

Artículo Original

***EVALUACIÓN DE LA CENIZA DE BAGAZO DE CAÑA DE AZÚCAR
COMO POLVO REVELADOR PARA HUELLAS DACTILARES***

***EVALUATION OF SUGAR CANE BAGASSE ASH AS A DEVELOPING POWDER
FOR FINGERPRINT DETECTION***

Jesús Rolando González Morrell¹, <https://orcid.org/0009-0002-0824-9102>

Julio Omar Prieto García², <https://orcid.org/0000-0002-9279-4412>

Alejandro Duffus Scott³, <https://orcid.org/0000-0001-9959-5697>

Juan Alberto Ribalta Quesada^{4*}, <https://orcid.org/0000-0001-7870-3863>

¹ Laboratorio Provincial de Criminalística, Santa Clara, Villa Clara, Cuba.

² Departamento de Química, Facultad de Química y Farmacia, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, Santa Clara, Villa Clara, Cuba.

³ Centro de Investigaciones de Soldadura, Facultad de Ingeniería Mecánica e Industrial, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, Santa Clara, Villa Clara, Cuba.

⁴ Centro de Investigación y Desarrollo de Estructuras y Materiales, Facultad de Construcciones, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, Santa Clara, Villa Clara, Cuba.

Recibido: Febrero 18, 2026; Revisado: Febrero 23, 2026; Aceptado: Marzo 15, 2026

RESUMEN

Introducción:

La recuperación de huellas dérmicas latentes es fundamental en la investigación criminalística. La búsqueda de reveladores efectivos, seguros y de bajo costo es una prioridad.

Objetivo:

Evaluar la calidad de la ceniza de bagazo de caña de azúcar (CBC) como polvo revelador para huellas dactilares latentes, mediante una metodología integral que considera parámetros físico-químicos, prácticos y de eficacia.

Materiales y Métodos:

Se caracterizó la CBC mediante análisis físico (densidad, porosidad) y químico (FRX).



Este es un artículo de acceso abierto bajo una Licencia *Creative Commons* Atribución-No Comercial 4.0 Internacional, lo que permite copiar, distribuir, exhibir y representar la obra y hacer obras derivadas para fines no comerciales.

* Autor para la correspondencia: Juan A. Ribalta, Email: juanrq@uclv.edu.cu



La evaluación de su desempeño como revelador se realizó aplicando una metodología adaptada que incluyó la verificación técnica, caracterización del desempeño en condiciones controladas y validación pseudo-operacional, comparándola con un estándar de referencia.

Resultados y Discusión:

La CBC presentó una densidad aparente de 0,341 g/cm³, una porosidad del 66,95 % y una superficie específica de 11,79 m²/g. Su composición química predominante, expresada en forma de óxidos fue SiO₂ (43,55 %), K₂O (18,49 %), P₂O₅ (12,85 %), SO₃ (10,05 %), CaO (6,67 %) y MgO (6,12 %). En las pruebas de revelado mostró una alta adherencia y contraste, con una Tasa de Revelado Efectivo (TRE) superior al 80 % en vidrio y acero inoxidable, sin generar falsos positivos. Su desempeño fue estadísticamente equivalente al estándar en las pruebas pseudo-operacionales.

Conclusiones:

La ceniza de bagazo de caña constituye un polvo revelador de huellas dactilares viable, efectivo y sostenible. Su calidad queda demostrada mediante una evaluación científica integral, recomendándose su incorporación en los protocolos de la criminalística cubana.

Palabras clave: bagazo de caña de azúcar; ceniza; criminalística; evaluación de calidad; huellas dactilares; polvo revelador.

ABSTRACT

Introduction:

The recovery of latent fingerprints is fundamental in criminal investigations. The search for effective, safe, and low-cost developing is a priority.

Objective:

To evaluate the quality of sugarcane bagasse ash (SBA) as a latent fingerprint developing powder using a comprehensive methodology that considers physicochemical, practical, and efficacy parameters.

Materials and Methods:

SBA was characterized through physical (density, porosity) and chemical (XRF) analysis. Its performance as a developer was evaluated using an adapted methodology that included technical verification, performance characterization under controlled conditions, and pseudo-operational validation, comparing it to a reference standard.

