

Caracterización fisicoquímica y mineralógica de ceniza de bagazo de caña para la valorización sustentable

Physicochemical and mineralogical characterization of sugarcane bagasse ash for sustainable valorization

Isaura Victoria Fernández-Orozco¹ , Salvador Juárez-Zirate² , Angélica Silvestre López Rodríguez¹ , Juan Carlos Díaz Guillen³ , Laura Lorena Díaz-Flores^{1*} , Juan José Alvarado-Gil⁴ 

¹Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. Carretera Cunduacán-Jalpa Km. 1, La Esmeralda, CP. 86690. Cunduacán, Tabasco, México.

²Tecnológico Nacional de México. Av. Tecnológico 1500, Lomas de Santiaguito, CP. 58120. Morelia, Michoacán, México.

³InnovaBienestar de México. Ciencia y Tecnología 790, Saltillo 400. CP. 25290. Saltillo, Coahuila, México.

⁴Cinvestav-Unidad Mérida. Carretera Antigua a Progreso Km. 6, A.P. 73 Cordemex, CP. 97310. Mérida, Yucatán, México.

*Autor de correspondencia: laura-diaz@ujat.mx

Artículo científico

Recibido: 18 de septiembre 2025

Aceptado: 01 de mayo 2026

RESUMEN. La ceniza de bagazo de caña (CBC) es un residuo agroindustrial generado masivamente, con implicaciones ambientales y sanitarias. Las propiedades de la CBC dependen de factores agronómicos y de condiciones de calcinación, por lo que su caracterización local es esencial para su aprovechamiento sustentable. En este trabajo se realizó una evaluación fisicoquímica de la CBC del Ingenio Presidente Benito Juárez (IPBJ) en Tabasco, México y se discute la procedencia de sus componentes en la dinámica suelo-planta-industria incluido sus usos potenciales. Mediante técnicas avanzadas de análisis químico se determinaron parámetros morfológicos, contenido de óxidos, niveles de metales pesados y arreglo cristalino de las fases presentes. La CBC analizada consistió en una mezcla heterogénea de partículas con morfología y composición química variada. Se observaron niveles altos de materia orgánica (MO) ($9.6 \pm 0.7\%$), pérdida por ignición (LOI) a $950\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($16.38 \pm 3.2\%$), vanadio (62.3 mg kg^{-1}) y cromo (233.7 mg kg^{-1}). La suma de SiO_2 , Al_2O_3 y Fe_2O_3 representó el 74.55% en peso, siendo el SiO_2 la fase dominante en su forma α y β cuarzo. Otras fases presentes fueron albita, gismondina y óxido de grafeno reducido (rGO). Los niveles de metales pesados en la CBC analizada hacen cuestionable su uso como fertilizante. Si bien la cristalinidad del SiO_2 indica una actividad pozzolánica baja, su naturaleza silíceo y silico-aluminosa sugiere un uso potencial en la industria cerámica, siempre que se realicen pretratamientos de adecuación.

Palabras clave: Espectroscopía Raman, fitolitos, metales pesados, óxido de grafeno, silicatos.

ABSTRACT. Sugarcane bagasse ash (SBA) is a massively generated agroindustrial waste with significant environmental and health implications. The SBC properties depend on agronomic factors and calcination conditions. Therefore, a local characterization of SBC is essential for correct sustainable management. This study conducted a physicochemical evaluation of SBC from the Ingenio Presidente Benito Juárez (IPBJ) sugar mill in Tabasco, Mexico, and discusses the origin of its components within the soil-plant-industry dynamic, addressing potential uses. We determined morphology, oxide content, heavy metal levels, and crystal structures of the phases present by using advanced chemical analysis techniques. The SBC consisted of a heterogeneous mixture of particles with varied morphology and chemical composition. The SBC consisted of a heterogeneous mixture of particles with varied morphology and chemical composition. High levels of organic matter (OM) ($9.6 \pm 0.7\%$), loss on ignition (LOI) at $950\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($16.38 \pm 3.2\%$), vanadium (62.3 mg kg^{-1}), and chromium (233.7 mg kg^{-1}) were identified. The total sum of SiO_2 , Al_2O_3 , and Fe_2O_3 was 74.55%, with SiO_2 being the dominant phase identified in its α - and β -quartz forms. Other phases, such as albite, gismondine, and reduced graphene oxide (rGO), were also detected. The levels of heavy metals found make questionable use of the SBC analyzed as fertilizer. Although the crystallinity of SiO_2 indicates low pozzolanic activity, its siliceous and silico-aluminous nature suggests potential use in the ceramic industry by applying suitable pre-treatments.

Keywords: Raman spectroscopy, phytoliths, heavy metals, graphene oxide, silicates.

Como citar: Fernández-Orozco IV, Juárez-Zirate S, López Rodríguez AS, Díaz Guillen JC, Díaz-Flores LL, Alvarado-Gil JJ (2026) Caracterización fisicoquímica y mineralógica de ceniza de bagazo de caña para la valorización sustentable. Ecosistemas y Recursos Agropecuarios 13(2): e4769. DOI: 10.19136/era.a13n2.4769.

INTRODUCCIÓN

El bagazo de la caña de azúcar (BCA) es un subproducto fibroso resultante de la extracción del jugo de la caña, comúnmente utilizado como biomasa para la cogeneración de energía mediante su calcinación. Este material posee alto poder calorífico, cercano a 8000 kJ kg⁻¹, atribuible a su composición rica en celulosa (32 - 45%), lignina (17 - 32%) y hemicelulosa (20 - 32%) (Kumar *et al.* 2021). Sin embargo, como resultado de este proceso, se genera de forma masiva ceniza de bagazo de caña (CBC), la cual contamina vertederos, cuerpos de agua y el aire, lo que provoca daños ambientales y de salud (Sakib *et al.* 2023). Según el USDA (2024), la producción mundial de azúcar en el ciclo 2023/24 alcanzó los 186 millones de toneladas métricas, y se estima que anualmente se genera cerca de 11 millones de TM de ceniza, basado en que por cada 1000 kg de caña procesada se producen ~ 250 kg de BCA, 102 kg de azúcar y 6 kg de CBC (Abdullayev *et al.* 2019, Maldonado-García *et al.* 2018). En México, octavo productor mundial de azúcar con cerca de 5 millones de TM (CONADESUCA 2024), la generación anual de este residuo alcanza aproximadamente 295 mil TM.

Cualquier propuesta de aplicación de la CBC debe partir del conocimiento de sus propiedades fisicoquímicas y mineralógicas. Las características finales de este residuo están sujetas a factores inherentes a la naturaleza de la planta a las condiciones de cultivo y de cosecha, así como a los parámetros de combustión (Clark *et al.* 2017). La CBC es una mezcla de óxidos (SiO₂, CaO, Al₂O₃, Fe₂O₃, Na₂O, K₂O, MgO, MnO, TiO₂, P₂O₅, SO₃, etc.) de los cuales el contenido de SiO₂ supera el 60% en peso, y este óxido puede encontrarse en fase amorfa o en distintas estructuras polimórficas (Clark *et al.* 2017, Zhang *et al.* 2020). Con base en la norma ASTM C 618-22, la CBC posee actividad puzolánica cuando la suma de SiO₂, Al₂O₃ y Fe₂O₃ es mayor al 70% y las pérdidas por ignición (LOI) no superen el 10%. Esta propiedad se refiere a la capacidad de la ceniza amorfa para reaccionar con hidróxido de calcio [Ca(OH)₂] y formar de compuestos de hidratación similares a los generados durante la hidratación del clínker del cemento (Cordeiro *et al.* 2019). En contrapartida, cuando la CBC no cumple con estas especificaciones y además presenta SiO₂ cristalino como fase dominante en lugar de amorfa la ceniza se considera inerte lo que indica que no presente reacción puzolánica (Sakib *et al.* 2023).

El contenido elevado de SiO₂ en la CBC tiene origen en la capacidad de la planta de caña de azúcar para acumular silicio (Si) en sus tejidos, en estructuras microscópicas de sílice biogénica amorfa (SiO₂·nH₂O) llamada fitolitos (Liu *et al.* 2025, Xu *et al.* 2023). Las variedades más comunes en el cultivo de caña son la *Saccharum officinarum* y *Saccharum spontaneum*, conocidas por demandar cantidades grandes de Si a razón de 300 - 700 kg de Si ha⁻¹; que concentran entre 0.1 - 10% de Si de su peso en seco (Majumdar y Prakash 2020). La importancia del Si en el cultivo de caña de azúcar radica en su participación en fenómenos fisiológicos relacionados al crecimiento y al desarrollo de mecanismos protectores contra el estrés biótico y abiótico de la planta (Dutra *et al.* 2023, Jain, 2025).

Durante la calcinación del BCA, la materia orgánica se oxida (C₆H₁₂O₆ + 6O₂ + calor → 6CO₂ ↑ + 6H₂O + energía) y ocurren cambios en el arreglo cristalino de las fases presentes (Addis *et al.* 2023). Parámetros de combustión como la temperatura, velocidad, tiempo de calentamiento, así como la eficiencia del horno, influyen en las características finales de la ceniza como el contenido carbonoso, tipo y distribución de fases, tamaño de partículas, porosidad entre otros parámetros (Clark *et al.* 2017, Ouedraogo *et al.* 2022). Además, la presencia de impurezas de tierra, arena y pequeñas rocas

adheridas a la biomasa incorporan minerales del orden de los silicatos como feldespatos, cuarzo y cristobalita (Cordeiro *et al.* 2019, Prabhath *et al.* 2022). En condiciones controladas de laboratorio, las temperaturas de calcinación reportadas como óptimas para obtener ceniza amorfa se encuentran en el rango de 500 - 600 °C (De-Sande *et al.* 2021). No obstante, en la industria, las temperaturas de operación no se desarrollan de forma controlada y pueden oscilar entre 600 - 1000 °C; lo que da como resultado cenizas heterogéneas propensas a presentar simultáneamente tanto fases cristalinas como material orgánico mal calcinado (De Sande *et al.* 2021, Cordeiro *et al.* 2019).

