ISSN-e: 2737-6419 Revista Athenea
Período: enero-marzo de 2026 Vol.7, Número 23, (pp. 18–27)

Artículo de revisión https://doi.org/10.47460/athenea.v7i23.124

Materiales carbonosos y nanomateriales de residuos de cacao para remoción de metales pesados

María Eugenia Ramos Flores*
https://orcid.org/0009-0004-7985-6019
mariaeugeniaramosflores@gmail.com
Unidad Educativa Nela Martínez Espinosa
La Troncal, Ecuador

Wilian Bravo
https://orcid.org/0000-0002-2599-6532
wilian.bravo@espoch.edu.ec
Escuela Superior Politécnica de Chimborazo
Riobamba, Ecuador

Maritza Tatiana Chaglla Cango
https://orcid.org/0000-0002-5331-4615
maritza.chaglla@espoch.edu.ec
Escuela Superior Politécnica de Chimborazo
Riobamba, Ecuador

Gabriela Belén Ureña Callay
https://orcid.org/0009-0001-5842-7379
gabriela.urena@espoch.edu.ec
Escuela Superior Politécnica de Chimborazo
Riobamba, Ecuador

Maribel Lema
https://orcid.org/0009-0000-5767-6798
fernanda.lema@espoch.edu.ec
Escuela Superior Politécnica de Chimborazo
Riobamba, Ecuador

Autor de correspondencia: mariaeugeniaramosflores@gmail.com

Recibido (29/09/2025), Aceptado (03/12/2025)

Resumen. El agua contaminada con metales pesados representa un riesgo crítico para la salud y los ecosistemas, especialmente en las regiones cacaoteras donde convergen las actividades agroindustriales y mineras. Este trabajo presenta una revisión estructurada sobre el uso de residuos de cacao como plataforma para el desarrollo de biosorbentes, materiales carbonosos y nanomateriales para la remoción de metales en sistemas acuosos. Se realizó una búsqueda en bases de datos científicas y se seleccionaron estudios con una clara caracterización de los materiales y evaluación experimental en fase acuosa. La evidencia se organizó según el tipo de residuo y material, discutiendo su desempeño, ventajas y limitaciones. Además, se identificaron brechas de investigación relacionadas con la escasez de ensayos en matrices del mundo real, información limitada sobre regeneración y vida útil, el tratamiento de Hg(II) y la falta de análisis integrales de sostenibilidad y viabilidad en contextos latinoamericanos.

Palabras clave: residuos de cacao, materiales carbonosos, metales pesados, hidrochar.

Carbonaceous Materials and Cacao Waste Nanomaterials for Heavy Metal Removal

Abstract. The presence of heavy metals in water poses a critical risk to human health and ecosystems, particularly in cocoa-producing regions where agro-industrial and mining activities converge. This work provides a structured review on the use of cocoa residues as a platform for developing biosorbents, carbonaceous materials, and nanomaterials for heavy metal removal in aqueous systems. A search of scientific databases was conducted, and studies were selected based on clear material characterization and experimental evaluation in aqueous phase. The evidence was organized according to residue type and derived material, analyzing performance, advantages, and limitations. Research gaps were identified regarding the scarcity of tests in real-world matrices, limited information on regeneration and service lifetime, challenges in the treatment of Hg(II), and the lack of comprehensive assessments of sustainability and feasibility in Latin American contexts.

Keywords: cocoa residues, carbonaceous materials, heavy metals, hydrochar.

I. INTRODUCCIÓN

El agua dulce constituye un recurso fundamental para el desarrollo humano, económico y ecosistémico, sin embargo, su calidad se deteriora por el vertido de contaminantes inorgánicos persistentes. Entre ellos, los metales pesados preocupan por su toxicidad, bioacumulación y lenta degradación. Elementos como el mercurio, plomo, cadmio y cobre se han asociado con trastornos neurológicos, renales y cardiovasculares, además de deteriorar la vida acuática y los servicios ecosistémicos que dependen de las aguas superficiales y subteráneas [1].

