutilizado, caracterizado por su disponibilidad y por la presencia de compuestos naturales que pueden conferir propiedades funcionales a los materiales derivados de ellas. Investigaciones previas han evidenciado que los residuos cítricos pueden transformarse en productos de valor agregado, lo que respalda su potencial uso en diversas aplicaciones científicas (Mahato et al., 2018). No obstante, su aplicación específica en la revelación de huellas dactilares ha sido escasamente abordada, lo que evidencia un vacío en la literatura científica.

Aunque existen estudios que respaldan el uso de polvos naturales y alternativos para la visualización de huellas latentes, aún es necesario profundizar en el análisis de materiales que integren eficiencia forense y sostenibilidad ambiental. En particular, resulta pertinente evaluar el potencial de los polvos ecológicos elaborados a partir de cáscaras cítricas como una sost viable frente a los polvos forenses convencionales, considerando tanto su desempeño técnico como su

impacto ambiental (Kaur & Garg, 2015; Didierjean & Crispino, 2016).

Por lo tanto, la presente monografía se justifica en la necesidad de analizar, desde una perspectiva científica y ambiental, el uso de polvos ecológicos derivados de cáscaras cítricas para la revelación de huellas dactilares latentes. Este análisis permitirá aportar fundamentos teóricos que contribuyan al desarrollo de prácticas forenses más responsables, seguras y acordes con los principios de sostenibilidad que actualmente orientan la investigación científica.

4. OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL:

Evaluar el potencial de los polvos ecológicos elaborados a partir de cáscaras cítricas como una alternativa ambientalmente viable para la revelación de huellas dactilares latentes, en comparación con los polvos forenses convencionales.

OBJETIVO ESPECÍFICO:

Analizar las características físicas y funcionales de los polvos naturales utilizados en la revelación de huellas dactilares, con base en estudios científicos previos.

Examinar la evidencia científica disponible sobre la eficacia potencial de los polvos ecológicos derivados de cáscaras cítricas para la visualización de huellas dactilares latentes sobre superficies no porosas.

Comparar los polvos ecológicos de origen natural con los polvos forenses tradicionales en términos de desempeño técnico y seguridad en su aplicación.

Identificar los beneficios ambientales asociados al uso de residuos cítricos como materia prima en el desarrollo de técnicas de revelación de huellas dactilares.

5. MARCO TEORICO

Las huellas dactilares son marcas formadas por las crestas papilares que se encuentran en la yema de los dedos y que presentan características únicas en cada persona. Debido a que no existen dos huellas iguales y estas permanecen prácticamente inalterables a lo largo de la vida, se han convertido en una de las herramientas más utilizadas y confiables dentro de la identificación forense. De acuerdo con INTERPOL (2024), las huellas dactilares permiten identificar individuos mediante la comparación de sus puntos característicos, siendo fundamentales en investigaciones criminalísticas y sistemas modernos de identificación biométrica.

5.1 HUELLAS DACTILARES Y SU IMPORTANCIA EN LA IDENTIFICACIÓN FORENSE

Las huellas dactilares son consideradas una de las herramientas más importantes y confiables dentro de la identificación forense, ya que cada persona posee patrones únicos e irrepetibles en las crestas papilares de sus dedos. La dactiloscopía, rama de la biometría encargada de estudiar estas características, ha sido utilizada durante muchos años en investigaciones criminales debido a su precisión al momento de identificar individuos. De acuerdo con INTERPOL (2024), incluso los gemelos homocigóticos presentan huellas diferentes, además de que estas permanecen prácticamente inalterables durante toda la vida.

En las escenas del crimen, las huellas dactilares latentes representan una evidencia de gran valor, ya que permiten relacionar a una persona con un determinado lugar o hecho investigado. Gracias a los avances tecnológicos, actualmente existen sistemas automatizados como el Sistema Automático de Identificación Dactilar (SAID) de INTERPOL, el cual facilita el intercambio y comparación de huellas entre distintos países, ayudando en la identificación de miles de personas involucradas en investigaciones internacionales (INTERPOL, 2024).

Además de su aplicación en el ámbito criminalístico, las huellas dactilares también son utilizadas en la identificación de víctimas de catástrofes naturales, accidentes y otros eventos de gran magnitud, demostrando así su importancia dentro de las ciencias forenses modernas y en los procesos de identificación humana a nivel mundial (INTERPOL, 2024).

5.2 MÉTODOS TRADICIONALES PARA LA REVELACIÓN DE HUELLAS DACTILARES CON POLVOS

El método de revelación por espolvoreo se da aplicando polvos que son finamente divididos, los cuales se adhieren a los componentes grasos y acuosos que presentan las huellas dactilares. Esta técnica es fácil de usar, tiene bajo costo y se realiza de una forma rápida, explicando así el porqué de su uso extendido en laboratorios forenses y escenas del crimen (Sodhi & Kaur, 2001).

Los polvos tradicionales están compuestos por sustancias sintéticas como oxido metálico, negro de humo y polvos fluorescentes por lo general contaminantes. Es cierto que estos materiales dan resultados favorables y buenos niveles de definición y contraste, varios autores han indagado sobre los riesgos de usar estos compuestos dentro de polvos reveladores llegando a la conclusión de la existencia de varios riesgos asociados a su manipulación, tales como la inhalación de partículas finas y la exposición prolongada a compuestos potencialmente tóxicos (Bleay et al., 2018; Mong et al., 2012).

Hay que recalcar también que el uso constante de estos polvos ocasiona riesgos para la salud, siendo también una situación preocupante para el futuro del medio ambiente, ya que la producción y eliminación de los mismos tiene varias desventajas que dejan problemas que pueden volverse graves a largo plazo. Estas problemáticas han motivado a la ciencia a buscar y encontrar propuestas más seguras y ecológicas que logren mantener la eficacia del revelado sin generar

efectos adversos preocupantes (Houck, 2015)

5.3. QUÍMICA VERDE Y SOSTENIBILIDAD EN LAS CIENCIAS FORENSES

5.3.1 SOSTENIBILIDAD

La sostenibilidad en las ciencias forenses busca reducir el impacto ambiental generado durante los procesos de análisis sin afectar la calidad ni la confiabilidad de los resultados. En los últimos años, la química verde ha impulsado el desarrollo de metodologías que disminuyen el consumo de reactivos, energía y recursos, promoviendo técnicas más eficientes y respetuosas con el medio ambiente. Entre estas estrategias destacan las técnicas de microextracción, los métodos libres de solventes y el uso de equipos analíticos portátiles, los cuales permiten reducir significativamente la generación de residuos químicos. Estas innovaciones contribuyen a que los laboratorios forenses adopten prácticas más sostenibles y acordes con los desafíos ambientales actuales (Brettell, 2026).

5.3.2 REDUCCIÓN DE TOXICIDAD

Uno de los principios fundamentales de la química verde es la sustitución de sustancias peligrosas por recursos menos tóxicos e igual de eficientes. En el campo forense, esta tendencia ha favorecido el desarrollo de métodos que emplean menores cantidades de reactivos químicos y reemplazan solventes convencionales por opciones más seguras para los analistas y el medio ambiente. Asimismo, se han implementado técnicas de extracción con bajo consumo de solventes y procedimientos que disminuyen la exposición a vapores nocivos. Estas mejoras no solo reducen los riesgos ocupacionales dentro del laboratorio, sino que también minimizan la contaminación derivada de los análisis forenses (Ünal, Uysal y Uzun, 2024).

5.3.3 MATERIALES BIODEGRADABLES

El uso de materiales biodegradables representa una de las aplicaciones más prometedoras de la química verde en las ciencias forenses. Actualmente, diversos estudios investigan el empleo de biopolímeros obtenidos de fuentes renovables, como el quitosano, el ácido poliláctico (PLA), los polihidroxialcanoatos (PHA) y otros materiales de origen natural. Estos compuestos han demostrado ser útiles en la fabricación de herramientas analíticas y sistemas para la visualización de huellas dactilares, ofreciendo un menor impacto ambiental en comparación con materiales derivados del petróleo. Además, su capacidad de degradarse naturalmente favorece una gestión más sostenible de los residuos generados durante las investigaciones forenses (Ünal, Uysal y Uzun, 2024).

5.3.4 POTENCIAL DE LAS CÁSCARAS CÍTRICAS COMO MATERIAL ECOLÓGICO PARA APLICACIONES FORENSES

Las cáscaras de cítricos constituyen uno de los residuos orgánicos más generados a nivel mundial, especialmente en regiones donde el consumo de frutas cítricas es elevado. Diversas investigaciones han demostrado que estos subproductos contienen compuestos naturales con propiedades físicas y químicas de interés, lo que ha impulsado su estudio como materia prima para el desarrollo de productos con valor agregado (Mahato et al., 2018).

En el ámbito forense, el aprovechamiento de cáscaras cítricas, que habitualmente son descartadas en grandes cantidades, surge como una opción innovadora para la elaboración de polvos ecológicos destinados al revelado de huellas dactilares. Su amplia disponibilidad, bajo costo y naturaleza biodegradable les otorgan características atractivas frente a algunos materiales sintéticos utilizados tradicionalmente. Además, su uso contribuye al aprovechamiento de residuos agroindustriales, alineándose con los principios de sostenibilidad y química verde. Sin embargo,

Didierjean y Crispino (2016) destacan que aún es necesario profundizar en el estudio de su comportamiento sobre distintos tipos de superficies y bajo diversas condiciones ambientales, con el fin de determinar de manera más precisa su potencial aplicación en las ciencias forenses.