Tradicionalmente, la CBC se ha utilizado como fertilizante en campos agrícolas debido a su elevado contenido mineral (Dombinov *et al.* 2022, Rubio *et al.* 2023). Sin embargo, diversos autores coinciden en que esta práctica no es segura por varias razones: contiene alto contenido de material inorgánico y carbono residual difícil de degradar, lo que provoca cambios en las características fisicoquímicas del suelo; presenta partículas ultrafinas (< 0.5 µm) que se dispersan fácilmente en el aire, lo que ocasiona daños respiratorios a humanos y animales; posee trazas de metales pesados que pueden acumularse en los suelos y sustratos, con efectos negativos sobre el rendimiento de los cultivos comprometiendo la seguridad alimentaria; y, en suelos con presencia de óxido de calcio (CaO), si la CBC posee alta actividad puzolánica, puede inducir reacciones que conducen al endurecimiento subterráneo que altera el equilibrio bioquímico del suelo (Patel 2020, De-Sande *et al.* 2021).

Basándose en la naturaleza sílico-aluminosa de la CBC, se han explorado otras alternativas que aporten valor agregado a este residuo en equilibrio con la sostenibilidad ambiental. De acuerdo con el estado del arte, las propiedades fisicoquímicas y mineralógicas de la CBC determinan sus posibles aplicaciones. La CBC con actividad puzolánica presenta gran potencial como material cementante en concreto (Berenguer *et al.* 2020, Sakib *et al.* 2023), estabilizante de suelos (Garba *et al.* 2025) y materia prima en la síntesis de geopolímeros y zeolitas (Clark *et al.* 2017, Oliveira *et al.* 2019, Yoldi *et al.* 2019). En el caso de que la ceniza sea poco reactiva o inerte, por su concentración alta en cuarzo, se ha reportado su uso como sustituto parcial de arena en morteros de construcción (De Sande *et al.* 2021) y en la elaboración de cerámicos (Addis *et al.* 2023). Además, de la fracción carbonosa es posible obtener carbono amorfo, carbono activado, grafito y estructuras precursoras de grafeno (Urade *et al.* 2022, Darmawan *et al.* 2024).

Dado que diversos factores influyen en las propiedades fisicoquímicas de la CBC, es recomendable que cada región cañera en México realice su caracterización como base para proponer alternativas de aprovechamiento sustentable. En este contexto, el presente estudio tiene como objetivo evaluar las propiedades fisicoquímicas y mineralógicas de la CBC generada en el Ingenio Presidente Benito Juárez (IPBJ), principal productor de azúcar en Tabasco, ubicado en el municipio de Cárdenas. Aunque la entidad ocupa el sexto lugar nacional con una producción anual de ~217 mil toneladas de azúcar según la zafra 2023/24 (CONADESUCA 2024), no existen estudios sistemáticos de este residuo en sus ingenios. Esta ausencia de información limita el diseño de estrategias locales de aprovechamiento y subraya la pertinencia de esta investigación como fundamento para propuestas de uso sustentable en la región.

MATERIALES Y MÉTODOS

Localización

El área de estudio se localizó en la planta azucarera del IPBJ, situada en el municipio de Cárdenas, Tabasco, México con coordenadas geográficas 18° 0' 16" LN, 93° 34' 55" LO. La temperatura y precipitación media anual de la región son de 28.2 °C y 1791 mm respectivamente (SMN 2024).

Recolección de la muestra

Durante tres días se recolectaron 100 kg de ceniza de bagazo de caña (CBC) proveniente de hornos y tolvas del IPBJ bajo las siguientes condiciones industriales de calcinación: temperatura entre 650 - 700 °C, humedad del bagazo de caña de azúcar (BCA) de 48 - 48.5%, Pol (sacarosa aparente) del BCA ≤ 1.2, tierra contaminante entre 8 - 22% y 0.5 mmHg de presión. La ceniza se almacenó en bolsas de polipropileno para análisis posteriores.

Densidad aparente y gravedad específica

La densidad aparente (γ) suelta y compacta en base seca se determinó conforme a la norma ASTM C 29/C29M-17a con un cilindro calibrado de masa (M_c) y volumen (V_c) conocidos. La γ (kg m^{-3}), se calculó como la diferencia entre M_T y M_c dividida entre el V_c (Ec. 1). Donde M_T es la suma de la masa del cilindro y la muestra. Por su parte, la gravedad específica (G), que refiere a la muestra pasada por malla No. 4, se obtuvo mediante la Ec. 2 donde w_s es la masa seca de la muestra (g); w_{fw} es la suma de las masas (g) del matraz y del agua a temperatura de prueba, y w_{fsw} es la suma de las masas (g) del matraz, el agua y la muestra. Ambas pruebas se realizaron por triplicado.

$$\gamma = \frac{(M_T - M_c)}{V_c}$$
$$G = \frac{w_s}{w_{fw} + w_s - w_{fsw}}$$

Análisis de humedad, materia orgánica y pérdidas por ignición de la CBC

Por triplicado, se pesó a exactitud 0.1 mg (W_0) de CBC dentro de crisoles y se llevaron a calcinación en una mufla con una rampa de calentamiento de 25 - 105 ± 5 °C hasta peso constante (W_{105}); de 105 - 500 °C ± 10 °C a 10 °C/min por 1 h con registro de peso (W_{105}) y de 500 - 950 °C ± 20 °C a 10 °C/min por 2 h con peso final registrado (W_{950}). Asumiendo una oxidación completa de la muestra se calcularon la H (Ec. 3), la MO (Ec. 4) y las LOI (Ec. 5) (ASTM D7348-21).

$$H = \frac{W_0 - W_{105}}{W_0} \times 100$$
$$MO = \frac{(W_{105} - W_{500})}{W_{105}} \times 100$$
$$LOI = \frac{(W_{105} - W_{950})}{W_{105}} \times 100$$

Cuantificación de óxidos y elementos traza en la CBC

El contenido de óxidos y elementos traza se cuantificó mediante fluorescencia de rayos X por energía dispersiva (EDXRF), con un espectrómetro (Spectro Xepos, Ametek, Berwyn, EE. UU) equipado con tubo de rayos X (Pd) de 50 - 60 W y detector derivado de silicio (SDD). Se mezclaron 5 g de muestra libre de humedad (partículas < 150 μm) con cera aglutinante EBS (N, N'- Etileno bis estereamida) para formar pellets de ~ 12.5 mm de diámetro, mediante una prensa hidráulica (Carver, 4350 L, Wabash, EE. UU.) a 20 000 psi. La cuantificación se realizó con patrones de calibración comerciales del Instituto Nacional de Estándares y Tecnología (NIST, por sus siglas en inglés).

Análisis morfológica y químico-elemental

La CBC libre de humedad fue caracterizada por microscopía electrónica de barrido con detector de dispersión de energías (SEM-EDS) y mapeo elemental. Para ello, se empleó un microscopio electrónico (Tescan, Mira 3, Brno, República Checa) y un detector (Bruker, Xflash 6160, Billerica, EE.UU.) configurado en condiciones de alto vacío (13 kV). Las muestras recibieron un doble recubrimiento en oro mediante la técnica "sputtering" en vacío para mejorar la conductividad.

Análisis de fases y arreglo cristalino

La identificación de fases y arreglo cristalino en la CBC se realizó mediante difracción de rayos X (DRX) y espectroscopía Raman. Las muestras, libre de humedad, fueron trituradas en mortero de ágata y tamizadas con malla No. 200. Para el análisis DRX se empleó un difractómetro (Malvern Panalytical B.V., Almelo, Países Bajos) con barrido angular de 5 - 80° (2θ), paso de 0.02° (2θ) cada 30 s, a una intensidad de corriente de 30 mA, voltaje de 45 kV y fuente de radiación de $\text{CuK}_{\alpha 1}$ ($\lambda = 1.54060 \text{ \AA}$). En el estudio Raman, se analizaron cinco regiones distintas de la muestra con un equipo Confocal WITec alpha 300 configurado con un láser de 488 nm, tiempo de integración de 2 s, resolución de 1 cm^{-1} y rango espectral de 50 - 4 000 cm^{-1} .

Esquema interpretativo de la ruta del silicio

Adicionalmente, se elaboró un esquema interpretativo de la ruta del silicio en la dinámica suelo-planta-industria para explicar la formación de las fases silíceas presentes en la CBC. El esquema se construyó a partir de los resultados experimentales obtenidos y de la literatura especializada.

RESULTADOS

La gravedad específica de la CBC del Ingenio Presidente Benito Juárez (IPBJ), así como su densidad aparente en su forma suelta y compacta fue de 2.23 ± 0.1 , $661.9 \pm 3.0 \text{ kg m}^{-3}$ y $803.0 \pm 10.0 \text{ kg m}^{-3}$ respectivamente. La ceniza presentó una humedad de $H = 5.49 \pm 0.23\%$, valores de materia orgánica de $\text{MO} = 9.6 \pm 0.7\%$ y pérdidas por ignición a 950 °C de $\text{LOI} = 16.38 \pm 3.2\%$. Por otro lado, la Tabla 1 muestra la composición de óxidos presentes (% en peso) en la CBC analizada por EDXRF, junto con las especificaciones químicas que requiere un material calcinado para su uso en concreto establecido por la norma ASTM C 618-22. Asimismo, se incluye el promedio de los elementos traza encontrados (mg kg^{-1}) y su comparativa con la norma mexicana NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004

y la norma brasileña CONAMA No. 420 que establecen criterios para prevenir la contaminación del suelo de sustancias como resultado de actividades antrópicas y determinar cuándo un suelo requiere intervención o remediación ambiental. Los resultados exhibieron que los óxidos predominantes fueron SiO_2 , Al_2O_3 y Fe_2O_3 en porcentajes de 63.38, 8.48 y 2.69% respectivamente. La suma de estos óxidos representó el 74.55% y el contenido de SO_3 fue de 0.14%. En cuanto a los elementos traza, se identificaron metales pesados esenciales para la mayoría de los cultivos agrícolas (Zn, Cu, Ni, Mo, Co) y no esenciales (Ba, Rb, Cr, Sr, V, Pb, As) en concentraciones de 118.1, 36.3, 46.1, 2.1, 13.8 mg kg^{-1} y 824.0, 86.4, 233.7, 272.5, 62.3, 14.3, $< 0.5 \text{ mg kg}^{-1}$, respectivamente.