Results and Discussion:

SBA presented an apparent density of 0.341 g/cm³, a porosity of 66.95 %, and a specific surface area of 11.79 m²/g. Its predominant chemical composition, expressed as oxides, was SiO₂ (43.55 %), K₂O (18.49 %), P₂O₅ (12.85 %), SO₃ (10.05 %), CaO (6.67 %), and MgO (6.12 %). In development tests, it showed high adhesion and contrast, with an Effective Development Rate (EDR) exceeding 80 % on glass and stainless steel, without generating false positives. Its performance was statistically equivalent to the standard in pseudo-operational tests.

Conclusions:

Sugarcane bagasse ash is a viable, effective, and sustainable fingerprint developing powder. Its quality is demonstrated through a comprehensive scientific evaluation, and its incorporation into Cuban criminalistics protocols is recommended.

Keywords: sugarcane bagasse; ash; criminalistics; quality assessment; fingerprints; developing powder.

1. INTRODUCCIÓN

La recuperación de huellas dérmicas latentes constituye uno de los procedimientos cruciales en la investigación criminalística, ya que permite la identificación inequívoca de individuos. La eficacia de este proceso depende, en gran medida, de la aplicación de un revelador que optimice el contraste visual entre el rastro dérmico y el sustrato en el que se encuentra (Bowman, 2005; Peng & Huang, 2026). Tradicionalmente, los reveladores se han clasificado en físicos y químicos, una dicotomía que resulta insuficiente para evaluar de manera integral su calidad, al centrarse únicamente en el mecanismo de acción y no en criterios metrológicos de desempeño (Bleay et al., 2018; Posada, 2018).

En la práctica criminalística cubana, la evaluación de estos productos ha dependido frecuentemente de la experiencia subjetiva del perito, careciendo de un protocolo estandarizado y objetivo. Esta brecha metodológica justifica el desarrollo y aplicación de enfoques integrales de evaluación, como la metodología propuesta por los autores de este estudio, fundamentada en Kent (2010) y Sears et al., (2012), la cual supera las limitaciones de las clasificaciones tradicionales al medir atributos universales de desempeño, como sensibilidad, especificidad, robustez y seguridad, aplicables a cualquier tipo de revelador.

Paralelamente, la creciente demanda de tecnologías forenses sostenibles y de bajo costo ha incentivado la exploración de materiales alternativos derivados de residuos agroindustriales. En este contexto, la ceniza de bagazo de caña de azúcar (CBC), un subproducto abundante de la industria azucarera, emerge como un candidato prometedor (Kolawole et al., 2021; Kardam et al., 2023). Diversos estudios han caracterizado la CBC, reportando una composición química dominada por óxidos de silicio (SiO_2), potasio (K_2O), calcio (CaO), magnesio (MgO) y fósforo (P_2O_5), con una significativa presencia de material silíceo amorfo (Agwa et al., 2022; Khatun et al., 2024). Esta composición, junto con su morfología y alta porosidad, reportada en investigaciones sobre su uso en cementos y cerámicas, Althaqafi et al. (2024), sugiere propiedades físico-químicas ideales para la adhesión a los componentes de los residuos dactilares. La sílice amorfa, en particular, es conocida por su alta reactividad superficial y capacidad de adsorción. Hasta donde alcanza el conocimiento de los autores, no existen reportes públicos previos que exploren el uso directo de la ceniza de bagazo de caña de azúcar como polvo revelador para huellas dactilares, lo que convierte a esta investigación en un aporte pionero.

El objetivo de este trabajo es evaluar la calidad de la ceniza de bagazo de caña de azúcar (CBC) como polvo revelador para huellas dactilares latentes, mediante una metodología integral que considera parámetros físico-químicos, prácticos y de eficacia.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Materiales

Para la evaluación de la calidad como revelador de huellas dérmicas latentes se utilizaron los siguientes materiales:

Material en estudio: Ceniza de bagazo de caña (CBC), obtenida como subproducto de la combustión en un ingenio azucarero de la provincia de Villa Clara, Cuba.