5.4 BIODIVERSIDAD Y PRODUCCIÓN DE CÍTRICOS EN ECUADOR

Las cáscaras cítricas constituyen una fuente importante de compuestos bioactivos y biopolímeros naturales que les confieren propiedades de interés para diversas aplicaciones tecnológicas, ambientales y científicas. Estos residuos agroindustriales están compuestos principalmente por polisacáridos estructurales, aceites esenciales, compuestos fenólicos, vitaminas, minerales y otros metabolitos secundarios que participan en la protección y el mantenimiento de la estructura del fruto (Zhang et al., 2021).

Entre los componentes estructurales más abundantes se encuentran la celulosa, la hemicelulosa y las pectinas. La celulosa y la hemicelulosa forman parte de la pared celular vegetal y proporcionan resistencia mecánica a los tejidos, mientras que las pectinas actúan como agentes de cohesión entre las células vegetales. Estas sustancias poseen una gran relevancia debido a que permanecen en el material sólido después de los procesos de secado y molienda, permitiendo la obtención de partículas finas con potencial aplicación en la elaboración de materiales de bajo impacto ambiental (Fakayode y Abobi, 2018).

Además de los compuestos estructurales, las cáscaras contienen aceites esenciales ricos en terpenos, especialmente limoneno, responsable del aroma característico de los cítricos. También presentan una elevada concentración de compuestos fenólicos, entre los que destacan la quercetina, catequina, ácido gálico, hesperidina, naringina, nobiletina y tangeretina. Estos metabolitos secundarios cumplen funciones de protección en la planta y contribuyen a las

propiedades químicas del material vegetal (Singh et al., 2020).

La composición química general de los residuos cítricos se presenta en la Figura 1. En ella se observa la presencia de ácidos orgánicos, vitaminas, compuestos fenólicos, pectinas, carbohidratos, proteínas y minerales, evidenciando la complejidad química de este subproducto agrícola y su potencial para ser aprovechado en diferentes áreas de investigación (Maqbool et al., 2023).

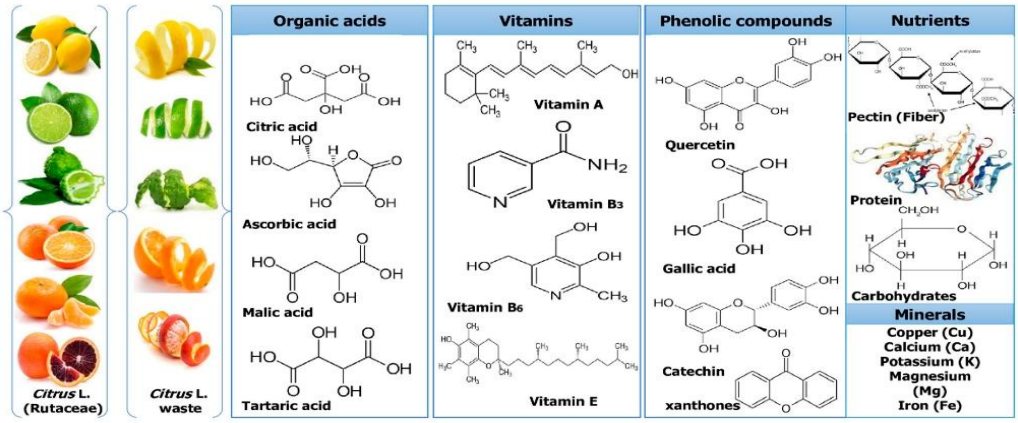


Figura 1. Principales compuestos fotoquímicos presentes en los residuos de cítricos (Citrus L.), incluyendo ácidos orgánicos, vitaminas, compuestos fenólicos, pectinas, carbohidratos, proteínas y minerales.
Fuente: Adaptado de Maqbool et al. (2023, p. 5).

Como se aprecia en la Figura 1, las cáscaras cítricas contienen una amplia variedad de biomoléculas de interés. Entre ellas destacan las pectinas y los carbohidratos estructurales, ya que constituyen una fracción importante de la pared celular vegetal y pueden conservarse después de los tratamientos de secado y pulverización. Asimismo, la presencia de minerales como calcio, potasio, magnesio, hierro y cobre complementa la composición química de estos residuos.

En conjunto, las propiedades fisicoquímicas derivadas de esta composición convierten a las cáscaras cítricas en una materia prima prometedora para el desarrollo de polvos ecológicos destinados a aplicaciones forenses. Su disponibilidad, bajo costo, origen renovable y carácter biodegradable representan ventajas frente a algunos materiales sintéticos empleados tradicionalmente para la visualización de huellas dactilares latentes.

5.5 VENTAJAS AMBIENTALES Y ECONÓMICAS

La valorización de los residuos procedentes de la industria citrícola constituye una estrategia que contribuye al desarrollo sostenible y a la implementación de modelos de economía circular. Las cáscaras cítricas representan una fracción importante de los residuos generados durante el procesamiento industrial de los frutos y, cuando no son aprovechadas adecuadamente, pueden ocasionar problemas ambientales relacionados con su acumulación y disposición final (Zema et al., 2018).

Desde la perspectiva ambiental, el aprovechamiento de las cáscaras cítricas permite reducir la cantidad de residuos destinados a vertederos y minimizar los impactos negativos asociados a su eliminación. Asimismo, la reutilización de estos subproductos favorece el uso de materiales renovables y biodegradables, disminuyendo la dependencia de materias primas sintéticas y promoviendo prácticas acordes con los principios de la química verde. Según Zema et al. (2018), la valorización de los residuos cítricos constituye una estrategia eficaz para disminuir la presión ambiental generada por la industria agroalimentaria y fomentar el uso eficiente de los recursos naturales.

En cuanto a las ventajas económicas, las cáscaras cítricas destacan por su amplia disponibilidad y bajo costo, ya que corresponden a un residuo abundante generado de manera continua por la industria procesadora de cítricos. Zema et al. (2018) señalan que los costos asociados al manejo y disposición de estos residuos pueden representar una carga económica considerable para las empresas. Por ello, su aprovechamiento para la obtención de productos con valor agregado permite transformar un desecho en un recurso útil, reduciendo gastos de gestión y generando nuevas oportunidades de aprovechamiento industrial.

Además, la recuperación y utilización de compuestos presentes en las cáscaras cítricas contribuye a incrementar el valor económico de la cadena productiva, favoreciendo modelos de producción más sostenibles y rentables. En consecuencia, el uso de estos residuos como materia prima es una opción viable con beneficios tanto ambientales como económicos, lo que respalda su potencial aplicación en el desarrollo de polvos ecológicos para la revelación de huellas dactilares latentes (Zema et al., 2018).

5.5.1 APLICACIÓN EN LA REVELACIÓN DE HUELLAS DACTILARES LATENTES

La revelación de huellas dactilares latentes es una de las técnicas más utilizadas en las ciencias forenses, ya que permite visualizar impresiones que no pueden observarse a simple vista. Este procedimiento se basa en la capacidad de ciertos materiales para adherirse a los residuos que los dedos dejan sobre una superficie, haciendo posible la observación de las crestas dactilares necesarias para la identificación de una persona.

Champod, Lennard, Margot y Stoilovic (2004) señalan que la eficacia de un polvo revelador está relacionada con características como el tamaño de partícula, la capacidad de adhesión y el contraste generado con la superficie analizada. Estas propiedades permiten que las partículas se fijen principalmente a los componentes grasos y sudoríparos presentes en la huella, facilitando la obtención de una imagen más definida y útil para su posterior análisis.

En los últimos años, varios investigadores han estudiado materiales de origen sostenible con el objetivo de encontrar nuevas opciones para el revelado de huellas dactilares. Entre estos trabajos destaca el desarrollado por Barbosa et al. (2025), quienes evaluaron un material obtenido a partir de residuos industriales y observaron resultados comparables a los alcanzados con algunos polvos utilizados tradicionalmente en el ámbito forense. Este hallazgo demuestra que ciertos residuos

pueden aprovecharse de manera eficiente en procesos de identificación criminalística.

Estos resultados resultan especialmente interesantes para el estudio de las cáscaras cítricas. Al igual que otros materiales de origen orgánico analizados en investigaciones recientes, las cáscaras de naranja, limón y otros cítricos contienen compuestos naturales que, tras ser secados y molidos, pueden generar partículas capaces de interactuar con los residuos presentes en las huellas latentes. Por ello, su posible aplicación no se relaciona únicamente con su origen natural, sino también con las propiedades físicas y químicas que podrían favorecer su adhesión a las crestas dactilares.

Las superficies no porosas, como el vidrio, el metal o el plástico, suelen ofrecer condiciones favorables para la aplicación de polvos reveladores, debido a que los residuos de la huella permanecen sobre la superficie y no son absorbidos por el material (Champod et al., 2004). Esta característica podría facilitar la interacción entre las partículas obtenidas de cáscaras cítricas y los componentes presentes en la huella latente, favoreciendo una mejor visualización del patrón dactilar.