Tabla 1. Composición de óxidos y elementos traza de la CBC por EDFRX

| | Óxidos mayores y menores (% en peso) | | | | | | | | | | | LOI | H% |
|-------------------|--|-------------------------|-------------------------|---------------|------|-------|------|-------------------|------------------|-------------------------------|------------------|-------|-------|
| | SiO_2 | Al_2O_3 | Fe_2O_3 | SO_3 | MnO | MgO | CaO | Na ₂ O | K ₂ O | P ₂ O ₅ | TiO ₂ | | |
| CBC | 63.38 | 8.48 | 2.69 | 0.14 | 1.43 | 0.07 | 2.04 | 1.27 | 2.98 | 0.76 | 0.39 | 16.38 | 5.49 |
| ASTM C 618* | SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃ | | | máx | | - | - | - | - | - | - | máx | máx |
| | min, 70 % | | | 4-5% | | | | | | | | 6-10% | 3% |
| | Elementos traza (mg kg^{-1}) | | | | | | | | | | | | |
| | V | Cr | Co | Ni | Cu | Zn | Rb | Zr | Ba | Pb | Sr | Mo | As |
| CBC | 62.3 | 233.7 | 13.8 | 46.1 | 36.3 | 118.1 | 86.4 | 219.1 | 824.0 | 14.3 | 272.5 | 2.1 | < 0.5 |
| Ref. ^a | 78 | 280 | - | 1600 | - | - | - | - | 5400 | 400 | - | - | 22 |
| Ref. ^b | - | 150 | 35 | 70 | 200 | 450 | - | - | 300 | 180 | - | 50 | 35 |

*Especificaciones químicas establecidas por la norma ASTM C 618-22. Concentraciones de referencia totales de metales pesados en suelo de uso agrícola: ^a NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 (SEMARNAT 2004); ^b CONAMA No. 420 (CONAMA 2009).

Las micrografías SEM y los espectrogramas EDS del análisis químico-elemental de la CBC analizada se muestran en la Figura 1, mientras que los valores cuantitativos se resumen en la Tabla 2. La ceniza consistió en una mezcla heterogénea de partículas con morfología y composición química diversas, cuyos elementos principales fueron O (33.25%), Si (19.73%) y C (41.24%) (Figura 1a y 1c). El microanálisis (Figura 1b) identificó tres tipos de partículas sólidas frecuentes: tipo I, de apariencia compacta con esfericidad variada y esquinas que van de sub-redondeadas a muy angulares, con destacable contenido de Si (47.41%) y O (37.13%) (Figura 1d); tipo II, de estructura fibrosa y hueca, con bajo grado de oxidación atribuible a combustión incompleta, con contenido alto de C (88.36%) (Figura 1e); y tipo III, amorfas y porosas, que exhibieron una composición química compleja, que destacan en O, Si, C, Al y Fe con 38.50, 28.49, 10.15, 8.81, 4.71%, respectivamente (Figura 1f). En el mapeo elemental de la Figura 2 se observa abundante sedimento carbonoso y una distribución dominante de O, lo que indica el estado oxidado de sus componentes.

El difractograma obtenido mediante el análisis DRX (Figura 3) muestra, en las ordenadas, la intensidad relativa (u.a.) de las fases cristalinas predominantes de la CBC, en función del ángulo de difracción (2θ) representado en las abscisas. No se observaron señales que indiquen presencia de sílice amorfa. La fase principal correspondió al SiO_2 en forma de cuarzo con un sistema cristalino hexagonal, P3221(154), según la carta cristalográfica PDF #99-0088, con orientación preferente a lo largo del plano (0 1 1) en $26.67^\circ 2\theta$ y una distancia interplanar de 3.336 Å. También se identificaron albita desordenada ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$), con sistema triclinico C-1 (2) (PDF #10-0393), y gismondina cálcica ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) monoclinica, P21/c (14) (PDF #20-0452) en intensidades relativas del 30% y 19%,

respectivamente. Asimismo, se detectaron fases minoritarias como bernilita (AlPO_4) (PDF #76-0228) y carbono en forma de grafito (PDF #99-0057) ambas con intensidades $\leq 5\%$.

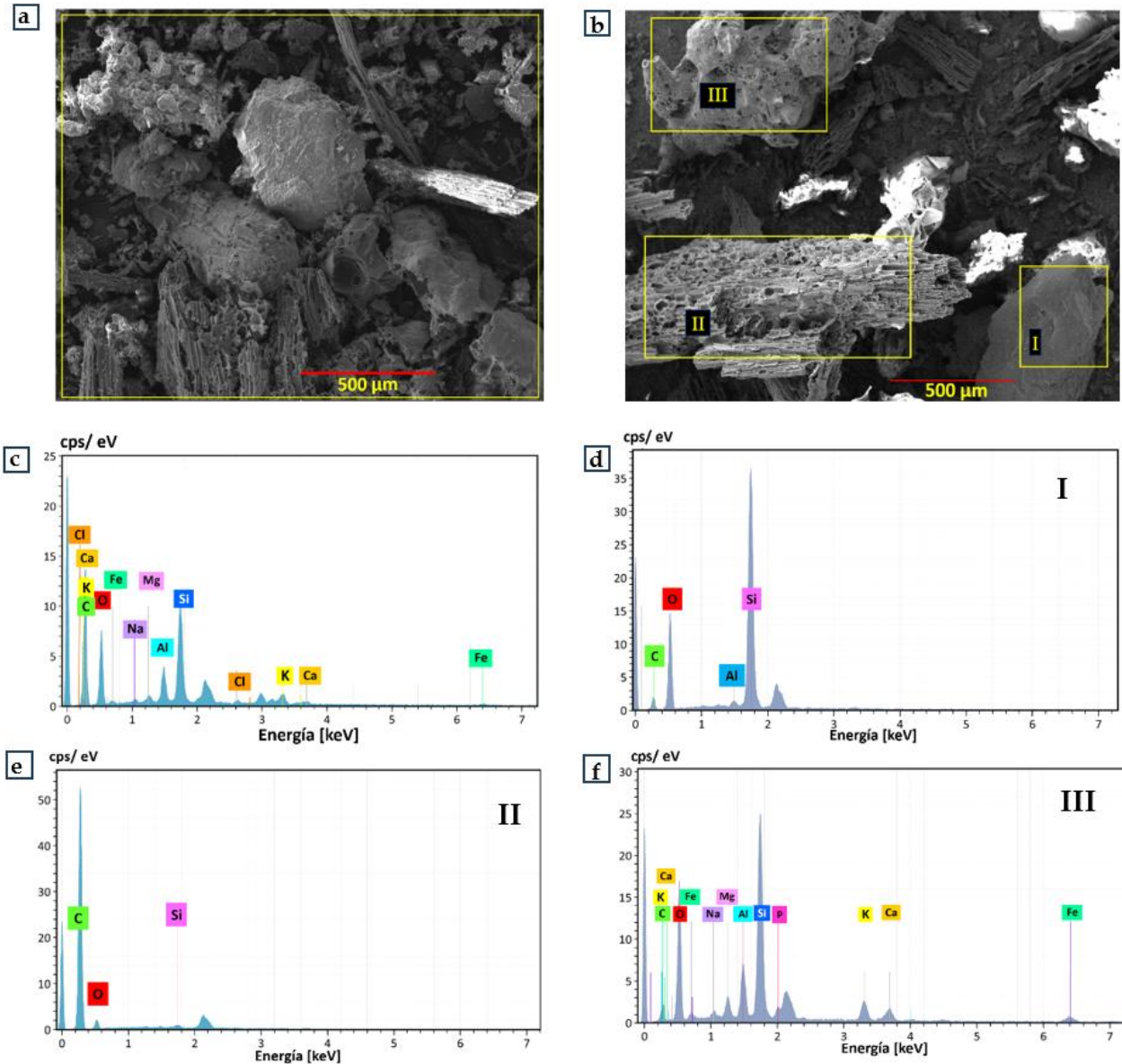


Figura 1. Análisis morfológico y químico-elemental por SEM de la CBC del IPBJ de Tabasco, México.

Tabla 2. Composición químico-elemental de la CBC y microanálisis de partículas constituyente más frecuentes

| Área analizada | Elementos (% en peso) | | | | | | | | | | | Σ |
|----------------|-----------------------|-------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|----------|
| | O | C | Si | Al | Fe | P | K | Na | Mg | Ca | Cl | |
| CBC | 33.25 | 41.24 | 19.73 | 1.56 | 0.43 | - | 2.29 | 0.38 | 0.17 | 0.71 | 0.44 | 100 |
| Partícula I | 37.13 | 14.42 | 47.41 | 1.04 | - | - | - | - | - | - | - | 100 |
| Partícula II | 10.99 | 88.36 | 0.65 | - | - | - | - | - | - | - | - | 100 |
| Partícula III | 38.50 | 10.15 | 28.49 | 8.81 | 4.71 | 1.61 | 2.56 | 0.34 | 2.15 | 2.67 | - | 100 |

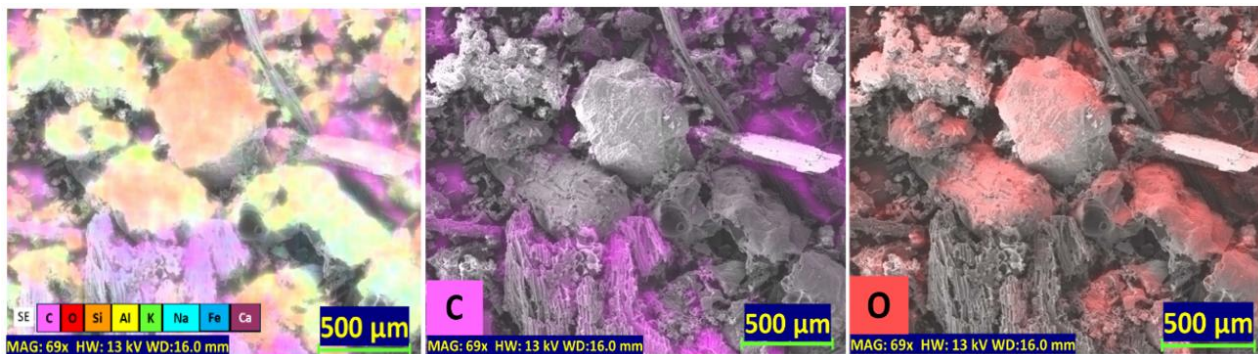


Figura 2. Mapeo elemental de la ceniza de bagazo de caña del IPBJ de la región de Tabasco, México.