Estándar de referencia: Polvo revelador negro magnético de uso convencional en la criminalística cubana (Marca SIRCHIE®, recibido en 2025), empleado para la comparación en las pruebas de desempeño.

Sustratos para pruebas de revelado: Se seleccionaron superficies de relevancia criminalística, representativas de materiales no porosos y porosos: vidrio laminado, acero inoxidable, PVC y papel bond (hoja tipo A4 de color blanco).

Donantes de huellas: Se contó con un panel de 10 donantes adultos sanos, seleccionados para representar variabilidad en género y grupo etario, los mismos se abstuvieron de usar lociones o cremas en las manos 2 horas antes de la deposición de las huellas y, para enriquecer el residuo con componentes sebáceos, frotaron las yemas de los dedos por la frente 30 minutos previos al ensayo.

2.2. Caracterización fisicoquímica del material

La caracterización de la CBC se realizó para determinar las propiedades inherentes que pueden influir en su desempeño como revelador pulverulento. Los análisis se realizaron por duplicado.

Densidad aparente (ρ_a) y Porosidad: Se determinó por picnometría de helio, utilizando un picnómetro de volumen fijo (Modelo AccuPyc II 1340, Micromeritics). La porosidad (ε) se calculó mediante la ecuación 1, donde ρ_r es la densidad real y ρ_a la densidad aparente.

$$\varepsilon (\%) = \left(\frac{\rho_r - \rho_a}{\rho_r} \right) * 100 \quad (1)$$

La composición elemental se obtuvo por Espectrometría de Fluorescencia de Rayos X (FRX) en un equipo Bruker S2 Ranger, con ánodo de Rh y detector SDD.

2.3. Metodología para la evaluación de la calidad

Se aplicó una adaptación de la metodología propuesta por los autores de este estudio para la evaluación estandarizada de los reveladores de huellas dérmicas, bajo un diseño cuasi-experimental, reconocido como robusto para contextos donde la asignación aleatoria completa es inviable (Doyle, 2019). El flujo metodológico integral que se presenta es: *Caracterización» Verificación técnica» Evaluación controlada» Validación pseudo-operacional*. Las variables dependientes se operacionalizaron mediante los protocolos estandarizados de la metodología.

2.3.1. Verificación técnica y de seguridad

Humedad residual: Se determinó por gravimetría. Se secaron 5 g de CBC (balanza analítica, $\pm 0,0001$ g) en estufa a 105 ± 2 °C hasta masa constante. El porcentaje de humedad se calculó con la ecuación 2 para un criterio de aceptación ≤ 2 %.

$$\% \text{ Humedad} = \left(\frac{\text{Masa húmeda} - \text{Masa seca}}{\text{Masa húmeda}} \right) * 100 \quad (2)$$

Adherencia específica (AE): Para cuantificar la capacidad del polvo para adherirse selectivamente a los residuos de las huellas latentes, se implementó un protocolo estandarizado. Sobre un sustrato de vidrio con una huella latente natural depositada y seca en condiciones controladas (23 ± 2 °C; 50 ± 5 % HR), se determinó la masa del sustrato con la huella (m_s+h). Tras la aplicación de la CBC con brocha a 45° , se pesó el conjunto (m_{ti}) para calcular la masa total de polvo aplicado según la ecuación 3.

$$m_{tpa} = m_{ti} - m_s + h \quad (3)$$

El sustrato se sometió luego a vibración controlada utilizando un mezclador vórtex con adaptador de plataforma plana modelo VWR, ajustado a una velocidad media (frecuencia aproximada de 50 Hz) durante 30 segundos, para eliminar el polvo no adherido y se volvió a pesar (m_{tf}) para obtener la masa de polvo efectivamente adherido (ecuación 4).

$$m_{pad} = m_{tf} - m_s + h \quad (4)$$

La adherencia específica (AE) se calculó como el porcentaje de polvo retenido (ecuación 5). El criterio de aceptación para sustratos no porosos es $\geq 5\%$, acompañado de una evaluación visual que confirmó la nitidez de la huella revelada.

$$AE(\%) = \frac{m_{pad}}{m_{tpa}} * 100 \quad (5)$$

2.3.2. Evaluación del comportamiento en condiciones controladas

Todas las pruebas se realizaron bajo condiciones ambientales controladas (23 ± 2 °C; 50 ± 5 % HR).