En América Latina, actividades como la minería, la industria química y la agricultura intensiva, ejercen una fuerte presión sobre los recursos hídricos y favorecen la liberación de metales pesados a ríos y acuíferos [2]. Aunque existen normas que establecen los niveles máximos permisibles, su implementación efectiva se ve limitada por problemas de infraestructura y a la falta de capacidad técnica, especialmente en zonas rurales [3].

Las tecnologías convencionales de remoción de metales, como la precipitación química, el intercambio iónico y varios procesos de membrana, han demostrado su eficacia en condiciones controladas. No obstante, suelen requerir altos costos de inversión y operación, generación de lodos y personal especializado, limitando su uso sostenido en contextos con restricciones económicas. Estas limitaciones han impulsado la búsqueda de adsorbentes de bajo costo, disponibles localmente y con buena eficiencia de remoción [4].

En este marco, los materiales carbonosos biogénicos, producidos a partir de residuos agroindustriales, se han convertido en una opción prometedora para el tratamiento del agua, por su bajo costo y compatibilidad con esquemas de economía circular [5], [6]. Entre ellos, los derivados del cacao (cáscaras, restos de mazorcas y tallos) destacan en los países productores, por el alto volumen de subproductos y por su composición lignocelulósica rica en grupos funcionales que pueden participar en la adsorción y formación de complejos con metales pesados. Estudios pioneros demostraron la capacidad de las cáscaras de cacao para fijar plomo y otros metales en soluciones ácidas, en tanto que trabajos posteriores exploraron su modificación química y activación para mejorar su rendimiento como biosorbentes [7].

Al mismo tiempo, el desarrollo de nanomateriales a partir de biomasa, en particular materiales magnéticos modificados con óxidos de hierro, ha creado nuevas posibilidades para diseñar adsorbentes más selectivos y fáciles de recuperar. La combinación de matrices carbonosas de residuos agroindustriales con fases magnéticas genera materiales híbridos con mayor área superficial y diversidad de grupos funcionales, además de permitir su separación mediante campos magnéticos [8]. En este contexto, estudios recientes han evaluado hidrochars y materiales magnéticos obtenidos de residuos de cacao para remover metales pesados en soluciones acuosas, con altas eficiencias de remoción y mejoras en parámetros de calidad de agua como pH, conductividad y turbidez [9].

No obstante, la información sobre materiales carbonosos y nanomateriales derivados de residuos de cacao sigue fragmentada. Las diferencias en condiciones de síntesis, especies metálicas estudiadas y escala experimental dificultan la comparación de su rendimiento y persisten interrogantes sobre su comportamiento en matrices reales, capacidad de regeneración y viabilidad económica y ambiental, particularmente en contextos latinoamericanos donde hay muchos residuos de cacao y problemas de contaminación.

Ante este escenario, es necesario sintetizar y analizar críticamente la evidencia sobre el uso de residuos de cacao como plataforma para desarrollar materiales carbonosos y nanomateriales destinados a la remoción de metales pesados en agua. El objetivo de esta revisión fue exponer el estado del arte de dichos materiales, rutas de síntesis, características fisicoquímicas relevantes, mecanismos de interacción con especies metálicas y desempeño en distintas condiciones experimentales, así como discutir los avances en América Latina, las oportunidades en el marco de la economía circular y los desafíos para su aplicación efectiva.

II. MARCO TEÓRICO

A. Materiales carbonosos en el tratamiento de aguas

El empleo de materiales carbonosos obtenidos de residuos agroindustriales se ha consolidado como una alternativa para tratar aguas contaminadas con metales pesados, por su bajo costo, disponibilidad local y compatibilidad con esquemas de economía circular [1]. Entre ellos, biochars, hidrochars y carbones activados comparten una matriz rica en carbono, grupos funcionales oxigenados y estructuras porosas que interactúan con iones metálicos. La conversión de la biomasa mediante pirólisis, carbonización hidrotermal o activación física o química controla el carbono fijo, la distribución de poros y la densidad de sitios activos, y con ello la capacidad de adsorción, la cinética de remoción y la estabilidad frente a variaciones de pH y fuerza iónica [2].