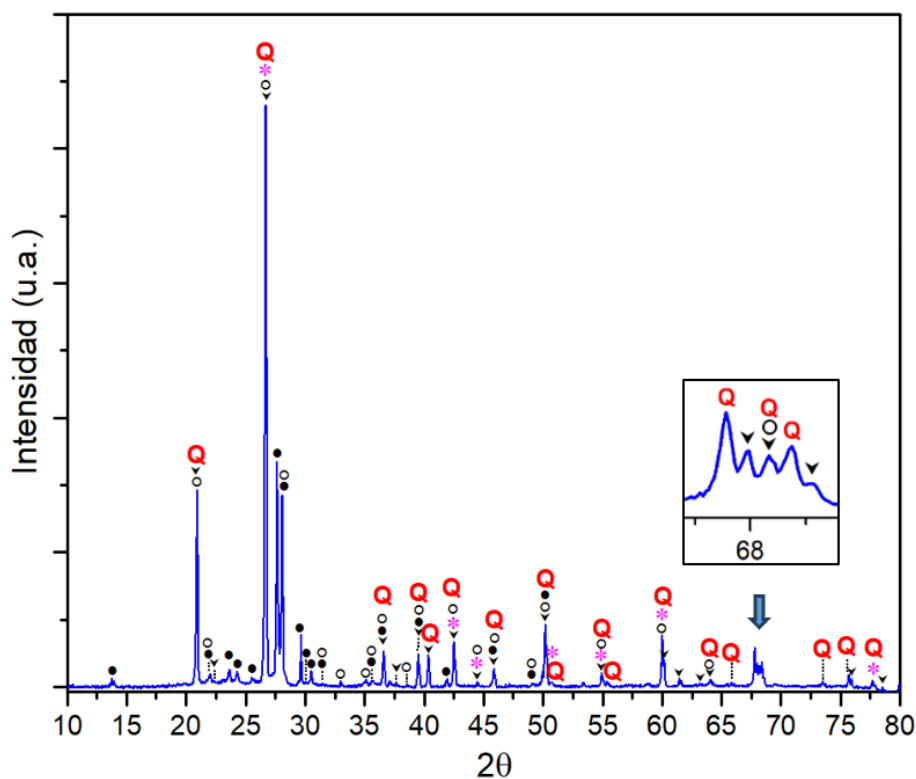


Figura 3. Análisis DRX de la ceniza de bagazo de caña. Cartas cristalográficas: Q Cuarzo (SiO_2) PDF #99-0088; * Grafito (C) PDF #99-0057; o Gismondina cálcica ($\text{CaAl}_2\text{SiO}_8 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) PDF #20-0452; • Albita desordenada ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$) PDF #10-0393; ▼ Bernilita (AlPO_4) PDF #76-0228. Fuente de radiación $\text{CuK}\alpha_1$ ($\lambda = 1.54060 \text{ \AA}$).

La Figura 4 presenta los resultados del análisis de fases de la CBC mediante espectroscopía Raman, donde la línea azul representa las señales Stokes emitidas por la muestra, graficadas en corrimiento Raman (cm^{-1}) contra su intensidad (u.a.). En el espectro de la Figura 4a se identificaron vibraciones correspondientes a cuarzo localizadas en 128, 206, 264, 355, 402, 465, 700, 803, 1071, 1161 cm^{-1} , con referencia X080016 de la base de datos RRUFF^{TR}. Dichos resultados fueron consistentes con el análisis DRX de la Figura 3. Igualmente, fue confirmada la presencia de albita ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$) mediante la referencia X050008 (RRUFF^{TR}), con bandas en 184, 206, 295 333, 412, 479, 510, 581, 765

y 815 cm^{-1} (Figura 4b), y material carbonoso (Figura 4c) con bandas características D (1353 cm^{-1}) y G (1584 cm^{-1}). Asimismo, se observaron señales en 224, 246, 295, 413, 500, 614, 661 y 1317 cm^{-1} (Figura 4d) propias de la fase hematita ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$), según la referencia R050300 (RRUFF^{TR}).

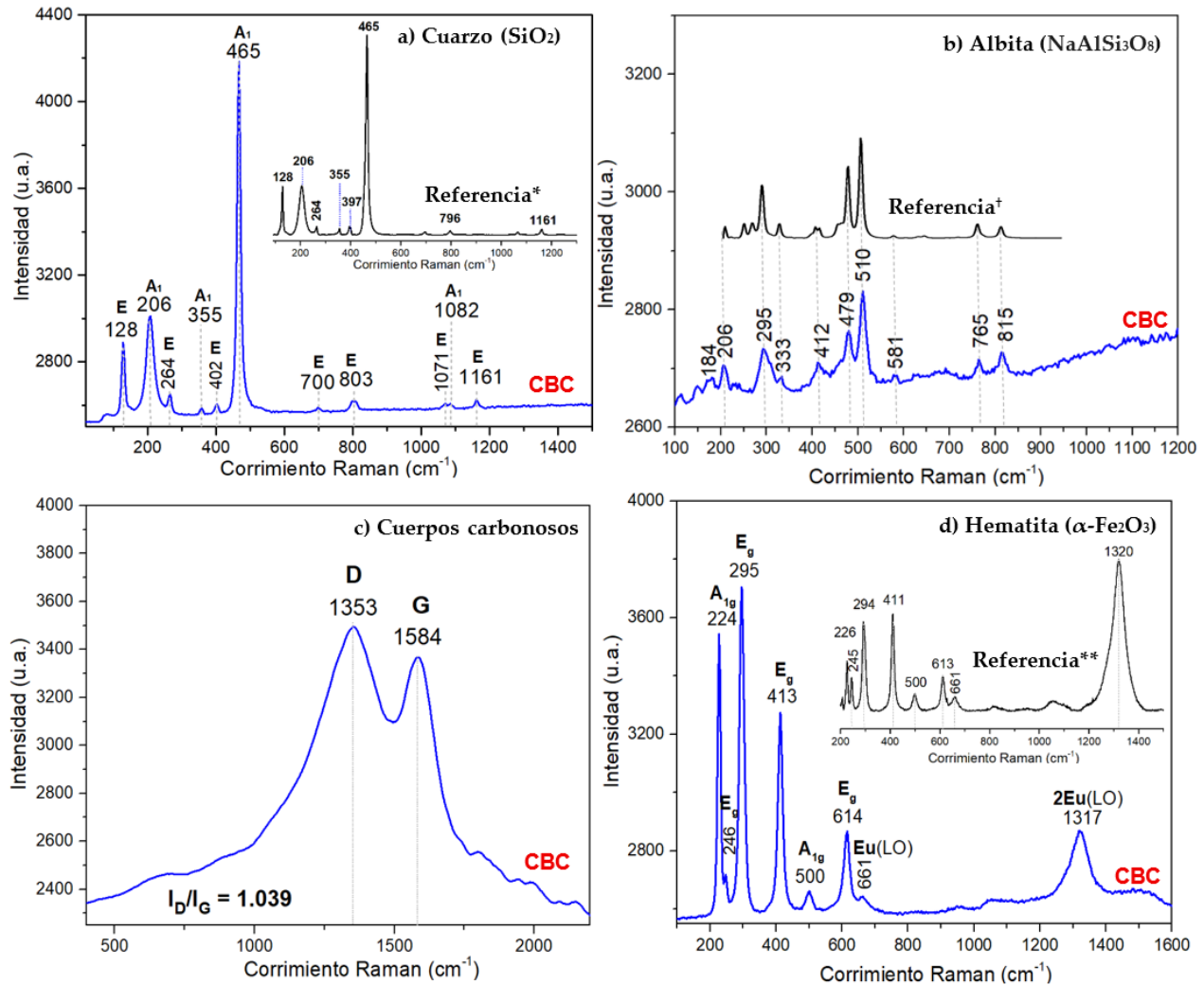


Figura 4. Análisis Raman de la ceniza de bagazo de caña. Espectros de referencia RRUFF^{TR}: a) Referencia* = X080016; b) Referencia[†] = X050005; d) Referencia**= R050300. c) Carbono amorfo y rGO. Fuente de medición láser de 488 nm.

En la Figura 5, se presenta el esquema interpretativo de la ruta del silicio en la dinámica suelo-planta-industria para la formación de fases silíceas en la CBC, la presencia de cada componente se analiza en el apartado de discusión.

DISCUSIÓN

El elevado contenido de MO ($9.6 \pm 0.7\%$) y LOI ($16.38 \pm 3.2\%$) observado en la CBC analizada en esta investigación sugiere condiciones desfavorables para una calcinación completa del bagazo. En la literatura, los valores de LOI varían ampliamente, entre 0.40 - 24.15%, debido a la influencia de

múltiples factores durante el proceso de calcinación (Maldonado-García *et al.* 2017). De acuerdo con datos de operación obtenidos directamente del IPBJ, el BCA generado en la región de Cárdenas, Tabasco contiene porcentajes considerables de tierra (8 - 22%) y humedad (~ 50%), atribuibles a las intensas lluvias durante la zafra y al tipo de suelo en la zona cañera (Cambisol, Vertisol, Gleysol y Fluvisol) (Payró-de-la-Cruz *et al.* 2021). Estas condiciones reducen la eficiencia de los hornos, lo que favorece la formación de sedimentos carbonosos y partículas mal calcinadas en la CBC (Clark *et al.* 2017, Barcelos *et al.* 2019). Por lo tanto, para incrementar la eficiencia del proceso de calcinación, es recomendable reducir la humedad inicial del bagazo, minimizar la presencia de tierra y optimizar las condiciones de oxigenación y temperatura, además de aumentar el tiempo de residencia del bagazo en los hornos (Ouedraogo *et al.* 2022).