La información revisada permite considerar que los materiales obtenidos a partir de residuos orgánicos poseen un potencial importante para su utilización en el revelado de huellas dactilares latentes. Aunque todavía se necesitan más investigaciones específicas sobre polvos elaborados con cáscaras cítricas, los resultados reportados para otros materiales sostenibles respaldan la posibilidad de aprovechar estos residuos agroindustriales en el desarrollo de métodos forenses más seguros y compatibles con los principios de la química verde.

5.5.2 POTENCIAL PARA IMPULSAR INVESTIGACIONES FORENSES SOSTENIBLES EN ECUADOR

En los últimos años, la sostenibilidad ha adquirido una importancia cada vez mayor dentro de diferentes áreas científicas, incluidas las ciencias forenses. Esta tendencia ha impulsado el desarrollo de investigaciones orientadas a la búsqueda de materiales y metodologías que permitan mantener la calidad de los análisis sin generar impactos ambientales innecesarios. En este contexto, el aprovechamiento de residuos orgánicos representa una línea de investigación con un importante potencial de crecimiento.

En Ecuador, el fortalecimiento de la investigación forense requiere la integración de diferentes disciplinas científicas que contribuyan al desarrollo de metodologías adaptadas a las necesidades del país. García Ruilova et al. (2020) señalan que la aplicación de enfoques científicos multidisciplinarios resulta fundamental para mejorar la obtención, el análisis y la interpretación de las evidencias dentro del sistema de justicia ecuatoriano. Esta visión abre la posibilidad de incorporar nuevas líneas de investigación relacionadas con el uso de materiales sostenibles en el ámbito forense.

Dentro de este escenario, las cáscaras cítricas podrían constituir un recurso de interés debido a su amplia disponibilidad y a la posibilidad de ser aprovechadas como materia prima en el desarrollo de materiales para aplicaciones criminalísticas. Su estudio permitiría no solo explorar nuevas herramientas para el revelado de huellas dactilares latentes, sino también fomentar el aprovechamiento de residuos que normalmente son descartados después de su consumo.

La viabilidad de utilizar residuos como materiales forenses ha sido demostrada en investigaciones realizadas en otros países. Pacheco et al. (2025) evaluaron un material producido a partir de residuos industriales para la revelación de huellas dactilares latentes y observaron resultados comparables a los obtenidos con algunos polvos utilizados convencionalmente. Los autores concluyeron que determinados residuos pueden transformarse en materiales funcionales

para aplicaciones forenses cuando presentan características adecuadas para la visualización de huellas.

Estos hallazgos permiten considerar que la investigación de materiales obtenidos a partir de residuos orgánicos podría representar una oportunidad para el desarrollo científico en Ecuador. En particular, las cáscaras cítricas constituyen una opción interesante debido a su disponibilidad local y a las propiedades que han sido descritas en la literatura científica. Su estudio podría contribuir al desarrollo de metodologías más sostenibles y promover nuevas investigaciones enfocadas en el aprovechamiento de recursos renovables dentro de las ciencias forenses.

Por lo tanto, el potencial de las cáscaras cítricas no se limita únicamente a su posible aplicación como polvo revelador. Su investigación también puede incentivar el desarrollo de proyectos científicos orientados a la sostenibilidad, fortalecer la innovación en el ámbito forense ecuatoriano y fomentar la búsqueda de soluciones basadas en recursos disponibles en el propio país. De esta manera, el estudio de estos materiales podría aportar tanto al avance de las ciencias forenses como al aprovechamiento responsable de residuos orgánicos.

5.5.3 USO DE POLVOS NATURALES Y ALTERNATIVOS PARA LA REVELACIÓN DE HUELLAS DACTILARES

El interés por desarrollar materiales más seguros y respetuosos con el medio ambiente ha impulsado la búsqueda de nuevas opciones para la revelación de huellas dactilares latentes. En este contexto, diversos estudios han evaluado el empleo de polvos de origen natural como posibles sustitutos de algunos materiales utilizados tradicionalmente en el ámbito forense. Estos trabajos han demostrado que ciertos materiales vegetales, una vez sometidos a procesos adecuados de secado y pulverización, poseen la capacidad de adherirse a los residuos presentes en las huellas latentes,

permitiendo una adecuada visualización de las crestas dactilares (Bumbrah & Sharma, 2016).

La incorporación de materiales naturales en procedimientos dactiloscópicos ha despertado un creciente interés debido a las ventajas asociadas a su uso. Entre las características más destacadas se encuentran su menor toxicidad, la facilidad de obtención y la reducción del impacto ambiental en comparación con algunos polvos convencionales. Kaur y Garg (2015) señalan que diversos polvos ecológicos han mostrado resultados satisfactorios en términos de contraste y definición de huellas, alcanzando niveles de desempeño comparables a los observados con materiales utilizados habitualmente en laboratorios forenses.

Los avances en esta línea de investigación también han puesto de manifiesto la versatilidad de los materiales de origen natural. Ravindran y Philip (2018) observaron que determinados polvos vegetales pueden aplicarse sobre distintos tipos de superficies sin comprometer significativamente la calidad de las huellas obtenidas. Estos resultados sugieren que el uso de materiales naturales no solo responde a criterios ambientales, sino que también puede representar una opción técnicamente funcional dentro de las actividades de identificación forense.

De manera complementaria, Ünal et al. (2024) destacan que el empleo de materiales biodegradables constituye una de las principales tendencias actuales dentro de las ciencias forenses, debido a la necesidad de desarrollar metodologías más sostenibles y alineadas con los principios de la química verde. Esta perspectiva ha favorecido el estudio de residuos agrícolas y biomasa vegetal como fuentes potenciales para la elaboración de nuevos materiales con aplicaciones forenses.

Dentro de este grupo, las cáscaras cítricas han adquirido especial interés debido a la presencia de compuestos naturales como celulosa, hemicelulosa y pectinas, los cuales pueden influir en las propiedades físicas del material obtenido tras su procesamiento (Mahato et al., 2018). Estas

características respaldan el interés por evaluar su posible aplicación en la revelación de huellas dactilares latentes y refuerzan la importancia de continuar investigando materiales obtenidos a partir de recursos renovables y residuos agroindustriales.

5.6 VENTAJAS DE LOS POLVOS ECOLÓGICOS FRENTE A LOS POLVOS TRADICIONALES

Los polvos ecológicos representan una alternativa cada vez más importante dentro del área forense debido a las diferentes ventajas que ofrecen frente a los polvos tradicionales utilizados para la revelación de huellas dactilares. Aunque los polvos convencionales han demostrado ser efectivos durante muchos años, varios de ellos contienen compuestos químicos, partículas metálicas y sustancias sintéticas que pueden generar riesgos para la salud del personal forense cuando existe una exposición frecuente, principalmente por inhalación o contacto continuo con la piel (National Institute of Justice, 2011).

Una de las principales ventajas de los polvos ecológicos es su menor toxicidad. Al estar elaborados a partir de materiales naturales y biodegradables, disminuyen considerablemente la exposición a sustancias potencialmente peligrosas, haciendo que su manipulación sea más segura dentro de laboratorios y escenas del crimen. Además, ayudan a reducir el impacto ambiental asociado al uso constante de productos químicos sintéticos, ya que muchos de estos materiales pueden degradarse de manera natural sin dejar residuos contaminantes.

Otro aspecto importante es el aprovechamiento de residuos orgánicos, como las cáscaras cítricas, que normalmente son desechadas. El uso de este tipo de materiales permite transformar residuos comunes en productos con aplicación científica, promoviendo prácticas más sostenibles y alineadas con los principios de la química verde. Asimismo, los polvos ecológicos suelen ser de bajo costo y fáciles de obtener, lo que podría facilitar su implementación en distintos contextos forenses

sin necesidad de recurrir a materiales complejos o costosos.

Además de sus beneficios ambientales y económicos, diversos estudios han demostrado que los polvos naturales pueden presentar una buena capacidad de adhesión a los residuos grasos y acuosos presentes en las huellas dactilares latentes. Esto permite obtener niveles adecuados de contraste y visibilidad sobre superficies no porosas, ofreciendo resultados comparables a los obtenidos con algunos polvos tradicionales. De igual manera, su versatilidad y facilidad de aplicación los convierten en una opción prometedora para futuras investigaciones dentro de la dactiloscopía moderna (National Institute of Justice, 2011).

5.6.1 LIMITACIONES DE LOS POLVOS TRADICIONALES EN LA REVELACIÓN DE HUELLAS DACTILARES

A pesar de que los polvos tradicionales han sido utilizados durante muchos años en la revelación de huellas dactilares debido a su efectividad y facilidad de aplicación, también presentan varias limitaciones relacionadas principalmente con la salud, el medio ambiente y las condiciones de uso. Muchos de estos polvos contienen partículas finas, pigmentos sintéticos y compuestos metálicos que pueden representar riesgos para el personal forense cuando son manipulados constantemente, especialmente por inhalación o contacto prolongado con la piel (National Institute of Justice, 2011).