La valorización de residuos agrícolas como precursores de estos materiales ofrece ventajas ambientales y económicas, al reducir los residuos que requieren gestión y generar productos con valor agregado para soluciones de tratamiento de aguas que aprovechan recursos locales, especialmente en regiones donde coexisten actividades agroindustriales y problemas de contaminación por metales [7].

B. Residuos de cacao como materia prima lignocelulósica

En la producción de cacao se generan varias fracciones residuales sólidas, principalmente cáscara de mazorca, cascarilla del grano y restos de vaina y tallos. Estas exhiben una estructura lignocelulósica típica, con contenidos significativos de celulosa, hemicelulosa, lignina y minerales como potasio, calcio y magnesio [9], lo que favorece su conversión en materiales carbonosos porosos con grupos superficiales idóneos para procesos de intercambio iónico y formación de complejos con iones metálicos.

Estudios preliminares han mostrado que la cáscara de cacao puede actuar como biosorbente de metales en soluciones acuosas, incluso tras procesos simples de lavado, secado y molienda [10]. A partir de estos resultados, las investigaciones han incorporado tratamientos químicos suaves y procesos termoquímicos orientados a incrementar la capacidad de adsorción y optimizar la estabilidad de los materiales en condiciones de operación más exigentes [11].

Desde una perspectiva regional, el aprovechamiento de residuos de cacao como materia prima para adsorbentes se alinea con la integración de soluciones de tratamiento de aguas en cadenas productivas existentes, lo que resulta especialmente pertinente en países latinoamericanos productores de cacao con problemas de contaminación por metales en cuerpos de agua en zonas agrícolas y mineras [9].

C. Materiales carbonosos derivados de residuos de cacao

La literatura identifica diversas categorías de materiales carbonosos obtenidos a partir de residuos de cacao: biosorbentes crudos o ligeramente modificados, biochars, carbones activados e hidrochars. Los biosorbentes crudos se elaboran a partir de cáscaras o cascarilla mediante lavado, secado y molienda, en ocasiones con ajustes de pH o tratamientos químicos simples. Su principal ventaja es el bajo costo de preparación, lo que los hace atractivos en contextos con recursos limitados [4], aunque su área superficial y densidad de sitios activos suelen ser menores que las de materiales más procesados. En consecuencia, se han planteado modificaciones simples como la oxidación controlada y la incorporación de nuevos grupos funcionales para incrementar su afinidad por metales específicos [6].

El biochar se obtiene por pirólisis de residuos de cacao en atmósfera limitada en oxígeno y a temperaturas intermedias o altas, lo que concentra el carbono, estabiliza la matriz y genera una red de poros que favorece la adsorción de metales [8]. La temperatura de pirólisis, el tiempo de residencia y el pretratamiento de la biomasa condicionan el balance entre grupos oxigenados y estructuras aromáticas más complejas y porosas [12]. Cuando el biochar se somete a activación física o química, se obtienen carbones activados con áreas superficiales muy elevadas y distribución de micro y mesoporos, que incrementan la capacidad de adsorción [11]. Con residuos de cacao, se han reportado carbones activados con un rendimiento notable, aunque su producción conlleva un consumo energético y de reactivos más elevado.

La carbonización hidrotermal en medio acuoso y a temperaturas relativamente bajas permite obtener hidrochars de residuos de cacao con altos rendimientos de carbono y superficies ricas en grupos funcionales polares. A diferencia del biochar, el hidrochar preserva más oxígeno superficial y suele presentar

morfologías más compactas con mayor porosidad en el rango meso y macroporoso [6]. Estos materiales logran eficiencias significativas de eliminación de metales en medios ácidos y modifican parámetros de calidad del agua como pH y conductividad [9], además de poder emplearse directamente como adsorbentes o como precursores en etapas de activación o incorporación de fases magnéticas.