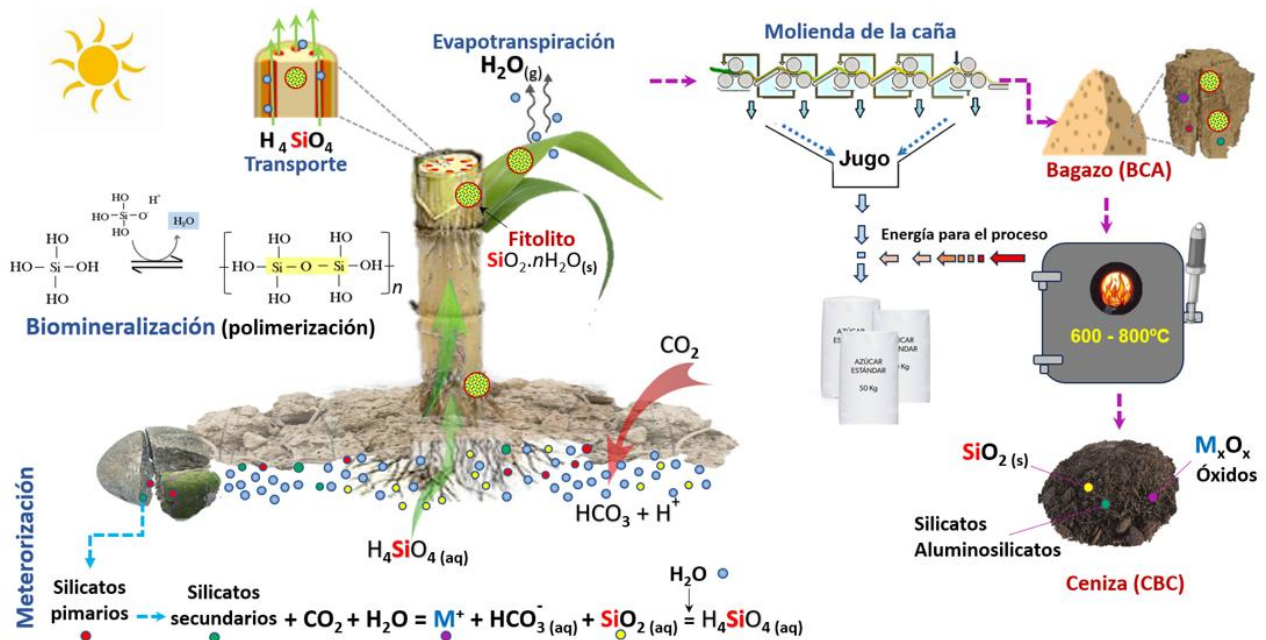


Figura 5. Ruta del silicio en la dinámica suelo-planta-industria propuesta para explicar la formación de las fases silíceas presentes en la ceniza de bagazo de caña (CBC). M = metal

Aunque la ceniza analizada cumplió con los requisitos químicos establecidos por la norma ASTM C 618-22 en cuanto a la suma de óxidos, Al_2O_3 , Fe_2O_3 y SiO_2 , y al contenido de SO_3 , los parámetros de humedad y las pérdidas por ignición se encontraron fuera de especificación. Según Seyoum *et al.* (2021), valores de LOI mayores al 10 % resultan desfavorables para su uso, ya que aumenta la demanda de agua durante la hidratación del mortero y reducen la trabajabilidad de las mezclas. En un estudio realizado por Cordeiro *et al.* (2018) mencionan que, el uso de CBC con LOI de 20.9% en la elaboración de concreto presentó retraso en el fraguado y disminución en la resistencia a la compresión. En la elaboración de cerámicos, un valor elevado de LOI se asocia a una alta porosidad y colapso del material ante ciclos de congelación y deshielo (Pérez-Casas *et al.* 2023).

Entre los elementos traza detectados (Tabla 1), tanto el vanadio (V) como el cromo (Cr) se encontraron en niveles cercanos del umbral establecido por la norma NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004. No obstante, respecto a la norma brasileña CONAMA No. 420, los niveles

de Cr y bario (Ba) superaron los valores de referencia establecidos. De acuerdo con el contenido de metales pesados encontrado, el uso de la CBC como fertilizante es cuestionable. Desde la perspectiva de la salud humana y ambiental, el límite tolerable estimado de Cr en el suelo es de $\sim 64 \text{ mg kg}^{-1}$ (Ali *et al.* 2023). El Cr es tóxico en sistemas biológicos; en las plantas provoca inhibición enzimática, mutagénesis y reducción en el rendimiento y la germinación. El Ba, por su parte, se presenta en suelos en concentraciones promedio de entre $265 - 835 \text{ mg kg}^{-1}$, y en ciertas especies vegetales, los síntomas de toxicidad son observables a partir de los 600 mg kg^{-1} , lo que provoca estrés oxidativo y alteraciones en la actividad metabólica (Melo *et al.* 2011, Sleimi *et al.* 2021).

Los metales pesados están presentes de forma natural en los suelos, aunque su concentración puede aumentar debido al uso inadecuado de fertilizantes fosfatados y diversas fuentes antropogénicas (Bhat *et al.* 2019). En Tabasco, los estudios reportados sobre metales pesados en suelos son escasos. De la Cruz-Pons *et al.* (2012) reportaron concentraciones bajas de metales pesados en suelos de la región cañera de Chontalpa, zona que abastece al IPBJ, cumpliendo con los estándares nacionales de calidad del suelo para uso agrícola. Recientemente, se ha detectado sedimentos lagunares con concentraciones de Cd, Ni, Cr, Mn, Zn Pb y Al que sobrepasan los criterios de metales pesados (Flores *et al.* 2018). En el suroeste de México, actividades de la industria petroquímica, como la quema de residuos en fosas provenientes de la separación de agua e hidrocarburos, generan emisión de gases lo que favorece la acumulación de metales en el suelo (De-la-Cruz-Pons *et al.* 2012). Asimismo, el uso de barita (BaSO_4) como agente densificante en fluidos de perforación para la extracción de petróleo y gas representa una fuente adicional de contaminación (Bousslimi *et al.* 2021), junto con los impactos directos derivados de derrames petroleros (Chávez *et al.* 2025).

La toxicidad causada por metales pesados en plantas depende principalmente de factores propios de la especie, condiciones de cultivo, concentración del metal y su movilidad en el suelo (Bhat *et al.* 2019). Ciertas especies, como la caña de azúcar, desarrollan mecanismos de defensa frente a esta toxicidad (Jain 2025), en los cuales el Si desempeña un papel fundamental al modular el transporte de metales y activar compuestos antioxidantes que propicia su quelación y coprecipitación, inmovilizándolos dentro de estructuras fitolíticas (Xu *et al.* 2023). Por ejemplo, en plantas sometidas a estrés por Al o Zn y tratadas con Si, se ha observado la formación de silicatos, aluminosilicatos o hidroxialuminosilicatos en distintos tejidos como mecanismo desintoxicante (Bhat *et al.* 2019, Hodson y Evans 2020). Dichas estructuras, al permanecer unidas en el bagazo de caña son calcinadas y el contenido quelado de metales pesados pasa a formar parte de la composición final de la ceniza (Negrão y Driemeier 2022).

Por otro lado, el cuarzo identificado mediante DRX como fase principal de la CBC exhibió un sistema cristalino hexagonal, lo que indica la presencia de β -cuarzo ($\beta\text{-SiO}_2$). En forma complementaria, el análisis por espectroscopía Raman (Figura 4a) reveló la fase metaestable α -cuarzo ($\alpha\text{-SiO}_2$), con bandas características de los modos A_1 en $206, 355, 465, 1\,082 \text{ cm}^{-1}$ y sus modos doblemente degenerados (E) en $128, 264, 402, 700, 803, 1\,071, 1\,161 \text{ cm}^{-1}$, según la teoría de grupos del cuarzo (Murri *et al.* 2022, Morana *et al.* 2023). Los modos de estiramiento de los enlaces Si-O se ubicaron en la región de $700 - 800 \text{ cm}^{-1}$; los modos de flexión de los ángulos de enlace O-Si-O, entre $350\text{--}500 \text{ cm}^{-1}$, y la flexión-torsión de los enlaces Si-O-Si, por debajo de 300 cm^{-1} (Morana *et al.* 2023, Kovalev *et al.* 2024). Aunque el arreglo cristalino $\alpha\text{-SiO}_2$ es el más común en la naturaleza, este es

sensible a transicionar a β -SiO₂ a ~ 573 °C a presión atmosférica (Morana *et al.* 2023), temperatura dentro del rango calcinación del BCA que oscila entre ~ 500 - 1000 °C (Ahmad *et al.* 2021).

Por su parte, la albita (NaAlSi₃O₈) identificada por espectroscopía Raman (Figura 4b) es un feldespato alcalino rico en sodio, perteneciente a los aluminosilicatos de la clase de los tectosilicatos, caracterizado por uniones tetraédricas coordinadas de (SiO₄)⁻⁴ y (AlO₄)⁻⁵, con un sistema triclinico (Gikunju *et al.* 2024). Para el análisis de la albita, se dividió el espectro en tres regiones según el tipo de vibración de los enlaces. De acuerdo con Jaret *et al.* (2018), las bandas de mayor intensidad son localizadas en la región principal (~ 450 - 520 cm⁻¹) y se relacionan a vibraciones de estiramiento por modos de respiración de los anillos de los tetraedros TO₄, donde T = Al o Si. La región entre ~ 150 - 400 cm⁻¹ corresponde a modos de rotación-traslación, que suelen estar acopladas a bandas de otros minerales como el cuarzo. Finalmente, la región entre ~ 550 - 830 cm⁻¹ fue asignada a modos vibratorios asociados a la deformación del tetraedro (SiO₄)⁻⁴, lo que sugiere interacción de cationes con la estructura de la albita. Según Niamnuy *et al.* (2024), en los aluminosilicatos, el remplazo de algunos átomos de Si por Al aumenta la carga negativa, que pasa de (SiO₄)⁻⁴ a (AlO₄)⁻⁵, lo que provoca la atracción de iones metálicos como Na⁺, K⁺, Ca²⁺ y Mg²⁺ para equilibrar las cargas.

De acuerdo con la teoría de grupos, la hematita (α -Fe₂O₃) identificada en la ceniza (Figura 4d) presentó modos vibratorios Raman activos simétricos A_{1g} y E_g (Qayoom *et al.* 2020). Las bandas en 224 y 500 cm⁻¹ fueron asignadas a los modos A_{1g}, que vibran en el plano perpendicular al eje principal. Mientras que, las bandas en 246, 298, 413, 615 cm⁻¹ fueron establecidas a los modos E_g, con vibraciones en direcciones paralelas al eje principal caracterizadas por orbitales doblemente degenerados igual energía (Qayoom *et al.* 2020, Pérez *et al.* 2022). Asimismo, se observaron bandas en 661 y 1317 cm⁻¹ atribuidas a defectos en la red cristalina, correspondientes a los modos Eu (LO) y 2Eu (LO), respectivamente, conocidos como modos ópticos longitudinales (LO) que son poco común en espectros de hematita. Según Pérez *et al.* (2022), estos defectos se asocian comúnmente con la presencia de magnetita (Fe₃O₄), en especial la banda en la frecuencia 661 cm⁻¹.