Otra limitación importante es el impacto ambiental asociado a la producción y eliminación de estos materiales. Algunos polvos tradicionales contienen sustancias químicas que no son biodegradables y pueden generar contaminación cuando son utilizados de manera frecuente en procedimientos forenses. Debido a esto, ha surgido la necesidad de desarrollar posibilidades más sostenibles que permitan reducir el uso de compuestos potencialmente tóxicos sin afectar la calidad

del revelado.

Hay que tomar en cuenta que ciertos polvos convencionales pueden presentar dificultades al momento de ser utilizados sobre superficies específicas, ya que el exceso de aplicación o una mala adhesión puede afectar la visibilidad y definición de las huellas dactilares latentes. En algunos casos, suele existir el riesgo de alterar parcialmente la evidencia si el procedimiento no se realiza de forma adecuada. Estas limitaciones han impulsado el interés por investigar materiales naturales y biodegradables que ofrezcan mayor seguridad y menor impacto ambiental dentro de las ciencias forenses modernas (National Institute of Justice, 2011).

5.7 CLASIFICACIÓN DE LOS POLVOS UTILIZADOS EN LA REVELACIÓN DE HUELLAS DACTILARES

Los polvos utilizados para la revelación de huellas dactilares pueden clasificarse según su composición, color y forma de aplicación. Dentro de los métodos tradicionales, existen polvos convencionales elaborados con materiales sintéticos y partículas finas diseñadas para adherirse a los residuos grasos y acuosos presentes en las huellas latentes. Estos polvos son seleccionados dependiendo del tipo y color de la superficie sobre la cual se realizará el revelado (National Institute of Justice, 2011).

Una de las clasificaciones más utilizadas corresponde a los polvos negros, grises y blancos, los cuales son empleados para generar contraste sobre superficies de diferentes tonalidades. Los polvos negros suelen aplicarse en superficies claras, mientras que los blancos o grises son utilizados sobre superficies oscuras. Asimismo, existen polvos fluorescentes que permiten mejorar la visualización de huellas mediante el uso de fuentes de luz especiales, siendo útiles en superficies complejas o multicolores.

Otra clasificación importante incluye los polvos magnéticos y no magnéticos. Los polvos magnéticos son aplicados mediante herramientas imantadas que reducen el contacto directo con la superficie, disminuyendo el riesgo de alterar la huella revelada. Por otro lado, los polvos no magnéticos son aplicados con brochas tradicionales y continúan siendo ampliamente utilizados debido a su facilidad de uso y bajo costo.

En la actualidad también se ha incorporado el estudio de polvos ecológicos y biodegradables elaborados a partir de materiales naturales, los cuales buscan reducir los riesgos asociados al uso de compuestos químicos tradicionales. Esta nueva clasificación ha tomado relevancia dentro de las ciencias forenses modernas debido al interés creciente por desarrollar técnicas más sostenibles y seguras para el personal forense y el medio ambiente (National Institute of Justice, 2011).

5.8 PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS RELEVANTES

5.8.1 ADHESIÓN

La adhesión constituye una de las propiedades más importantes de los polvos utilizados en el revelado de huellas latentes, ya que determina la capacidad de las partículas para fijarse a los residuos presentes en las crestas dactilares. Este fenómeno ocurre principalmente por la interacción de las partículas con los componentes grasos, acuosos y proteicos depositados por la piel sobre una superficie. Una adecuada adhesión permite que el polvo se concentre sobre las crestas de la huella y no sobre las zonas circundantes, favoreciendo una visualización clara del patrón dactilar. Diversos estudios han demostrado que la forma, el tamaño y el estado de agregación de las partículas influyen directamente en la intensidad de la adhesión y, por tanto, en la calidad de la impresión obtenida (Sodhi & Kaur, 2001; Rajan et al., 2018).

5.8.2 GRANULOMETRÍA

La granulometría corresponde al tamaño y la distribución de las partículas que constituyen un polvo revelador. Esta propiedad es uno de los factores más importantes en el desempeño de los materiales utilizados para el revelado de huellas dactilares latentes, ya que influye directamente en la capacidad de las partículas para adherirse a los residuos presentes en las crestas papilares. Una distribución granulométrica adecuada favorece una aplicación uniforme del polvo y contribuye a la obtención de imágenes más definidas y con mayor contraste.

El tamaño de las partículas desempeña un papel fundamental en la interacción entre el polvo revelador y los componentes de la huella. Las partículas pequeñas presentan una mayor área superficial específica, lo que incrementa las probabilidades de adhesión a los residuos sebáceos y sudoríparos depositados sobre la superficie. En consecuencia, se mejora la visualización de las crestas papilares y de los detalles característicos de la huella. Sin embargo, cuando las partículas son excesivamente finas pueden presentarse fenómenos de aglomeración debido a fuerzas de atracción intermoleculares, lo que dificulta su dispersión uniforme y reduce la calidad del revelado.

Además del tamaño individual de las partículas, la distribución granulométrica influye de manera significativa en la eficacia del proceso. Los polvos con una distribución homogénea suelen proporcionar una cobertura más uniforme y una adhesión más selectiva a los residuos de la huella, mientras que distribuciones irregulares pueden generar acumulaciones excesivas de material, disminuyendo el contraste y dificultando la interpretación de la evidencia.

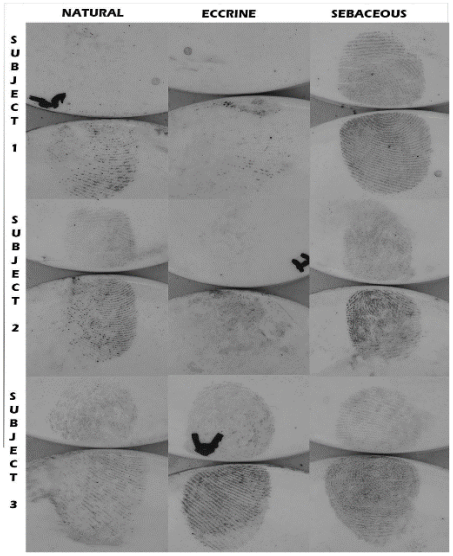


Figura 2. Influencia del tamaño de partícula en la calidad y contraste del revelado de huellas dactilares latentes.
Fuente: Adaptado de Rajan et al. (2018).

La caracterización granulométrica de estos polvos puede realizarse mediante técnicas analíticas como el tamizado, la difracción láser y la microscopía electrónica de barrido (SEM), las cuales permiten determinar tanto el tamaño como la morfología de las partículas. En particular, el SEM es una técnica clave para el análisis microscópico de estos materiales, ya que permite observar con alta resolución su estructura y variaciones morfológicas, información esencial para comprender su comportamiento durante el revelado.

Rajan et al. (2018) evaluaron nanopartículas de carbono empleadas como polvo revelador de huellas dactilares mediante microscopía electrónica de barrido. Los autores observaron partículas de tamaño nanométrico con una distribución relativamente uniforme, características que favorecieron una mayor interacción con los residuos presentes en las huellas latentes. Los resultados demostraron que la reducción controlada del tamaño de partícula puede incrementar la sensibilidad y selectividad del revelado, permitiendo obtener imágenes más nítidas y detalladas. Estos hallazgos evidencian la importancia de la granulometría en el desarrollo de nuevos polvos reveladores, especialmente aquellos obtenidos a partir de materiales ecológicos o de origen natural.

La caracterización de la granulometría en polvos reveladores puede realizarse mediante microscopía electrónica de barrido (SEM), técnica que permite observar el tamaño y la morfología de las partículas a nivel microscópico. Este tipo de análisis es fundamental para comprender el comportamiento del polvo durante el revelado de huellas dactilares latentes, ya que la forma y el tamaño de las partículas influyen directamente en su capacidad de adhesión a los residuos presentes en las crestas papilares.

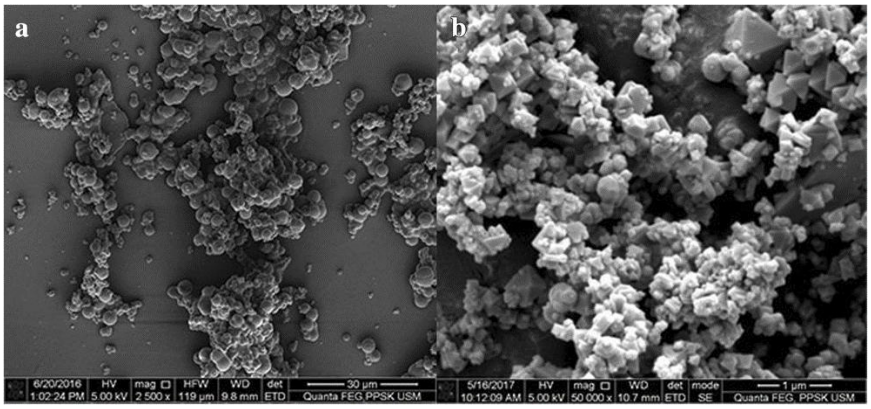


Figura 3. Micrografía electrónica de barrido (SEM) utilizada para la caracterización del tamaño y morfología de partículas en polvos reveladores.
Fuente: Adaptado de Rajan et al. (2018).

Como se observa en la Figura 3, la evaluación mediante SEM permite identificar diferencias en la estructura y tamaño de las partículas, lo cual constituye un parámetro clave dentro del control granulométrico. Este tipo de caracterización es ampliamente utilizado en el desarrollo de polvos reveladores, ya que facilita la optimización de sus propiedades físicas para mejorar la definición y el contraste de las huellas.