D. Nanomateriales y materiales magnéticos derivados de residuos de cacao

La integración de fases magnéticas en matrices carbonosas de origen lignocelulósico ha emergido como una estrategia para facilitar la separación y regeneración de adsorbentes [8]. En este enfoque, la biomasa de cacao se combina con precursores de óxidos de hierro y se somete a condiciones de síntesis donde la formación de nanopartículas magnéticas ocurre simultáneamente a la carbonización, produciendo materiales híbridos que aprovechan la sinergia entre la porosidad y los grupos funcionales de la fracción carbonosa y las propiedades magnéticas de las fases inorgánicas. Este fenómeno facilita la recuperación de los sólidos mediante campos magnéticos externos y reduce la necesidad de etapas de filtración [8].

E. Mecanismos de interacción con metales pesados

Los mecanismos mediante los cuales los materiales carbonosos y los nanomateriales obtenidos de residuos de cacao remueven metales pesados en solución responden a la combinación de propiedades texturales y químicas de la superficie. Los estudios de caracterización en biomasas similares revelan la presencia de grupos hidroxilo, carboxilo, carbonilo y éter, además de superficies rugosas con poros que favorecen la retención de iones metálicos [12], [13].

En biosorbentes crudos y biochars, la remoción se explica por procesos de intercambio iónico entre los iones metálicos en solución y cationes presentes en la matriz (Ca^{2+}, K^{+}, Mg^{2+}), complementados por la formación de complejos superficiales con grupos oxigenados y, en ciertas condiciones, por microprecipitación de especies metálicas en la superficie [14].

En los carbones activados, la gran área superficial y la abundancia de microporos favorecen la adsorción física y la formación de capas monomoleculares, mientras que los grupos superficiales determinan la selectividad hacia determinadas especies metálicas [11]. En los materiales magnéticos se han descrito interacciones específicas entre los metales y las fases de óxidos de hierro, que pueden involucrar formación de complejos y, en algunos casos, reacciones redox [7].

Los estudios experimentales con residuos de cacao han evidenciado que las variaciones en el pH y la conductividad eléctrica durante las pruebas de adsorción están íntimamente asociadas con estos mecanismos, reflejando el intercambio de especies en solución y la incorporación de metales en la matriz sólida [9].

III. METODOLOGÍA

Este estudio se realizó como una revisión estructurada de materiales carbonosos y nanomateriales derivados de residuos de cacao para la remoción de metales pesados del agua. La primera fase definió la pregunta central y el alcance del trabajo, centrándose en investigaciones que utilizaron residuos de cacao como materia prima y evaluaron su rendimiento en sistemas acuosos con metales pesados. Con base en esta delimitación, se establecieron las variables de interés, siendo éstas, el tipo de residuos de cacao utilizado, el proceso de producción del material (biosorbente crudo, biocarbón, hidrocarbón, carbón activado o material magnético), las especies metálicas estudiadas, las condiciones de operación y los principales resultados de remoción.

En la segunda fase, se realizó una búsqueda de información en bases de datos científicas y repositorios institucionales. La búsqueda se ejecutó en *Scopus*, *Web of Science*, *SciELO* y Google Académico, empleando combinaciones de palabras clave relacionadas con residuos de cacao, biochar, hydrochar, materiales magnéticos, metales pesados y tratamiento de aguas. La búsqueda se limitó a artículos originales, capítulos de libros, tesis y revisiones relevantes publicadas en las últimas dos décadas, priorizando trabajos que presentaran resultados experimentales en la fase acuosa. En total se identificaron 35 registros.

Luego de eliminar duplicados y documentos fuera del tema según el título y el resumen, se mantuvieron 25 documentos, cuyos textos completos fueron evaluados. En esta etapa se aplicaron criterios de calidad basados en la pertenencia a revistas arbitradas o tesis de posgrado, en la descripción explícita de la obtención y caracterización básica del material y, en el reporte de resultados cuantitativos de remoción o capacidad de adsorción en un medio acuoso. Fueron excluidos 6 documentos que no cumplían simultáneamente estos criterios. Finalmente, 19 documentos formaron parte de la revisión, 11 estudios primarios sobre materiales derivados de residuos de cacao aplicados para remoción de metales pesados en agua, y 8 documentos complementarios empleados como soporte conceptual y de contexto.