El origen de la fase cristalina de SiO₂ presente en la CBC analizada puede atribuirse a dos posibles fuentes. Por un lado, podría derivarse de la incorporación de arena adherida a la biomasa, hecho reportado por diversos autores, ya que el cuarzo es un mineral abundante en la corteza terrestre (Clark *et al.* 2017, Prabhath *et al.* 2022). Por otro lado, podría originarse a partir de la cristalización de la sílice amorfa contenida en los fitolitos, favorecida por el ambiente termoquímico generado durante la calcinación (Clark *et al.* 2017, Moon *et al.* 2022).

La formación de los fitolitos dentro de los tejidos epidérmicos de la caña de azúcar inicia con la absorción radial del ácido ortosilícico (H₄SiO₄), un ácido monomérico procedente de la meteorización de los silicatos del suelo (Figura 5). Este compuesto es transportado vía xilema y, con ayuda de la evapotranspiración, se biomineraliza en forma de fitolitos depositándose en raíces, tallos, entrenudos y hojas (Negrão y Driemeier 2022; Xu *et al.*, 2023). Estas microestructuras, además de estar formadas de sílice amorfa del orden de las opalinas (Palakurthy *et al.* 2024), poseen una composición flexible hidratada de hasta un 20% y son capaz de ocluir elementos como K, Ca, Mg, Mn, Cl, Br, Al, N, metales pesados y compuestos orgánicos (Liu *et al.* 2025, Xu *et al.* 2023). Durante la molienda de la caña, los fitolitos permanecen unidos al bagazo (Negrão y Driemeier 2022) y, al

ser estos calcinados, a temperaturas superiores a 600 °C, alta humedad y un medio alcalino, propio de la disolución de óxidos metálicos alcalinos derivado de la combustión, se generan condiciones análogas a las empleadas en procesos hidrotermales para la síntesis de α -SiO₂, β -SiO₂ o cristobalita (Clark *et al.* 2017, Moon *et al.* 2022).

De igual manera, la fase gismondina detectada por DRX (Figura 3), puede ser procedente de condiciones geológicas e hidrotermales (Bingre *et al.* 2018) e introducida junto a la tierra adherida al bagazo. Sin embargo, no se descarta su formación involuntaria como resultado de las condiciones termoquímicas generadas durante el proceso de calcinación. De manera confirmatoria, en la micrografía de la Figura 1b se observó la presencia de partículas microporosas (partícula III) de morfología y composición química compatible con material zeolítico. La gismondina es una zeolita hidratada con estructura tridimensional formada por tetraedros de Si y Al enlazados mediante átomos de O compartidos, que genera canales que alojan moléculas de agua (De-Carvalho *et al.* 2024). Las zeolitas son minerales microporosos capaces de retener cationes intercambiables en sus cavidades electronegativas (Yoldi *et al.* 2019, Mamedova 2020).

Con base en la composición sílico-aluminosa de la ceniza del IPBJ, es posible considerar a este material como fuente alternativa de Si y Al para la síntesis verde de zeolitas. La síntesis de zeolitas parte de fuentes de Si y Al como arcillas, vidrios, diatomeas, aluminosilicatos, feldespatos y cenizas (Mamedova 2020). Recientemente, diversos estudios han explorado la eficiencia de las zeolitas NaP1, del tipo estructural gismondina, sintetizadas a partir de residuos agroindustriales entre ellos el bagazo y ceniza de caña de azúcar (Oliveira *et al.* 2019, Yoldi *et al.* 2019, De Carvalho *et al.* 2024). Las aplicaciones de las zeolitas obtenidas de residuos se basan en su capacidad de intercambio iónico, adsorción y estructura porosa. Estas pueden emplearse como agente de retención de nutrientes o fertilizantes de liberación lenta o para mejorar la aeración y retención de agua del suelo; asimismo pueden utilizarse como materiales de construcción, separación y purificación de gases, catálisis química y tratamientos de aguas residuales (De-Carvalho *et al.* 2024).

Derivado de los resultados de este estudio, la CBC del IPBJ exhibe características mineralógicas adecuadas para su uso en la elaboración de cerámicos. Según la literatura, la alta concentración de cuarzo, junto con la presencia de óxidos alcalinos y feldespatos, favorecen la fusibilidad y vitrificación durante el proceso de sinterización de los cerámicos (Phuong *et al.* 2023). Addis *et al.* (2023) demostraron que la CBC pura sustituye parcialmente al feldespato en la producción de porcelanas eléctricas, manteniendo las propiedades dieléctricas y mecánicas con buena resistencia estructural. Asimismo, el alto contenido en cuarzo de este material lo hace apto como sustituto parcial de arena en la elaboración de morteros para construcción (De-Sande *et al.* 2021).

Si bien la ceniza analizada presentó un contenido de óxidos (Al₂O₃ + Fe₂O₃ + SiO₂) superior al 70% y una fase zeolítica, la cristalinidad de la fase silícea y su elevado contenido de materia orgánica sugieren una baja actividad puzolánica. Para mejorar la eficiencia en el aprovechamiento de su fracción silícea y sílico-aluminosa, se recomienda separar o eliminar la fracción carbonosa previo a su uso (Cordeiro *et al.* 2018, Sindhu *et al.* 2021). Entre los pretratamientos reportados se incluyen la selección granulométrica, recalificaciones y moliendas ultrafinas controladas (Cordeiro *et al.* 2019), con la finalidad de ampliar las aplicaciones de la CBC en la industria del cemento, electrónica,

óptica, farmacéutica, cosmética, tecnología solar entre otras (Sindhu *et al.* 2021, Seroka *et al.* 2022, Chen *et al.* 2023).

En el marco de la caracterización de fases, se identificó material carbonoso derivado de una combustión incompleta de la materia orgánica. El análisis de esta fase mediante espectroscopía Raman (Figura 4c) muestra a la banda G (1584 cm^{-1}) atribuida a vibraciones fonónicas con simetría E_{2g} de las hibridaciones sp^2 de los átomos de C en un anillo hexagonal aromático; dicha banda representa el orden estructural (Urade *et al.* 2022). La banda D (1353 cm^{-1}), por su parte, se asocia a vibraciones de enlaces sp^3 de los átomos de C y refleja el grado de desorden en la red cristalina, causado por defectos de apilamiento o por presencia de oxígeno (Simón *et al.* 2018; Thangaraj *et al.* 2023). La relación entre las intensidades relativas de las bandas D y G (I_D/I_G) fue de 1.039; valor que se empleó para el cálculo de la cristalinidad (L_a) mediante la ecuación de Tuinstra-Koenig (Thangaraj *et al.* 2023), a la longitud de onda del láser empleada (488 nm).

$$L_a = \frac{2.4 \times 10^{-10} \lambda^4}{(I_D/I_G)}$$

El material carbonoso fue identificado como una mezcla de carbono amorfo y óxido de grafeno reducido (rGO) multicapa, con una cristalinidad $L_a = 13.16 \pm 0.13\text{ nm}$, afectada por defectos en la red asociados por la presencia de oxígeno. El resultado es consistente con el microanálisis EDS de la partícula tipo II (Tabla 2) que mostró un 88.36% de C y 10.99% de O. Hallazgos similares fueron reportados por Darmawan *et al.* (2024) en la obtención de rGO mediante pirólisis controlada a 700 °C bajo el método de Hummer, con bandas Raman comparables. El carbono amorfo, es útil en la elaboración de revestimientos ultradelgados para la protección de dispositivos electrónicos y biomédicos o como barrera dieléctrica (Roy *et al.* 2023); este material puede ser susceptible a activación para elaboración de absorbentes o formación almacenamiento de carga entre otros usos (Somyanonthanakun *et al.* 2023). Por su parte, el rGO destaca por su excelente conductividad eléctrica, estabilidad térmica y propiedades mecánicas, lo que lo hace idóneo para su uso en dispositivos de almacenamiento de energía como supercapacitores y baterías de ion-litio, sensores y aplicaciones biomédicas (Darmawan *et al.* 2024, Tarcan *et al.* 2020).

CONCLUSIONES

La CBC generada en el IPBJ exhibe una composición heterogénea dominada por fases cristalinas de cuarzo (α y β), albita y gismondina, junto con partículas carbonosas mal calcinadas y óxidos metálicos que reflejan condiciones térmicas poco eficientes. La suma de SiO_2 , Al_2O_3 y Fe_2O_3 (74.55%) y el bajo contenido de SO_3 (0.14%) cumplen con los requisitos químicos de la norma ASTM C 618-22; sin embargo, la cristalinidad de sus fases, los elevados valores de materia orgánica ($9.6 \pm 0.7\%$) y pérdidas por ignición ($16.38 \pm 3.2\%$) limitan su actividad puzolánica. La presencia de metales pesados como Cr (233.7 mg kg^{-1}) y V (62.3 mg kg^{-1}), cercanos a los umbrales de intervención ambiental, cuestiona su uso agrícola sin tratamiento previo y abre un marco de trabajo para el monitoreo sistemático de la concentración de metales pesados en suelos fertilizados con CBC con el fin de prevenir su bioacumulación y riesgo de biomagnificación. No obstante, su riqueza sílico-aluminosa, la presencia de fases zeolíticas y la detección de óxido de grafeno reducido (rGO) abren

oportunidades para su aprovechamiento en la industria cerámica, síntesis de zeolitas, morteros, recubrimientos funcionales y tecnologías de almacenamiento energético. Estos hallazgos confirman la pertinencia de caracterizar localmente este residuo y subrayan la necesidad de adoptar estrategias sostenibles para su valorización en Tabasco, donde su potencial permanece subutilizado.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece al IPBJ por la donación de la ceniza de bagazo de caña y proporcionar las condiciones de calcinación a la que fue sometida. Agradecimiento a la actual SECIHTI, por el financiamiento de la beca de #838560 para estudios de Doctorado en Ciencias en Ingeniería.

CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores declaran que no tienen intereses en competencia.

LITERATURA CITADA

- Abdullayev A, Bekheet MF, Hanaor DA, Gurlo A (2019) Materials and applications for low-cost ceramic membranes. *Membranes* 9(9): 105. <https://doi.org/10.3390/membranes9090105>
- Addis T, Wondemagegnehu EB, Zereffa EA, Tullu AM, Brehane B (2023) Sugarcane bagasse ash substituent feldspar for the production of porcelain electrical insulators. *Ceramics International* 49(5): 7727-7736. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2022.10.279>
- Ahmad A, Rehman KU, Ahmad F, Ahmad A, Siffat MA (2021) Effect of calcination on the chemical and microstructural properties of sugarcane bagasse ash (SCBA). *Journal of Engineering Research and Reports* 21(8): 1-9. <https://doi.org/10.9734/jerr/2021/v21i817482>
- Ali S, Mir RA, Tyagi A, Manzar N, Kashyap AS, Mushtaq M, Bae H (2023) Chromium toxicity in plants: signaling, mitigation, and future perspectives. *Plants* 12(7): 1502. <https://doi.org/10.3390/plants12071502>
- ASTM (2022) ASTM C 618-22 Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete. ASTM International, West Conshohocken, PA. <https://doi.org/10.1520/C0618-22>.
- ASTM (2021) ASTM D7348-21 Standard Test Methods for Loss on Ignition (LOI) of Solid Combustion Residues. ASTM International, West Conshohocken, PA. <https://doi.org/10.1520/D7348-21>
- ASTM (2017) ASTM C 29/C29M-17a Standard Test Method for Bulk Density ("Unit Weight") and Voids in Aggregate. ASTM International, West Conshohocken, PA. https://doi.org/10.1520/C0029_C0029M-17A
- Barcelos ST, Tomielis IP, Da Silva Garcia M, Cereda MP (2019) Characterization of boiler ashes from sugarcane mill. *Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais* 10(3): 179-190. <http://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2019.003.0016>
- Berenguer R, Lima N, Valdés AC, Medeiros MHF, Lima NBD, Delgado JMPQ, Rangel B (2020) Durability of concrete structures with sugar cane bagasse ash. *Advances in Materials Science and Engineering* 2020(1): 6907834. <https://doi.org/10.1155/2020/6907834>

- Bhat JA, Shivaraj SM, Singh P, Navadagi DB, Tripathi DK, Dash PK, Deshmukh R (2019) Role of silicon in mitigation of heavy metal stresses in crop plants. *Plants* 8(3): 71. <https://doi.org/10.3390/plants8030071>
- Bingre R, Louis B, Nguyen P (2018) An overview on zeolite shaping technology and solutions to overcome diffusion limitations. *Catalysts* 8(4): 163. <https://doi.org/10.3390/catal8040163>
- Bouslimi H, Ferreira R, Dridi N, Brito P, Martins-Dias S, Caçador I, Sleimi N (2021) Effects of barium stress in brassica juncea and cakile maritima: the indicator role of some antioxidant enzymes and secondary metabolites. *Phyton-International Journal of Experimental Botany* 90(1). 145-158. <https://doi.org/10.32604/phyton.2020.011752>
- Chávez MDJA, Javier-Jiménez DG, Morales-Bautista CM, Méndez-Olán C, Chablé-Candelero R (2025) Afectaciones en cultivos de Veracruz y Tabasco por derrame de petróleo en los últimos seis años. *Journal of Basic Sciences* 11(30): 93-105.
- Chen Z, Wei J, Yi C, Bindiganavile V, Li S, Li T (2023) Strength and chloride resistance of mortars blended with SCBA: the effect of calcination and particle sizing on its pozzolanic activity. *Journal of Materials Research and Technology* 22: 1423-1435. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.11.179>
- Clark MW, Despland LM, Lake NJ, Yee LH, Anstoetz M, Arif E, Doumit P (2017) High-efficiency cogeneration boiler bagasse-ash geochemistry and mineralogical change effects on the potential reuse in synthetic zeolites, geopolymers, cements, mortars, and concretes. *Heliyon* 3(4): e00294. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2017.e00294>
- CONADESUCA (2024) 11° Informe estadístico del sector agroindustrial de la caña de azúcar y reporte final de producción de caña y azúcar de la zafra 2023/24. https://www.siiba.conadesuca.gob.mx/siiba/docext/11vo_Informe_Estadistico.pdf. Fecha de consulta: 11 de julio de 2025.
- CONAMA (2009) Conselho Nacional do Meio Ambiente No. 420. Anexo I. Procedimento para estabelecimento de valores de referencia de qualidade de solos. https://conama.mma.gov.br/?option=com_sisconama&task=arquivo.download&id=601. Fecha de consulta: 10 de julio de 2025.
- Cordeiro GC, Andreão PV, Tavares LM (2019) Pozzolanic properties of ultrafine sugar cane bagasse ash produced by controlled burning. *Heliyon* 5(10). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e02566>
- Cordeiro GC, Barroso TR, Toledo Filho RD (2018) Enhancement the properties of sugar cane bagasse ash with high carbon content by a controlled re-calcination process. *KSCE Journal of Civil Engineering* 22: 1250-1257. <https://doi.org/10.1007/s12205-017-0881-6>
- Darmawan I, Wannasen L, Pinitsoontorn S (2024) Synthesis, Characterization, and Electrochemical Properties of Reduced Graphene Oxide Produced from Sugarcane Bagasse for Supercapacitor Applications. *Biointerface Research in Applied Chemistry* 14(5): 109. <https://doi.org/10.33263/BRIAC145.109>
- De Carvalho IJ, Fungaro DA, Cataldo E (2024) Zeolites synthesized from agro-industrial residues applied in agriculture: A review and future prospects. *Soil Use and Management* 40(1): e13003. <https://doi.org/10.1111/sum.13003>
- De la Cruz-Pons A, Zavala-Cruz J, Guerrero-Peña A, Salgado-García S, Lagunes-Espinoza LC, Gavi-Reyes F (2012) Metales pesados en suelos cultivados con caña de azúcar en la Chontalpa Tabasco. *Universidad y Ciencia* 28(2): 119-130.
- De Sande VT, Sadique M, Pineda P, Bras A, Atherton W, Riley M (2021) Potential use of sugar cane bagasse ash as sand replacement for durable concrete. *Journal of Building Engineering* 39: 102277. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102277>
- Dombinov V, Herzel H, Meiller M, Müller F, Willbold S, Zang JW, Schrey SD (2022) Sugarcane bagasse ash as fertilizer for soybeans: Effects of added residues on ash composition, mineralogy, phosphorus

- extractability and plant availability. *Frontiers in Plant Science* 13: 104924. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1041924>
- Dutra AF, Leite MRL, Melo CCDF, Amaral DS, Da Silva JLF, Prado RDM, De Alcântara NF (2023) Soil and foliar Si fertilization alters elemental stoichiometry and increases yield of sugarcane cultivars. *Scientific Reports* 13(1): 16040. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-43351-z>
- Flores CM, Del-Angel E, Frías DM, Gómez AL (2018) Evaluación de parámetros fisicoquímicos y metales pesados en agua y sedimento superficial de la Laguna de las Ilusiones, Tabasco, México. *Tecnología y Ciencias del Agua* 9(2): 39-57. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2018-02-0>
- Garba L, Bhardwaj HA, Usuman AU, Sayyadi IA, Ismail MI (2025) Sustainable utilization of sugarcane bagasse ash as stabilization agent on subgrade material for highway construction-A review. *Sigma* 43(3): 1038-1051. <https://doi.org/10.14744/sigma.2025.00090>
- Gikunju EM, Bosire GO, Onyari JM, Nyongesa FW, Beleta D (2024) Physico-chemical characterization of feldspars for application as fluxing agents: Experimental and ab initio computational approaches. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C* 135: 103651. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2024.103651>
- Hodson MJ, Evans DE (2020) Aluminium-silicon interactions in higher plants: an update. *Journal of Experimental Botany* 71(21): 6719-6729. <https://doi.org/10.1093/jxb/eraa024>
- Jain R (2025) Role of silicon in sugarcane: a review. *Agricultural Reviews* 46(2): 288. <https://doi.org/10.18805/ag.R-2568>
- Jaret SJ, Johnson JR, Sims M, DiFrancesco N, Glotch TD (2018) Microspectroscopic and petrographic comparison of experimentally shocked albite, andesine, and bytownite. *Journal of Geophysical Research: Planets* 123(7): 1701-1722. <https://doi.org/10.1029/2018JE005523>
- Kovalev VN, Spivak AV, Setkova TV, Ksenofontov DA, Volkova EA, Korepanov VI, Zakharchenko ES (2024) High-pressure Raman spectroscopy study of α -quartz-like Si_{1-x}GexO₂ solid solution. *Journal of Physics and Chemistry of Solids* 185: 111749. <https://doi.org/10.1016/j.jpics.2023.111749>
- Kumar A, Kumar V, Singh B (2021) Cellulosic and hemicellulosic fractions of sugarcane bagasse: Potential, challenges and future perspective. *International Journal of Biological Macromolecules* 169: 564-582. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.12.175>
- Liu L, Wang L, Song L, Sheng M (2025) Carbon sequestration law by phytoliths in the bamboo forests: Insights for the management of phytolith carbon sink. *Global Ecology and Conservation* 58: e03491. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2025.e03491>
- Majumdar S, Prakash NB (2020) An overview on the potential of silicon in promoting defence against biotic and abiotic stresses in sugarcane. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition* 20(4): 1969-1998. <https://doi.org/10.1007/s42729-020-00269-z>
- Maldonado-García MA, Hernández-Toledo UI, Montes-García P, Valdez-Tamez PL (2018) The influence of untreated sugarcane bagasse ash on the microstructural and mechanical properties of mortars. *Materiales de Construcción* 68(329): e148-e148. <https://doi.org/10.3989/mc.2018.13716>
- Maldonado-García MA, Montes-García P, Valdez-Tamez PL (2017) A review of the use of sugarcane bagasse ash with a high LOI content to produce sustainable cement composites. *Academic Journal of Civil Engineering* 35(2): 597-605. <https://doi.org/10.26168/icbbm2017.90>
- Mamedova G (2020) Synthesis of different structural types of zeolites in the halloysite-dolomite-obsidian system. *Chemistry Journal of Moldova* 15(1): 31-40. <http://doi.org/10.19261/cjm.2020.664>
- Melo LCA, Alleoni LRF, Carvalho G, Azevedo RA (2011) Cadmium-and barium-toxicity effects on growth and antioxidant capacity of soybean (*Glycine max L.*) plants, grown in two soil types with different physicochemical properties. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 174(5): 847-859. <https://doi.org/10.1002/jpln.201000250>