Escala de calidad del revelado: La calidad de las huellas reveladas se evaluó de forma ciega por dos evaluadores independientes, utilizando la escala ordinal validada que se presenta en la tabla 1.

Sensibilidad (Límite de detección efectivo - LDE): Se empleó el método de series de depleción. Un donante depositó una serie de contactos sucesivos (N=15 para no sustratos porosos, N=10 para porosos) con el mismo dedo. El sustrato se dividió longitudinalmente y cada mitad se procesó, de forma comparativa, con la CBC y el estándar. El LDE se define como el número de la última huella en la serie que obtuvo una puntuación ≥ 3 .

Tabla 1. Escala de puntuación para la evaluación de la calidad del revelado

<i>Puntuación</i>	<i>Descripción cualitativa</i>	<i>Criterio cuantitativo (Área con crestas nítidas)</i>
0	Sin revelado	0 %
1	Revelado muy débil	< 10 %; crestas no continuas
2	Revelado parcial (Adecuado)	10 % - 33 %; crestas discontinuas
3	Revelado bueno (Identificable)	34 % - 66 %; crestas continuas

Especificidad y estudio multidonante (TRE y TFP): Se emplearon 10 donantes sanos los cuales depositaron huellas naturales en vidrio y papel. Se incluyeron controles negativos (sustratos limpios). Se calculó la TRE (porcentaje de huellas con puntuación ≥ 3) y la TFP (porcentaje de controles que mostraron reacción inespecífica).

Robustez: Se evaluó el efecto del envejecimiento de las huellas (1, 7 y 30 días) y del tipo de sustrato (vidrio, acero, PVC, papel) sobre la puntuación de calidad.

2.3.3. Validación pseudo-operacional comparativa

Se realizó un estudio comparativo ciego para simular condiciones operativas. Se recolectaron 60 objetos de desecho (30 de vidrio, 30 de metal) con historial de manejo real. Tras una cuarentena de 72 h, los objetos fueron asignados aleatoriamente a dos grupos:

- *Grupo experimental (CBC):* n = 30 objetos.
- *Grupo control (Estándar):* n = 30 objetos.

Un único perito procesó los objetos, siguiendo los protocolos oficiales. Un perito evaluador, ciego a la asignación, determinó para cada objeto la presencia o ausencia de al menos una huella identificable (*puntuación ≥ 3*). La efectividad se midió como la proporción de objetos exitosos en cada grupo.

2.4. Análisis estadístico

El análisis de datos se realizó con el software SPSS v.25. El nivel de significación se estableció en $\alpha=0,05$. Para la comparación del Límite de Detección Efectivo (LDE), que constituye datos de razón pareados, se utilizó la prueba "t" de Student para muestras relacionadas. La comparación de las proporciones de objetos exitosos entre grupos en la validación pseudo-operacional se realizó mediante la prueba de Chi-cuadrado (χ^2). El tamaño de muestra para esta prueba (n=30 por grupo) se calculó para detectar un tamaño del efecto grande ($w = 0,5$) con una potencia estadística ($1-\beta$) del 80 %. Para el análisis del efecto de variables categóricas independientes (sustrato, tiempo de envejecimiento) sobre la puntuación de calidad (variable ordinal), se emplearon pruebas no paramétricas (Kruskal-Wallis para más de dos grupos y U de Mann-Whitney para la comparación por pares).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Caracterización fisicoquímica de la ceniza de bagazo de caña: fundamentos de su eficacia como revelador

La caracterización exhaustiva de la CBC reveló propiedades intrínsecas que explican su alto desempeño posterior como revelador. La tabla 2 muestra que la CBC posee una combinación ideal de baja densidad aparente ($0,341 \text{ g/cm}^3$) y alta porosidad (66,95 %). Estas características, en conjunto, según los autores de este estudio, pudieran determinar una excelente fluidez y una elevada capacidad de adhesión por capilaridad hacia los componentes lipídicos de las huellas dérmicas. La superficie específica ($11,79 \text{ m}^2/\text{g}$) resulta óptima para la interacción con los residuos dérmicos, sin llegar a una finura extrema que promueva la aglomeración.