Una vez compilado el conjunto final de documentos, se creó una matriz de extracción de información en la que se registraron sistemáticamente los datos relevantes: tipo de residuo de cacao, especies metálicas evaluadas y principales indicadores de rendimiento (porcentaje de remoción, capacidad de adsorción y observaciones sobre cambios en los parámetros de calidad del agua). Con base en esta matriz, los estudios se organizaron en categorías tipológicas (biosorbentes crudos o modificados, biocarbones, carbones activados, hidrocarbones y materiales magnéticos), y se identificaron patrones comunes, diferencias metodológicas y vacíos de información.

IV. RESULTADOS

De acuerdo con la metodología propuesta, se seleccionó un conjunto de estudios primarios sobre el uso de residuos de cacao como materia prima para la obtención de biosorbentes, materiales carbonosos y nanomateriales aplicados a la remoción de metales pesados del agua, priorizando aquellos con caracterización fisicoquímica clara, evaluación en sistemas acuosos sintéticos e información sobre capacidad de adsorción o eficiencia de remoción. En total se identificaron once estudios recientes y representativos, principalmente de Canadá, Perú, Colombia, Ghana, Indonesia y África, resumidos en la Tabla 1, que permiten comparar de manera coherente el desempeño de biomasa cruda, biosorbentes modificados, biochars, carbones activados, materiales híbridos e hidrochars.

Tabla 1. Estudios seleccionados sobre materiales derivados de residuos de cacao para remoción de metales pesados en agua.

Estudio	**Residuo de cacao**	**Tipo de material**	**Metales objetivo**	**Resultados**
[10]	Cáscara	Biomasa cruda	10 cationes metálicos	$q_{máx}$ para Pb $\approx$ 6,2 mg/g; rápida remoción ($<$ 2 h).
[15]	Pericarpio	Biosorbente crudo	Cr(VI)	$q_{máx} \approx$ 48,5 mg/g; isoterma Langmuir.
[16]	Cáscara	Biosorbente crudo	Pb(II), Cd(II)	$q_{máx}$ 200–210 mg/g; efecto del tamaño de partícula.
[17]	Cáscara	Biosorbente en columna	Pb(II), Cd(II)	$\sim$ 90% de remoción en sistemas monocomponente.
[12]	Cáscara de mazorca	Biochar (500 °C)	Pb(II), Hg(II), Cd(II)	Remoción $\sim$97–99,9% para Pb, Hg y Cd.
[14]	Pod husk	Biochar (microondas)	Cd(II)	Remoción de decenas mg/g; buena estabilidad.
[11]	Pod husk	Carbón activado ($ZnCl_2$)	As(V)	BET $\sim$780 m^2/g; remoción As(V) $\sim$80% en $<$ 1 h.
[13]	Cáscara	Biochar (300–380 °C)	Hg(II)	Capacidad 0,106 mg/g a 90 min.
[18]	Cáscara	Carbón dopado con quitosano	Cr(VI), Pb(II)	Supera al carbón activado comercial.
[19]	Cáscara	Biomaterial modificado	Cr(VI), NO_3^-	Mayor afinidad por Cr(VI) y nitrato.
[9]	Residuos de proceso	Hidrochar (HTC baja T)	Hg(II)	Remoción en medio ácido comparable a biochars T alta.

A. Biosorbentes lignocelulósicos de residuos de cacao

Los primeros hallazgos se basan en el uso directo de la cáscara o el pericarpio de cacao como biosorbentes sin transformación térmica intensiva. Meunier y su equipo [10] evaluaron cáscara de cacao para diez cationes metálicos en soluciones ácidas (pH=2), observando alta afinidad por Pb y tiempos de equilibrio inferiores a 2 h. Estos resultados demostraron tempranamente que la biomasa de cacao compite con otros residuos agrícolas como adsorbente de bajo costo.