- Moon G, Jang EH, Kim S, Choe Y, Chung S (2022) Hydrothermal synthesis and characterization of quartz nanocrystals-Implications from a simple kinetic growth model. *Korean Journal of Chemical Engineering* 39(2): 440-450. <https://doi.org/10.1007/s11814-021-0996-9>
- Morana M, Angel RJ, Alvaro M, Mihailova B (2023) High-temperature behavior of quartz-in-garnet system revealed by in situ Raman spectroscopy. *Physics and Chemistry of Minerals* 50(3): 21. <https://doi.org/10.1007/s00269-023-01246-5>
- Murri M, Gonzalez JP, Mazzucchelli ML, Prencipe M, Mihailova B, Angel RJ, Alvaro M (2022) The role of symmetry-breaking strains on quartz inclusions in anisotropic hosts: Implications for Raman elastic geobarometry. *Lithos* 422: 106716. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2022.106716>
- Negrão DR, Driemeier C (2022) Fate of silica phytoliths in the industrial crushing of sugarcane stalks. *Industrial Crops and Products* 185: 115132. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.115132>
- Niamnuy C, Sungsinchai S, Jarernsamrit P, Devahastin S, Chareonpanich M (2024) Synthesis and characterization of aluminosilicate and zinc silicate from sugarcane bagasse fly ash for adsorption of aflatoxin B1. *Scientific Reports* 14(1): 14562. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-65158-2>
- Oliveira JA, Cunha FA, Ruotolo LA (2019) Synthesis of zeolite from sugarcane bagasse fly ash and its application as a low-cost adsorbent to remove heavy metals. *Journal of Cleaner Production* 229: 956-963. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.069>
- Ouedraogo M, Sawadogo M, Sanou I, Barro M, Nassio S, Seynou M, Zerbo L (2022) Characterization of sugar cane bagasse ash from Burkina Faso for cleaner cement production: Influence of calcination temperature and duration. *Results in Materials* 14: 100275. <https://doi.org/10.1016/j.rinma.2022.100275>
- Palakurthy S, Houben L, Elbaum M, Elbaum R (2024) Silica Biomineralization with Lignin Involves Si–O–C Bonds That Stabilize Radicals. *Biomacromolecules* 25(6): 3409-3419. <https://doi.org/10.1021/acs.biomac.4c00061>
- Patel H (2020) Environmental valorisation of bagasse fly ash: a review. *RSC advances* 10(52): 31611-31621. <https://doi.org/10.1039/D0RA06422J>
- Payró-de-la-Cruz EP, Salgado-García S, De los Santos-López G, Castelán-Estrada M, Córdova-Sánchez S, Gómez-Leyva JF, Hernández-Cuevas L (2021) Diversity of VAM in soils used to cultivate sugarcane (*Saccharum spp.*) in Tabasco, Mexico. *Agro Productividad* 14(11): 159-168. <https://doi.org/10.32854/agrop>
- Pérez-Casas JA, Zaldívar-Cadena AA, Álvarez-Mendez A, Ruiz-Valdés JJ, Parra-Arciniega SM DL, López-Pérez, DC, & Sánchez-Vázquez, AI (2023) Sugarcane bagasse ash as an alternative source of silicon dioxide in sodium silicate synthesis. *Materials* 16(18): 6327. <https://doi.org/10.3390/ma16186327>
- Pérez LMCP, Torres JH, Peredo LZ, González LG, Hipólito MG, Guajardo CF, Rodríguez AB (2022) Obtaining hematite nanoflakes substrates by electrochemical anodization of iron foil and heat treatment. *ECS Transactions* 106(1): 203. <https://doi.org/10.1149/10601.0203ecst>
- Phuong NTT, Huong PTM, Hai TQ, Van Hoan N, Thoa NT, Ha NM, Thuan TD (2023) Studying the use of thermomechanical treated sugarcane bagasse as partial replacement of quartz and feldspar in ceramic tiles production. *Vietnam Journal of Chemistry* 61: 71-76. <https://doi.org/10.1002/vjch.202300082>
- Prabhath N, Kumara BS, Vithanage V, Samarathunga AI, Sewwandi N, Maduwantha K, Koswattage K (2022) A review on the optimization of the mechanical properties of sugarcane-bagasse-ash-integrated concretes. *Journal of Composites Science* 6(10): 283. <https://doi.org/10.3390/jcs6100283>
- Qayoom M, Shah KA, Pandit AH, Firdous A, Dar GN (2020) Dielectric and electrical studies on iron oxide (α -Fe₂O₃) nanoparticles synthesized by modified solution combustion reaction for microwave applications. *Journal of Electroceramics* 45: 7-14. <https://doi.org/10.1007/s10832-020-00219-2>

- Roy A, Wang S, Komvopoulos K (2023) A review of plasma-assisted deposition methods for amorphous carbon thin and ultrathin films with a focus on the cathodic vacuum arc technique. *Journal of Materials Research* 38(3): 586-616. <https://doi.org/10.1557/s43578-022-00868-9>
- Rubio GO, Ribeiro DO, De Souza ZH, Pereira RM, Silva JG, Dalmolin B (2023) Sugarcane bagasse ash doses affect soil chemical attributes and pigeon pea initial performance. *Revista de Agricultura Neotropical* 10(1): e7150. <https://doi.org/10.32404/rean.v10i1.7150>
- Sakib N, Hasan R, Mutalib AA, Jamil M, Raman SN, Kaish ABMA (2023) Utilization of sugar mill waste ash as pozzolanic material in structural mortar. *Minerals* 13(3): 324. <https://doi.org/10.3390/min13030324>
- SEMARNAT (2004) NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004. Criterios para determinar las concentraciones de remediación de suelos contaminados por arsénico, bario, berilio, cadmio, cromo hexavalente, mercurio, níquel, plata, plomo, selenio, talio y/o vanadio. <https://www.gob.mx/profepa/documentos/norma-oficial-mexicana-nom-147-semarnat-ssa1-2004>. Fecha de consulta: 30 de mayo de 2025.
- Seroka NS, Taziwa RT, Khotseng L (2022) Extraction and synthesis of silicon nanoparticles (SiNPs) from sugarcane bagasse ash: a mini-review. *Applied Sciences* 12(5): 2310. <https://doi.org/10.3390/app12052310>
- Seyoum R, Tesfamariam BB, Andoshe DM, Algahtani A, Ahmed GMS, Tirth V (2021) Investigation on control burned of bagasse ash on the properties of bagasse ash-blended mortars. *Materials* 14(17): 4991. <https://doi.org/10.3390/ma14174991>
- Simón M, Benítez A, Caballero A, Morales J, Vargas O (2018) Untreated natural graphite as a graphene source for high-performance li-ion batteries. *Batteries* 4(1): 13. <https://doi.org/10.3390/batteries4010013>
- Sindhu S, Praveenkumar S, Sankarasubramanian G (2021) Evaluation of pozzolanic performance of treated and untreated bagasse ash. In: Shukla SK (eds) *Smart technologies for sustainable development lecture notes in civil engineering* 78. Springer. Singapore. pp. 359-367. https://doi.org/10.1007/978-981-15-5001-0_30
- Sleimi N, Kouki R, Hadj-Ammar M, Ferreira R, Pérez-Clemente R (2021) Barium effect on germination, plant growth, and antioxidant enzymes in *Cucumis sativus* L. plants. *Food Science & Nutrition* 9(4): 2086-2094. <https://doi.org/10.1002/fsn3.2177>
- SMN (2024) El Servicio Meteorológico Nacional y Comisión Nacional del Agua. Ciudad de México, México. <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/temperaturas-y-lluvias/resumenes-mensuales-de-temperaturas-y-lluvias>. Fecha de consulta: 10 de mayo de 2025.
- Somyanonthanakun W, Greszta A, Roberts AJ, Thongmee S (2023) Sugarcane bagasse-derived activated carbon as a potential material for lead ions removal from aqueous solution and supercapacitor energy storage application. *Sustainability* 15(6): 5566. <https://doi.org/10.3390/su15065566>
- Tarcan R, Todor-Boer O, Petrovai I, Leordean C, Astilean S, Botiz I (2020) Reduced graphene oxide today. *Journal of Materials Chemistry C* 8(4). <https://doi.org/10.1039/C9TC04916A>
- Thangaraj B, Mumtaz F, Abbas Y, Anjum DH, Solomon PR, Hassan J (2023) Synthesis of graphene oxide from sugarcane dry leaves by two-stage pyrolysis. *Molecules* 28(8): 3329. <https://doi.org/10.3390/molecules28083329>
- Urade AR, Joshi R, Suresh KS, Lahiri I (2022) Graphene from sugar and sugarcane extract: synthesis, characterization, and applications. In: *Graphene from natural sources*. CRC Press. USA. pp. 1-28.
- USDA (2024) Foreign Agricultural Service. Sugar: World Markets and Trade. United States Department of Agriculture. <https://www.fas.usda.gov/data/sugar-world-markets-and-trade-05232024>. Fecha de consulta: 23 de mayo de 2025.
- Xu R, Huang J, Guo H, Wang C, Zhan H (2023) Functions of silicon and phytolith in higher plants. *Plant Signaling & Behavior* 18(1): 2198848. <https://doi.org/10.1080/15592324.2023.2198848>

- Yoldi M, Fuentes-Ordoñez EG, Korili SA, Gil A (2019) Zeolite synthesis from industrial wastes. *Microporous and Mesoporous Materials* 287: 183-191. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2019.06.009>
- Zhang P, Liao W, Kumar A, Zhang Q, Ma H (2020) Characterization of sugarcane bagasse ash as a potential supplementary cementitious material. Comparison with coal combustion fly ash. *Journal of Cleaner Production* 277: 123834. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123834>