5.8.3 CONTRASTE

El contraste en el revelado de huellas dactilares se define como la diferencia perceptual y cuantificable entre la huella revelada y el sustrato donde esta se deposita. Desde un enfoque físico-

óptico, este fenómeno se fundamenta en variaciones de luminancia, reflectancia y absorción espectral de la luz, las cuales determinan la capacidad del sistema visual o digital para distinguir las crestas papilares del fondo (Champod, Lennard, Margot & Stoilovic, 2017).

En términos de óptica de imagen, el contraste depende directamente de la interacción entre la luz incidente y las propiedades superficiales del material. Superficies con alta reflectancia especular, como vidrio o metales pulidos, tienden a generar fondos más uniformes, lo que favorece la discriminación de la huella cuando el polvo revelador presenta propiedades ópticas contrastantes. En contraste, superficies rugosas o porosas producen dispersión difusa de la luz, generando ruido de fondo que reduce la nitidez del patrón dactilar (Clement & Bull, 1999).

Desde la perspectiva del revelado físico, el contraste también está influenciado por la selectividad de adhesión del polvo a los residuos presentes en las crestas papilares. Esta adhesión está relacionada con interacciones intermoleculares como fuerzas de Van der Waals, interacciones electrostáticas y afinidad con componentes lipídicos del sudor humano. Una mayor selectividad de adhesión incrementa la relación señal-fondo, mejorando la calidad visual de la huella (Sodhi & Kaur, 2001).

En el ámbito del procesamiento de imagen forense, el contraste puede ser evaluado mediante métricas cuantitativas como el contraste de Michelson o el contraste de Weber, los cuales permiten medir la diferencia relativa de intensidad entre la huella y el fondo. Estos parámetros son ampliamente utilizados en el análisis digital de imágenes forenses para la mejora, segmentación y realce de huellas latentes (Champod et al., 2017).

Asimismo, el contraste no es una propiedad fija, sino un resultado dinámico dependiente de múltiples variables experimentales, como el tipo de iluminación empleada. La iluminación rasante

permite resaltar microrelieves mediante sombras proyectadas, mientras que la iluminación multiespectral o filtrada mejora la discriminación entre materiales con distinta respuesta espectral, optimizando la visualización de detalles finos de las crestas papilares (Clement & Bull, 1999).

5.8.4 COLOR

El color de un polvo revelador constituye un parámetro fundamental en la visualización de huellas dactilares latentes, ya que determina en gran medida la eficiencia del contraste óptico entre la impresión y el sustrato. Su selección no se basa únicamente en criterios estéticos, sino en principios físico-químicos relacionados con la reflectancia del material soporte y la interacción óptica entre la luz incidente, el polvo revelador y la superficie analizada.

Desde un enfoque forense, la elección del color depende principalmente de la luminancia del sustrato. En superficies claras se emplean comúnmente polvos oscuros, mientras que en superficies oscuras se utilizan polvos de tonalidad clara o metálica, con el objetivo de maximizar la diferencia de reflectancia y mejorar la visibilidad de las crestas papilares. Este principio de contraste cromático permite aumentar la discriminación visual de la huella y facilitar su registro fotográfico y análisis posterior (Cornago Ramírez & Esteban Santos, 2016).

En términos físico-ópticos, el color actúa como un modulador de la interacción luz-materia, donde la percepción final de la huella depende de la cantidad de luz reflejada o absorbida por el polvo en comparación con el fondo. Por esta razón, el contraste efectivo no solo está determinado por el color en sí, sino también por la textura del sustrato, su capacidad de dispersión lumínica y las condiciones de iluminación utilizadas durante el revelado.

En superficies complejas o con patrones cromáticos variables, el uso de polvos

convencionales puede resultar limitado, debido a la interferencia espectral del fondo. En estos casos, se han desarrollado alternativas como polvos fluorescentes, los cuales permiten una mejora significativa de la detección mediante la emisión de luz tras excitación con radiación ultravioleta o visible. Este fenómeno reduce la dependencia del color del sustrato, ya que la huella se visualiza a partir de una señal luminosa diferenciada del fondo (López Zepeda, 2022).

Asimismo, la correcta selección del color del polvo revelador contribuye directamente a la optimización de la relación señal-ruido en la imagen forense, lo que facilita la identificación de detalles individuales de las crestas papilares y mejora la calidad de la evidencia registrada. En este sentido, el color debe entenderse como una propiedad funcional dentro del proceso de revelado, estrechamente vinculada a la eficiencia del contraste óptico y a la calidad de la interpretación forense.

En conjunto, el color en el revelado de huellas dactilares no solo cumple una función visual, sino que representa un parámetro técnico basado en principios de óptica, química de superficies y análisis forense, siendo determinante para la obtención de imágenes con alto valor identificativo.

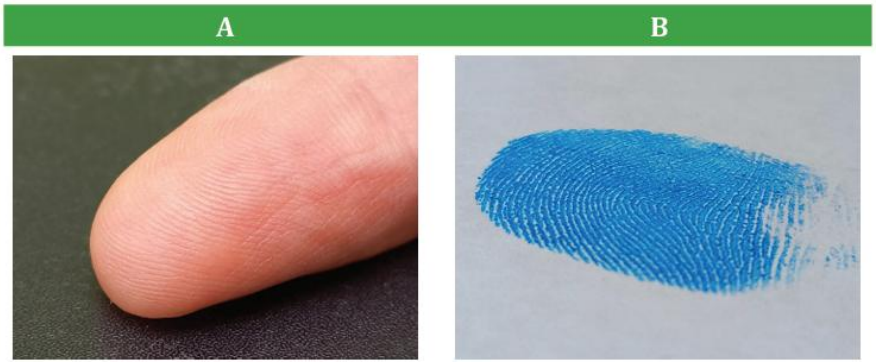


Figura 4. Huella dactilar e impresión dactilar

La Figura 4 permite contextualizar de manera visual los principios fundamentales que sustentan la selección del color en los polvos reveladores. En la subfigura A se observa una huella dactilar natural en la yema del dedo, en la cual las crestas papilares y los surcos interpapilares

conforman un patrón morfológico característico. Esta estructura constituye la base física sobre la cual se produce la interacción con la luz y con los agentes reveladores, determinando posteriormente la calidad del contraste óptico durante el proceso forense.

En la subfigura B se presenta una impresión dactilar obtenida mediante entintado sobre papel, donde las crestas papilares quedan representadas como zonas pigmentadas (líneas azules) y los surcos como áreas sin transferencia de tinta. Este modelo de impresión controlada permite evidenciar el principio esencial que también se aplica en el uso de polvos reveladores: la necesidad de generar una diferencia de respuesta óptica entre las crestas y el sustrato para facilitar la visualización del patrón dactilar.

En este sentido, la figura se relaciona directamente con los principios expuestos en la selección del color de los polvos reveladores, donde la eficacia del método depende de la diferencia de luminancia y reflectancia entre la huella y la superficie. De manera análoga al contraste observado en la impresión entintada, los polvos forenses se seleccionan en función de la tonalidad del sustrato, empleando colores oscuros sobre superficies claras y colores claros o metálicos sobre superficies oscuras, con el objetivo de maximizar la visibilidad de las crestas papilares.

Por lo tanto, la estructura visual representada en la Figura 1 ejemplifica el fundamento óptico del proceso de revelado, en el cual el color del polvo no cumple únicamente una función estética, sino que actúa como un mecanismo de control del contraste cromático y de la interacción luz-materia, tal como se ha descrito en la selección de polvos reveladores.

5.8.5 SUPERFICIE

El tipo de superficie sobre la que se encuentra una huella dactilar latente es uno de los

factores que más influye en la eficacia del proceso de revelado. Las características físicas del sustrato determinan la forma en que los residuos dactilares se depositan, permanecen y reaccionan con los materiales utilizados para su visualización. Por esta razón, la selección de un polvo revelador adecuado debe considerar las propiedades de la superficie que será analizada (Champod et al., 2004).

De manera general, las superficies pueden clasificarse en porosas y no porosas. Las superficies porosas, como papel, cartón o madera sin tratar, tienden a absorber parte de los componentes presentes en la huella, dificultando en algunos casos la adhesión de los polvos reveladores. Por el contrario, las superficies no porosas, como vidrio, plástico, metal o cerámica esmaltada, conservan los residuos dactilares sobre su superficie, favoreciendo la interacción entre estos y las partículas del polvo utilizado para el revelado (Sodhi & Kaur, 2001).

La calidad de la huella obtenida depende en gran medida de la capacidad del polvo para adherirse selectivamente a los residuos depositados por los dedos sin fijarse excesivamente al sustrato. Según Champod et al. (2004), esta interacción está relacionada tanto con las características del material revelador como con las propiedades de la superficie examinada. Cuando existe una adecuada compatibilidad entre ambos factores, es posible obtener imágenes más definidas y con un mayor nivel de detalle.