Tabla 2. Propiedades físicas de la ceniza de bagazo de caña

<i>Parámetro</i>	<i>Valor</i>
Tamaño de partícula máximo (mm)	0,125
Densidad aparente (g/cm^3)	$0,341 \pm 0,025$
Densidad real (g/cm^3)	$1,032 \pm 0,015$
Porosidad (%)	$66,95 \pm 0,01$
Compresibilidad (%)	$20,88 \pm 0,04$
Superficie específica (m^2/g)	11,79

La composición química elemental (tabla 3) confirmó el predominio de una matriz silícica (43,55 % SiO_2) enriquecida con óxidos de potasio, fósforo y calcio.

Tabla 3. Composición química de la ceniza de bagazo de caña

<i>Componente</i>	<i>Contenido (%)</i>
SiO_2	43,55
K_2O	18,49
P_2O_5	12,85
SO_3	10,05
CaO	6,67
MgO	6,12
Cl	1,17
Fe_2O_3	0,60
MnO	0,48

Desde el punto de vista mineralógico las cenizas de bagazo de caña suelen estar constituidas por varias fases cristalinas, siendo el cuarzo la fase más abundante (Lima et al., 2021; Castro et al., 2025). Además de cuarzo, se ha reportado la presencia de cristobalita (Thomas et al., 2021), calcita, óxido férrico, hematita, mullita y fosfato de calcio y carbonato de potasio, microcline y feldespato (Seroka et al., 2022). Adicionalmente a las fases inorgánicas cristalinas se ha reportado la presencia de carbón, en forma de una fracción orgánica pirolizada (Rojas et al., 2023; Yaseen, 2024) y sílice amorfa (Francioso, et al., 2024). Esta composición y estructura confieren al material una

alta estabilidad química. La presencia de sílice amorfa (SiO_2) es clave: sus grupos silanol (Si-OH) superficiales forman enlaces de hidrógeno con los componentes polares del residuo dactilar, mientras que la alta porosidad (66,95 %) favorece la adsorción capilar de los lípidos (Bleay et al., 2018). No se detectaron componentes altamente nocivos para la salud, lo que sugiere un perfil de riesgo favorable para el usuario durante su aplicación, minimizando la probabilidad de reacciones secundarias de degradación con el sustrato o los residuos dérmicos durante el revelado.

3.2. Evaluación del desempeño: equivalencia operativa con estándares convencionales

La CBC superó la verificación técnica preliminar. El porcentaje de humedad residual (1,5 %) estuvo por debajo del límite máximo (2 %), lo que garantiza una fluidez óptima y evita la aglomeración. La adherencia específica en vidrio fue del 7 %, superando el criterio del 5 % y demostrando una excelente capacidad para fijarse a los residuos dérmicos.

En la evaluación de la sensibilidad, el límite de detección efectivo (LDE) de la CBC no mostró diferencias estadísticamente significativas frente al estándar comercial (prueba t para muestras relacionadas, $p > 0,05$). Como se aprecia en la figura 1, la CBC fue capaz de revelar huellas hasta contactos sucesivos avanzados en la serie de depleción, demostrando una alta sensibilidad para detectar huellas con carga mínima de residuo.