Diversas investigaciones han demostrado que materiales obtenidos a partir de residuos pueden presentar un comportamiento favorable en la visualización de huellas latentes sobre determinadas superficies. Pacheco et al. (2025) observaron que un material elaborado a partir de residuos industriales fue capaz de generar resultados comparables a los obtenidos con algunos polvos forenses convencionales, evidenciando que los materiales sostenibles pueden desempeñar funciones útiles dentro de los procesos de revelado de huellas.

En el caso de las cáscaras cítricas, las propiedades físicas derivadas de su composición natural y del proceso de molienda podrían favorecer la interacción entre las partículas y los residuos presentes en las huellas latentes. Mahato et al. (2018) señalan que las cáscaras de cítricos contienen compuestos estructurales como celulosa, hemicelulosa y pectinas, los cuales pueden influir en las características superficiales del material obtenido. Estas propiedades podrían contribuir a la adhesión de las partículas sobre los componentes grasos y sudoríparos presentes en las crestas dactilares.

Por otra parte, la creciente incorporación de materiales biodegradables en las ciencias forenses refleja el interés por desarrollar metodologías más sostenibles sin comprometer la calidad de los resultados obtenidos. Ünal et al. (2024) destacan que los materiales de origen natural representan una línea de investigación prometedora debido a su potencial para reducir el impacto ambiental asociado al uso de ciertos productos convencionales.

Considerando la evidencia revisada, puede inferirse que la superficie desempeña un papel determinante en el éxito del revelado de huellas dactilares latentes. Asimismo, las características presentes en los materiales obtenidos a partir de cáscaras cítricas sugieren que estos podrían interactuar favorablemente con los residuos dactilares, especialmente sobre superficies no porosas donde dichos residuos permanecen expuestos. Esta relación respalda el interés científico por continuar investigando su posible aplicación dentro del desarrollo de polvos ecológicos para uso forense.

5.8.6 MORFOLOGÍA DE PARTÍCULAS

La morfología de las partículas es un aspecto importante en materiales utilizados para el

revelado de huellas latentes, ya que influye directamente en la adhesión del polvo a los residuos presentes sobre las crestas dactilares. Mediante microscopía electrónica de barrido (SEM) es posible evaluar características como la forma de las partículas, la rugosidad superficial y la presencia de estructuras fibrosas, las cuales pueden afectar la calidad del revelado. Según Rajan et al. (2018), el desempeño de un polvo revelador está estrechamente relacionado con el tamaño, la forma y el grado de aglomeración de sus partículas.

La morfología de las partículas constituye una característica relevante en el desempeño de los polvos utilizados para el revelado de huellas dactilares latentes, ya que influye directamente en la forma en que estas interactúan con los residuos depositados sobre las crestas papilares. Entre los aspectos más importantes se encuentran la forma, la rugosidad superficial y la presencia de estructuras fibrosas, características que pueden evaluarse mediante microscopía electrónica de barrido (SEM).

La forma de las partículas desempeña un papel fundamental en la adhesión del polvo a los componentes grasos y acuosos presentes en la huella. En general, las partículas con formas más redondeadas o regulares suelen distribuirse de manera más uniforme sobre la superficie y presentar una mejor interacción con los residuos dactilares. Esta característica favorece la obtención de imágenes más definidas y con mayor nivel de detalle. Por el contrario, partículas excesivamente irregulares pueden acumularse de forma desigual, disminuyendo la nitidez de las crestas papilares y afectando la calidad del revelado. En este sentido, Rajan et al. (2018) observaron que partículas pequeñas, relativamente redondeadas y bien dispersas mostraron una mayor afinidad por los residuos de las huellas, contribuyendo a una visualización más clara de los patrones dactilares.

Otro aspecto importante es la rugosidad superficial, entendida como el conjunto de irregularidades presentes en la superficie de las partículas. Una rugosidad moderada puede resultar

beneficiosa porque aumenta los puntos de contacto disponibles entre el polvo y los componentes de la huella, favoreciendo así la adhesión. Sin embargo, cuando estas irregularidades son excesivas, las partículas tienden a aglomerarse con mayor facilidad, lo que puede generar una distribución poco homogénea del material sobre la superficie analizada. Rajan et al. (2018) reportaron que las partículas estudiadas presentaban superficies ligeramente irregulares, condición que favoreció la interacción con los residuos dactilares sin comprometer significativamente la calidad del revelado.

En materiales de origen vegetal, como los obtenidos a partir de residuos agrícolas o cáscaras de frutas, también es frecuente encontrar estructuras fibrosas derivadas de la pared celular vegetal. Estas fibras pueden aportar ventajas al incrementar el área superficial disponible para la adhesión y favorecer la retención de partículas sobre las crestas papilares. No obstante, cuando las fibras son demasiado largas o se encuentran en altas proporciones, pueden dificultar la dispersión uniforme del polvo y afectar la definición de la huella revelada. Por esta razón, resulta importante evaluar la presencia y distribución de estas estructuras mediante técnicas como la microscopía electrónica de barrado, ya que permiten comprender mejor su influencia sobre el comportamiento del material.

En conjunto, la forma, la rugosidad y la estructura fibrosa de las partículas son factores que influyen significativamente en la capacidad de adhesión del polvo revelador. La evidencia científica indica que partículas de tamaño reducido, con morfología relativamente uniforme y características superficiales adecuadas, favorecen una adhesión más selectiva a los residuos dactilares, permitiendo obtener huellas con mayor contraste, definición y utilidad para los procesos de identificación forense (Rajan et al., 2018).

5.8.7 HIDROFOBICIDAD E HIDROFILICIDAD

La capacidad de un material para interactuar con el agua o con sustancias de naturaleza

grasa constituye un factor importante en el revelado de huellas latentes. Esta propiedad está relacionada con la composición química de los residuos depositados por los dedos sobre una superficie. Las huellas dactilares están formadas por una mezcla compleja de compuestos procedentes principalmente de las secreciones ecrinas y sebáceas de la piel, dentro de las cuales se encuentran agua, sales inorgánicas, aminoácidos, proteínas y diferentes tipos de lípidos. La proporción de estos componentes puede variar entre individuos e incluso en una misma persona dependiendo de factores fisiológicos y ambientales, lo que influye directamente en la manera en que los agentes reveladores interactúan con la huella (Girod et al., 2012).

Desde el punto de vista químico, el agua, las sales y los aminoácidos presentan un comportamiento predominantemente hidrofílico debido a la presencia de grupos polares capaces de interactuar mediante enlaces de hidrógeno o fuerzas electrostáticas. Estos compuestos provienen principalmente de las secreciones sudoríparas y constituyen una fracción importante de los residuos frescos depositados sobre las superficies. Gracias a esta naturaleza polar, pueden establecer interacciones favorables con materiales que también poseen características hidrofílicas, favoreciendo la adhesión selectiva de ciertos reveladores sobre las crestas dactilares (Girod et al., 2012).

Por otro lado, los lípidos presentes en las huellas, entre los que se incluyen ácidos grasos, triglicéridos, ésteres cerosos, colesterol y escualeno, poseen una naturaleza predominantemente hidrofóbica. Estos compuestos proceden principalmente de las secreciones sebáceas y se caracterizan por su baja afinidad por el agua. Debido a ello, los materiales con superficies hidrofóbicas pueden presentar una mayor interacción con esta fracción grasa del residuo dactilar, favoreciendo la retención de partículas reveladoras sobre las crestas de la huella. La presencia simultánea de componentes hidrofílicos e hidrofóbicos convierte a la huella latente en un sistema químico complejo, capaz de interactuar con distintos tipos de materiales según sus propiedades

superficiales (Girod et al., 2012).

En consecuencia, la eficacia de un revelador depende en gran medida de su capacidad para establecer interacciones con ambas fracciones químicas del residuo dactilar. Cuando un material presenta grupos funcionales capaces de interactuar tanto con compuestos polares como con sustancias lipídicas, aumenta la probabilidad de adhesión sobre las crestas papilares y mejora la visualización de la huella. Por esta razón, el estudio de la hidrofobicidad e hidrofilicidad resulta fundamental para comprender el mecanismo de revelado y evaluar el potencial de nuevos materiales obtenidos a partir de residuos vegetales para aplicaciones forenses (Girod et al., 2012).

5.8.8 INTERACCIÓN CON LOS LÍPIDOS DEL SUDOR

La capacidad de un material para adherirse a los residuos presentes en una huella dactilar depende en gran medida de las interacciones que puede establecer con los compuestos químicos depositados sobre la superficie. Entre estos compuestos destacan los lípidos procedentes de las secreciones sebáceas, los cuales incluyen ácidos grasos, triglicéridos y otras moléculas de naturaleza apolar que permanecen adheridas a las crestas papilares incluso después de la evaporación de parte del contenido acuoso de la huella. En materiales obtenidos a partir de cáscaras de frutas, la presencia de pectinas, celulosa y diversos compuestos orgánicos puede favorecer la interacción con estos residuos lipídicos, contribuyendo a la adhesión del polvo sobre las crestas dactilares y mejorando la visualización de la huella (Kliemann et al., 2009).

Las pectinas constituyen uno de los principales componentes de la pared celular vegetal y están formadas por cadenas de polisacáridos con numerosos grupos funcionales capaces de establecer diferentes tipos de interacciones químicas. Aunque presentan una naturaleza predominantemente hidrofílica, su estructura tridimensional puede contribuir a la retención de

sustancias orgánicas presentes en la huella, favoreciendo el contacto entre las partículas del revelador y los residuos depositados sobre la superficie. Esta característica puede influir positivamente en la adhesión del material durante el proceso de revelado (Kliemann et al., 2009).

Por su parte, la celulosa representa la fracción estructural mayoritaria de muchas cáscaras vegetales y proporciona rigidez y soporte a la pared celular. Su organización en forma de microfibrillas genera una elevada área superficial y una morfología que puede favorecer la retención física de compuestos presentes en las huellas latentes. Además, la presencia simultánea de celulosa y pectinas contribuye a formar una matriz compleja que puede incrementar las posibilidades de interacción entre las partículas del polvo y los componentes orgánicos de la huella (Kliemann et al., 2009).

Las cáscaras también contienen otros compuestos orgánicos como hemicelulosas, aceites esenciales, pigmentos naturales y metabolitos secundarios que pueden modificar las propiedades superficiales del material. La combinación de estos componentes genera superficies químicamente heterogéneas, capaces de interactuar con distintas fracciones del residuo dactilar. Como resultado, las partículas obtenidas a partir de residuos cítricos pueden presentar afinidad por los lípidos del sudor y favorecer su adhesión selectiva sobre las crestas papilares. Esta interacción constituye uno de los factores que explican el potencial de las cáscaras de frutas como materia prima para el desarrollo de polvos reveladores sostenibles en el ámbito forense (Kliemann et al., 2009).

5.8.9 APLICACIÓN SOBRE SUPERFICIES NO POROSAS

Las superficies no porosas, como vidrio, metal, plástico y cerámica esmaltada, son algunos de los sustratos más comunes en las investigaciones forenses debido a su capacidad para conservar residuos dactilares en la superficie sin que estos sean absorbidos por el material. Esta característica

favorece la aplicación de polvos reveladores, ya que las partículas pueden adherirse selectivamente a los componentes presentes en la huella latente, permitiendo la visualización de las crestas dactilares (Sodhi & Kaur, 2001).

El éxito de un polvo revelador sobre superficies no porosas depende principalmente de propiedades como la adhesión, la granulometría y el contraste visual. Según Sodhi y Kaur (2001), las partículas deben presentar un tamaño adecuado y una buena capacidad de interacción con los residuos sebáceos y sudoríparos depositados por los dedos. Cuando estas condiciones se cumplen, el polvo se concentra sobre las crestas de la huella y genera una imagen suficientemente definida para su posterior análisis e identificación.

En este contexto, las cáscaras cítricas brindan una solución de interés debido a que contienen compuestos naturales como celulosa, hemicelulosa, pectina y pequeñas cantidades de aceites esenciales. Tras procesos de secado y molienda, estos materiales pueden generar partículas finas con potencial para interactuar físicamente con los residuos presentes en las huellas latentes. Además, la estructura fibrosa de la biomasa cítrica podría favorecer la adhesión de las partículas a los componentes grasos de la huella, una característica fundamental para el desarrollo de patrones dactilares visibles (Ünal, Uysal & Uzun, 2024).

Por otra parte, diversos estudios sobre materiales verdes aplicados al revelado de huellas han demostrado que los residuos de origen vegetal pueden presentar propiedades comparables a las de algunos polvos convencionales, especialmente cuando poseen una granulometría adecuada y generan suficiente contraste con el sustrato analizado (Rajan et al., 2018). En superficies no porosas, donde los residuos permanecen expuestos sobre el material, estas características adquieren especial importancia, ya que facilitan la adhesión selectiva del polvo y mejoran la definición de la impresión obtenida.

Desde una perspectiva teórica, las propiedades fisicoquímicas presentes en las cáscaras cítricas sugieren que estos materiales podrían actuar como agentes reveladores sobre superficies no porosas. Su disponibilidad, biodegradabilidad y potencial capacidad de adhesión a los residuos dactilares respaldan su estudio como una estrategia sostenible a los polvos tradicionales utilizados en criminalística. Sin embargo, la eficacia de estos materiales depende de factores como el tamaño de partícula, el método de preparación y el tipo de superficie analizada, aspectos que deben ser evaluados experimentalmente para confirmar su desempeño en aplicaciones forenses.

5.9 COMPARACIÓN ENTRE POLVOS TRADICIONALES Y ECOLÓGICOS

Los polvos reveladores constituyen uno de los métodos más utilizados para la visualización de huellas dactilares latentes debido a su facilidad de aplicación, bajo costo y rápida obtención de resultados. Tradicionalmente, estos productos están compuestos por materiales como negro de humo, aluminio, óxidos metálicos y otros compuestos sintéticos que presentan propiedades adecuadas de adhesión y contraste. Sin embargo, diversos estudios han señalado que algunos de estos materiales pueden representar riesgos para la salud de los operadores y generar impactos ambientales asociados a su producción, uso y eliminación (Sodhi & Kaur, 2001).

En respuesta a estas limitaciones, durante los últimos años se ha incrementado el interés por el desarrollo de polvos ecológicos obtenidos a partir de materiales naturales, residuos agrícolas y biomasa vegetal. Estos materiales buscan mantener la capacidad de revelar huellas latentes mientras reducen la toxicidad y favorecen una gestión más sostenible de los residuos. Dentro de estas alternativas, las cáscaras cítricas destacan por su amplia disponibilidad, bajo costo y carácter biodegradable, características que se alinean con los principios de la química verde aplicados a las ciencias forenses (Ünal, Uysal & Uzun, 2024).

Desde el punto de vista funcional, tanto los polvos tradicionales como los ecológicos deben cumplir requisitos similares, entre ellos una adecuada adhesión a los residuos dactilares, una granulometría apropiada y la capacidad de generar contraste con la superficie analizada. Los polvos convencionales poseen una eficacia ampliamente comprobada debido a décadas de aplicación en investigaciones forenses. No obstante, investigaciones recientes han demostrado que ciertos materiales de origen vegetal pueden presentar propiedades físicas comparables cuando son sometidos a procesos adecuados de secado, molienda y selección granulométrica (Rajan et al., 2018).

Una diferencia importante entre ambos tipos de materiales radica en su impacto ambiental. Mientras que muchos polvos tradicionales contienen compuestos minerales o sintéticos cuya producción puede requerir procesos industriales complejos, los polvos ecológicos aprovechan residuos orgánicos que de otro modo serían descartados. En el caso de las cáscaras cítricas, su utilización permite valorizar un subproducto agroindustrial abundante, reduciendo simultáneamente la generación de residuos y la dependencia de materiales sintéticos (Ünal et al., 2024).

Por otra parte, los polvos ecológicos aún presentan ciertas limitaciones relacionadas con la estandarización de sus propiedades y la necesidad de validar experimentalmente su desempeño sobre diferentes tipos de superficies. Aunque los resultados reportados en la literatura son prometedores, se requieren más estudios para determinar su eficacia bajo diversas condiciones operativas y compararlos de manera directa con los productos comerciales empleados actualmente en criminalística.

Tabla 1. Comparación entre polvos tradicionales y ecológicos

Característica	Polvos tradicionales	Polvos derivados de cáscaras cítricas
Toxicidad	Moderada-Alta	Baja esperada
Biodegradabilidad	Baja	Alta
Disponibilidad	Comercial	Residuo agrícola abundante
Costo	Variable	Bajo
Impacto ambiental	Mayor	Menor
Renovabilidad	Limitada	Renovable

Como se observa en la Tabla 1, los polvos derivados de cáscaras cítricas presentan ventajas potenciales relacionadas con su biodegradabilidad, disponibilidad y menor impacto ambiental. Sin embargo, aún requieren validación experimental que permita confirmar su eficacia frente a los polvos comerciales empleados actualmente en criminalística.

En conjunto, la evidencia disponible sugiere que las cáscaras cítricas poseen características que podrían permitir su utilización como polvos reveladores de huellas latentes. A pesar de que los polvos tradicionales continúan siendo ampliamente utilizados en la práctica forense, los materiales ecológicos han despertado interés por su potencial como opción sostenible para complementar ciertos productos convencionales, e incluso sustituirlos parcialmente, siempre que estudios experimentales respalden su eficacia y reproducibilidad.

5.10 PERSPECTIVAS Y DESAFÍOS FUTUROS

En los últimos años, las ciencias forenses han orientado parte de sus investigaciones hacia la incorporación de materiales más amigables con el medio ambiente. Esta línea de estudio busca preservar la efectividad de los procedimientos tradicionales mientras disminuye su impacto ambiental. Entre los materiales evaluados, las cáscaras de cítricos destacan por ser residuos abundantes, biodegradables y de fácil acceso, lo que ha impulsado su investigación como materia prima para la elaboración de polvos ecológicos empleados en el revelado de huellas dactilares

latentes (Ünal et al., 2024).

A pesar de los avances alcanzados hasta el momento, todavía existen varios aspectos que deben investigarse con mayor profundidad. Uno de ellos es la optimización de los procesos de preparación del material. Factores como el método de secado, el tamaño de partícula obtenido durante la molienda y las condiciones de almacenamiento pueden influir directamente en la calidad del revelado. Por esta razón, resulta necesario establecer procedimientos estandarizados que permitan obtener materiales con características uniformes y resultados reproducibles.