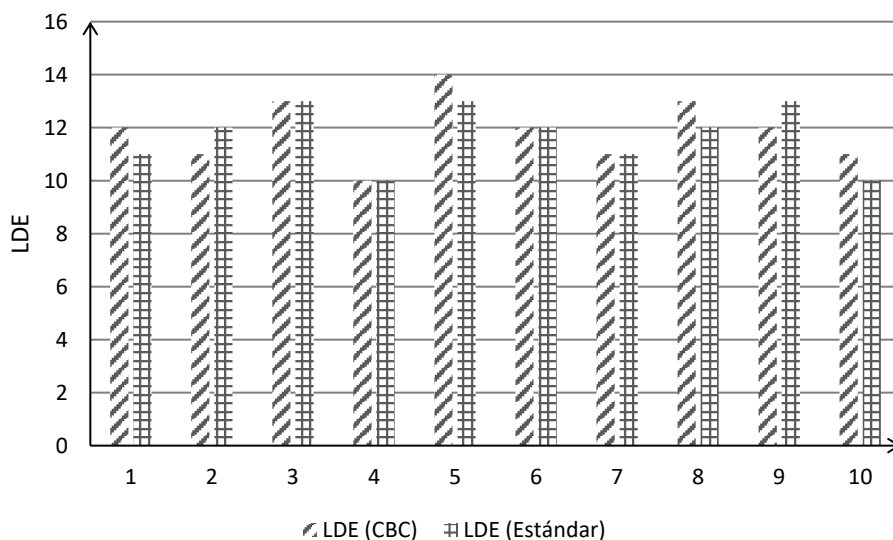


Figura 1. Comparación del LDE entre la CBC y el estándar en sustrato de vidrio

La especificidad del material fue del 100 %, ya que no se produjo ningún falso positivo en los controles negativos (TFP = 0 %). Esto confirma que la CBC no reacciona de forma inespecífica con los sustratos limpios, evitando interferencias en la interpretación pericial. Los resultados de la robustez frente a diferentes sustratos y tiempos de envejecimiento se resumen en la figura 2. La CBC mostró un desempeño excelente y consistente en superficies no porosas, manteniendo una Tasa de Revelado Efectivo (TRE) superior al 80 % en vidrio y acero inoxidable para huellas de hasta 7 días. Como era de esperar, para un polvo de naturaleza física, su eficacia en superficies porosas (papel) fue limitada, lo que es consistente con el comportamiento de los reveladores pulverulentos convencionales.

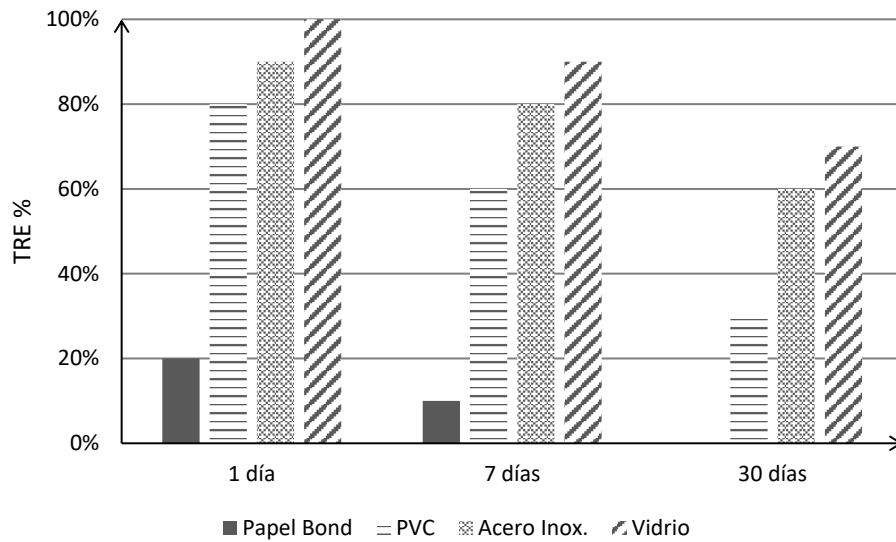


Figura 2. Tasa de revelado efectivo (TRE %) de la CBC en función del sustrato y el tiempo de envejecimiento

La validación pseudo-operacional, que simula condiciones reales de trabajo, constituyó la prueba más contundente de su eficacia. El análisis estadístico no reveló diferencias significativas en la proporción de objetos con al menos una huella identificable entre el grupo de la CBC (76 %) y el grupo del estándar (72 %) (prueba de $\chi^2 = 0,32$; $p = 0,57$). Este hallazgo es crucial, ya que demuestra de manera objetiva que la CBC posee una efectividad operativa equivalente a la de un producto comercial de referencia. La figura 3 muestra un ejemplo representativo del alto nivel de detalle obtenido con la CBC, donde se aprecian crestas papilares nítidas y continuas, aptas para la identificación.



Figura 3. Huella dactilar revelada con CBC sobre vidrio

*La barra de escala representa 1 cm como referencia

Los resultados obtenidos demuestran de manera consistente y robusta que la ceniza de bagazo de caña no es solo una alternativa viable, sino un revelador de alta calidad y desempeño equivalente a los estándares comerciales. Su éxito se fundamenta en propiedades físico-químicas únicas (alta porosidad, composición estable) que se traducen directamente en una alta sensibilidad, especificidad y robustez en superficies no porosas. Más allá del desempeño técnico, la CBC representa un cambio de paradigma hacia la sostenibilidad en la criminalística. Al valorar un residuo agroindustrial abundante en Cuba: I) se resuelve un problema de disposición de residuos, II) se crea un insumo estratégico de alto valor añadido, y III) se reduce drásticamente la dependencia de importaciones, con el consiguiente ahorro de divisas. Su implementación no solo fortalece las capacidades técnicas nacionales, sino que se alinea perfectamente con los principios de la economía circular y la soberanía tecnológica.

Es importante señalar una limitación de este estudio. Si bien la composición química identificada no sugiere riesgos toxicológicos agudos y el manejo durante la investigación no generó incidentes, este trabajo no incluyó ensayos específicos de toxicidad (ej., aguda, irritabilidad dérmica). Por lo tanto, se recomienda que futuros estudios, previos a una implementación a gran escala, caractericen formalmente el perfil de seguridad, estableciendo los protocolos de manejo correspondientes. Esta precaución es estándar para la introducción de cualquier nuevo material pulverulento en este entorno.

4. CONCLUSIONES

1. La ceniza de bagazo de caña caracterizada en este estudio posee un conjunto de propiedades físico-químicas (alta porosidad, composición silícica estable y estructura mixta) que la convierten en un material idóneo para su uso como revelador pulverulento de huellas dérmicas latentes.
2. La evaluación integral bajo una metodología estandarizada demostró que la CBC es un revelador de alta calidad, con un desempeño estadísticamente equivalente al estándar comercial de referencia en cuanto a sensibilidad (LDE), especificidad (TFP = 0 %) y efectividad operacional en superficies no porosas.
3. La implementación de la CBC en los protocolos de la criminalística cubana representa una solución innovadora, sostenible y de bajo costo. Esta propuesta no solo mejora las capacidades técnicas periciales, sino que constituye un ejemplo concreto de economía circular, agregando valor a un subproducto de la industria azucarera y fortaleciendo la soberanía tecnológica del país.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Laboratorio Provincial de Criminalística de Villa Clara y a los departamentos de Química, Facultad de Química y Farmacia; Centro de Investigaciones de Soldadura, Facultad de Ingeniería Mecánica e Industrial y Centro de Investigación y Desarrollo de Estructuras y Materiales, Facultad de Construcciones, de la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, por el apoyo institucional y técnico prestado para la realización de esta investigación.