Otra línea de investigación prometedora se relaciona con el mejoramiento de las propiedades fisicoquímicas de estos materiales. La literatura científica ha demostrado que el tamaño y la distribución de las partículas desempeñan un papel importante en la adhesión del polvo a los residuos dactilares y en la calidad de la imagen obtenida. En este sentido, futuras investigaciones podrían explorar estrategias que permitan optimizar estas propiedades para incrementar la sensibilidad y eficacia de los polvos derivados de cáscaras cítricas (Rajan et al., 2018).

Sin embargo, el principal desafío continúa siendo la validación experimental de estos materiales en condiciones reales de aplicación. Aunque las características químicas y físicas de las cáscaras cítricas sugieren que podrían funcionar como agentes reveladores, es indispensable contar con estudios que comparen directamente su desempeño frente a los polvos comerciales utilizados actualmente. Además, deben evaluarse aspectos como la estabilidad del material a lo largo del tiempo, su comportamiento sobre diferentes tipos de superficies y la calidad de las huellas obtenidas en distintos escenarios forenses.

Por otro lado, la posible incorporación de estos materiales en laboratorios forenses dependerá de la existencia de evidencia científica sólida que respalde su uso. En el ámbito

criminalístico, la confiabilidad y reproducibilidad de los resultados son requisitos fundamentales, por lo que cualquier alternativa propuesta debe demostrar que cumple con los estándares exigidos para el análisis de evidencias.

Considerando la información revisada en esta monografía, las cáscaras cítricas presentan características que respaldan su potencial como materia prima para la elaboración de polvos reveladores ecológicos. Su disponibilidad, bajo costo y naturaleza biodegradable representan ventajas importantes frente a algunos materiales convencionales. No obstante, el desarrollo de investigaciones adicionales será clave para determinar hasta qué punto estas alternativas pueden integrarse de manera efectiva en las prácticas forenses del futuro. De confirmarse su eficacia, podrían contribuir significativamente al desarrollo de metodologías más sostenibles y alineadas con los principios de la química verde.

5 CONCLUSIONES

A partir de la información analizada en esta monografía, se puede concluir que las cáscaras cítricas representan una alternativa prometedora para la elaboración de polvos reveladores ecológicos destinados a la visualización de huellas dactilares latentes. Su interés radica principalmente en su composición natural, ya que contienen compuestos como celulosa, hemicelulosa y pectinas, los cuales pueden aportar características favorables para la interacción entre las partículas del polvo y los residuos presentes en las huellas. Además, al tratarse de un residuo agroindustrial abundante, su aprovechamiento podría contribuir al desarrollo de materiales más sostenibles dentro del ámbito forense.

Durante la revisión bibliográfica también se evidenció que la eficacia de un polvo revelador no depende únicamente de su composición química, sino de un conjunto de propiedades fisicoquímicas que influyen directamente en el proceso de revelado. Entre las más importantes se encuentran la adhesión, la granulometría, la morfología de las partículas, la afinidad con los componentes de la huella y la capacidad de generar contraste sobre la superficie analizada. Estos factores determinan si el material puede adherirse de manera selectiva a las crestas papilares y permitir una visualización adecuada de los detalles dactilares.

Asimismo, se identificó que los materiales derivados de cáscaras cítricas presentan ventajas potenciales frente a algunos polvos tradicionales, especialmente por su carácter biodegradable, su bajo costo y la posibilidad de obtenerlos a partir de residuos que normalmente serían descartados. Estas características los convierten en una opción compatible con los principios de la química verde, cada vez más considerados en el desarrollo de nuevas metodologías dentro de las ciencias forenses.

Sin embargo, también se observó que la información disponible sobre la aplicación específica de cáscaras cítricas como polvos reveladores aún es limitada. Aunque los antecedentes

revisados permiten inferir un comportamiento favorable, todavía se requieren estudios experimentales que evalúen de manera directa su desempeño, reproducibilidad y eficacia sobre diferentes tipos de superficies. Por esta razón, su uso en procedimientos forenses reales continúa siendo una línea de investigación con gran potencial de desarrollo.

6 RECOMENDACIONES

Se recomienda realizar estudios experimentales que permitan evaluar directamente la capacidad de los polvos obtenidos a partir de cáscaras cítricas para revelar huellas dactilares latentes. Este tipo de investigaciones permitiría complementar la información recopilada en la literatura y determinar con mayor precisión su posible aplicación en procedimientos forenses reales.

También se sugiere profundizar en el estudio de variables relacionadas con la preparación del material, como los métodos de secado, molienda y selección granulométrica. La optimización de estas condiciones podría influir significativamente en la adhesión de las partículas, el contraste obtenido y la calidad general del revelado de las huellas.

Asimismo, sería importante incorporar técnicas de caracterización como la microscopía electrónica de barrido (SEM), con el fin de analizar el tamaño, la morfología y la distribución de las partículas obtenidas. Esta información permitiría comprender mejor la relación entre las características físicas del material y su desempeño como polvo revelador.

Se recomienda ampliar las investigaciones sobre el comportamiento de estos materiales en diferentes tipos de superficies, tanto porosas como no porosas, ya que las características del sustrato pueden influir directamente en la calidad y definición de las huellas reveladas.

Finalmente, resulta necesario desarrollar estudios comparativos entre los polvos derivados de cáscaras cítricas y los polvos comerciales utilizados actualmente en criminalística. Estas comparaciones permitirían evaluar parámetros como adhesión, contraste, facilidad de aplicación y calidad de las impresiones obtenidas, aportando evidencia científica para determinar su viabilidad como alternativa dentro del ámbito forense.

7 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Barbosa, A. G., et al. (2025). Latent fingerprint revealing material produced from industrial waste. Revista Brasileira de Criminalística, 14(2), 33–41.

Brettell, T. A. (2026). Green approaches in forensic separations—An overview. Separations, 13(3), 84. https://doi.org/10.3390/separations13030084

Champod, C., Lennard, C., Margot, P., & Stoilovic, M. (2017). Fingerprints and other ridge skin impressions (2nd ed.). CRC Press.

Clement, J. L., & Bull, P. A. (1999). Principles of the examination of fingerprint evidence. Forensic Science Communications, FBI.

Fakayode, O. A., & Abobi, K. E. (2018). Optimization of oil and pectin extraction from orange (Citrus sinensis) peels: A response surface approach. Journal of Analytical Science and Technology, 9(20), 1–16. https://doi.org/10.1186/s40543-018-0151-3

Girod, A., Ramotowski, R., & Weyermann, C. (2012). 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

Hendricks, N. R., Ali, M., Cho, H., Frank, T. A., Islam, M. N., & Mian, M. A. A. (2021). Chemical composition effect on latent print development using black fingerprint powders. Forensic Chemistry, 26, 100366. https://doi.org/10.1016/j.forc.2021.100366

Holder, E. H., Robinson, L. O., & Laub, J. H. (Eds.). (2011). The fingerprint sourcebook.

National Institute of Justice.

Kliemann, E., Simas, K. N., Amante, E. R., Prudêncio, E. S., Teófilo, R. F., & Ferreira, M. M. C. (2009). Optimisation of pectin acid extraction from passion fruit peel (Passiflora edulis flavicarpa) using response surface methodology. International Journal of Food Science & Technology, 44(3), 476–483. https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2008.01753.x

López Zepeda, J. L. (2022). Huellas dactilares y la química detrás de algunas técnicas para revelarlas. Educación Química, 33(4), 50–60. https://doi.org/10.22201/fq.18708404e.2022.4.83043

Maqbool, Z., Khalid, W., Atiq, H. T., Koraqi, H., Javaid, Z., Alhag, S. K., Al-Shuraym, L. A., Bader, D. M. D., Almarzuq, M., Afifi, M., & Al-Farga, A. (2023). Citrus waste as a source of bioactive compounds: Extraction and utilization in the health and food industries. Molecules, 28(4), 1636. https://doi.org/10.3390/molecules28041636

Rajan, R., Zakaria, Y., Shamsuddin, S., & Nik Hassan, N. F. (2018). Nanocarbon powder for latent fingermark development: A green chemistry approach. Egyptian Journal of Forensic Sciences, 8(1), 60. https://doi.org/10.1186/s41935-018-0091-5

Singh, B., Singh, J. P., Kaur, A., & Singh, N. (2020). Phenolic composition, antioxidant potential and health benefits of citrus peel. Food Research International, 132, 109114. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109114

Sodhi, G. S., & Kaur, J. (2001). Powder method for detecting latent fingerprints: A review. Forensic Science International, 120(3), 172–176. https://doi.org/10.1016/S0379-0738(00)00465-5

Ünal, B. K., Uysal, S., & Uzun, L. (2024). Greener approaches/materials for forensic sciences. Essential Chemistry, 2(1), 1–21. https://doi.org/10.1080/28378083.2024.2434238

Zema, D. A., Calabrò, P. S., Folino, A., Tamburino, V., Zappia, G., & Zimbone, S. M. (2018). Valorisation of citrus processing waste: A review. Waste Management, 80, 252–273. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.09.024

Zhang, H., Yang, Y., Zhou, Z., & Chen, F. (2021). A review of chemical constituents and health-promoting effects of citrus peels. Food Chemistry, 365, 130585. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.130585