REFERENCIAS

- Agwa, I. S., Zeyad, A. M., Tayeh, B. A., Adesina, A., de Azevedo, A. R. G., Amin, M., & Hadzima-Nyarko, M. (2022). A comprehensive review on the use of sugarcane bagasse ash as a supplementary cementitious material to produce eco-friendly concretes. *Materials Today: Proceedings*, 65(2), 688-696. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.03.264>
- Althaqafi, E., Ali, T., Qureshi, M. Z., Islam, S., Ahmed, H., Ajwad, Ali., Almujiabah, H., & Khan, M. A. (2024). Evaluating the combined effect of sugarcane bagasse ash, metakaolin, and polypropylene fibers in sustainable construction. *Scientific Reports*, 14, 26109. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-76360-7>
- Bleay, S. M., Croxton, R. S., & de Puit, M. (2018). *Fingerprint development techniques: Theory and application*. John Wiley & Sons Ltd. <https://doi.org/10.1002/9781119187400>
- Bowman, V. (2005). *Fingerprint development handbook* (2nd ed.). St Albans: Home Office Scientific Development Branch. (Publication; no 1/05).
- Castro, M. V. B. d. S., Andrade, D. S. C., & Almeida, Y. M. B. d. A. (2025). Characterization and evaluation of sugarcane bagasse ash for application as a filler in polymer composites. *Revista de Gestão Social e Ambiental*, 19(10), e013523. <https://doi.org/10.24857/rgsa.v19n10-012>
- Doyle, S. (2019). *Quality management in forensic science*. Academic Press. <https://doi.org/10.1016/C2015-0-04588-9>
- Francioso, V., Lemos, E. D., Elgaali, H. H., Moro, C., Rojas, M. A., & Velay, M. (2024). Valorization of sugarcane bagasse ash as an alternative SCM: Effect of particle size, temperature-cross-over effect mitigation & cost analysis. *Sustainability*, 16(21), 9370. <https://doi.org/10.3390/su16219370>
- Kardam, V. K., Sharma, P., & Sharma, N. (2023). Reviewed mechanical properties of sugarcane bagasse as partial replacement of cement in concrete. *AIP Conference Proceedings*, 2721(1), 020049. <https://doi.org/10.1063/5.0154000>
- Kent, T. (2010). Standardizing protocols for fingerprint reagent testing. *Journal of Forensic Identification*, 60(3), 371–379.
- Khatun, A., Reddy, V. P., Chandrashekar, R., Sravanthi, M., Kumar, M., & Kumar, C. V. (2024). *Experimental analysis of sugarcane bagasse ash behavior as a partial replacement for cement in concrete mix*. E3S Web Conferences 596, 01024. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202459601024>
- Kolawole, J. T., Babafemi, A. J., Fanijo, E., Paul, S. C., & Combrinck, R. (2021). State-of-the-art review on the use of sugarcane bagasse ash in cementitious materials. *Cement and Concrete Composites*, 118, 103975. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.103975>
- Lima, V. M. E., Barros, L. C., & Melo, A. A. (2021). Characterization of sugarcane bagasse ash (SBA) and its evaluation for use in alkali-activated slag mixtures. *Cerâmica*, 67(381), 123–130. <https://doi.org/10.1590/0366-69132021673813038>
- Peng, A., & Huang, R. (2026). Research progress on the application of deep learning in fingerprint recognition. *Pattern Recognition*, 171(A), 112216. <https://doi.org/10.1016/j.patcog.2025.112216>
- Posada, J. A. (Ediciones Centinela). (2018). La revelación de las huellas dérmicas. 135.
-

- Rojas, J. T., Bazán, J., Rodríguez, M. P., Flores, A. C., & del Carpio, F. (2023). Effect of sugarcane bagasse ash on the mechanical properties of pervious concrete. *Salud, Ciencia y Tecnología - Serie de Conferencias*, 2(337). <https://doi.org/10.56294/sctconf2023337>
- Sears, V. G., Bleay, S. M., Bandey, H. L., & Bowman, V. J. (2012). A methodology for finger mark research. *Science & Justice*, 52(3), 145–160. <https://doi.org/10.1016/j.scijus.2011.10.006>
- Seroka, N. S., Taziwa, R., & Khotseng, L. (2022). Green synthesis of crystalline silica from sugarcane bagasse ash: Physico-chemical properties. *Nanomaterials*, 12(13), 2184. <https://doi.org/10.3390/nano12132184>
- Thomas, B. S., Yang, J., Bahurudeen, A., Abdalla, J. A., Hawileh, R. A., Hamada, H. M., Nazar, S., Jittin, V., & Ashish, D. K. (2021). Sugarcane bagasse ash as supplementary cementitious material in concrete – a review. *Materials Today Sustainability*, 15, 100086. <https://doi.org/10.1016/j.mtsust.2021.100086>
- Yaseen, N. (2024). Exploring the potential of sugarcane bagasse ash as a sustainable supplementary cementitious material: Experimental investigation and statistical analysis. *Results in Chemistry*, 10, 101723. <https://doi.org/10.1016/j.rechem.2024.101723>

CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores declaran que no existen conflictos de interés.

CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES

- M.Sc. Jesús Rolando González Morrell. Conceptualización, investigación, metodología, redacción – primera redacción.
 - Dr.C. Julio Omar Prieto García. Análisis formal, conceptualización, redacción - revisión y edición, supervisión.
 - Dr.C. Alejandro Duffus Scott. Análisis formal, investigación, redacción - revisión y edición.
 - M.Sc. Juan Alberto Ribalta Quesada. Análisis formal, investigación.
-