En un estudio más reciente [15], se evaluó la biosorción de Cr(VI) en el pericarpio de cacao, con una capacidad máxima cercana a 48,5 mg/g y buen ajuste a la isoterma de Langmuir y a un modelo cinético de pseudo segundo orden, sugiriendo un mecanismo dominado por la quimisorción. Junto con [10], estos estudios muestran que, incluso sin carbonización, la matriz lignocelulósica del cacao ofrece sitios activos capaces de retener metales.

Estudios como el de Tejada-Tovar, López-Cantillo, Vidales-Hernández, Villabona-Ortiz y Acevedo-Correa [16] confirmaron que la disminución del tamaño de partícula incrementa significativamente la remoción debido al aumento de la superficie específica y la accesibilidad a los grupos funcionales superficiales. En cambio, Vera-Cabezas y sus colaboradores [17] transfirieron la biosorción de Cd(II) y Pb(II) a columnas de lecho fijo, logrando remociones cercanas al 90% en sistemas de uno y dos componentes y demostrando la viabilidad de operar en flujo continuo.

Comparativamente, estos resultados indican que la biomasa cruda de cacao puede alcanzar altas capacidades de remoción (hasta 200 mg/g) en condiciones controladas para ciertos metales (Pb, Cd), pero su rendimiento es sensible al pH, al tamaño de partícula y a la configuración del sistema (lote o columna). Estos biosorbentes constituyen la base frente a la cual se compararon más adelante los materiales carbonosos y nanoestructurados.

B. Biochars y carbones activados

La segunda categoría comprende materiales carbonosos obtenidos mediante tratamientos térmicos más intensivos. En el extremo menos complejo se encuentran los biocarbones de pirólisis, mientras que en el extremo más sofisticado se encuentran los carbones activados con áreas superficiales elevadas.

En el estudio de Abbey, Duwiejuah y Quianoo [12], se empleó un biochar de cáscaras de mazorcas de cacao (pirólisis a 500 °C) para eliminar Pb(II), Hg(II) y Cd(II) en sistemas monometálicos, logrando remociones prácticamente completas en 60 min. Estos resultados muestran que la pirólisis convierte el residuo de cacao en un adsorbente altamente competitivo, especialmente para el Hg(II).

Correa-Abril y su equipo [14] obtuvieron un biocarbón por pirólisis asistida por microondas (720 W, 15 min) a partir de cáscara de vaina y, combinando experimentación con cálculos de la teoría del funcional de la densidad (DFT), demostraron que la adsorción de Cd(II) está dominada por la fisisorción, con formación de especies como $CdCO_3$ en la superficie. Esto ilustra la transición de biochars convencionales a materiales carbonosos respaldados teóricamente a nivel molecular.

Cruz, Pirilä y Huuhtanen [11] produjeron carbón activado con activación química con K_2CO_3, KOH y $ZnCl_2$, con áreas BET cercanas a 780 m^2/g y remociones de As(V) de hasta el 80% en menos de una hora a pH casi neutro, mostrando que los residuos de cacao pueden generar materiales altamente competitivos frente a carbones comerciales.

En general, estos trabajos indican que los biocarbones superan a la biomasa cruda en eficiencia y cinética de remoción, y que los carbones activados ofrecen mayores capacidades, mientras que los biocarbones más recientes permiten diseñar arquitecturas superficiales específicas y respaldar los mecanismos de adsorción con herramientas computacionales.

C. Hidrochars y materiales modificados

El hidrochar producido por carbonización hidrotermal de residuos de cacao, como en el estudio de Ormaza-Hugo y su equipo [9], ocupa una posición intermedia entre la biomasa cruda y los biocarbones de alta temperatura. Operando a temperaturas moderadas en medio acuoso ácido, el hidrochar retiene una fracción significativa de grupos oxigenados que favorecen la formación de complejos de Hg(II) y otros cationes, a la vez que reduce el consumo de energía del proceso. En pruebas de adsorción en medio ácido, mostró eficiencias de remoción de Hg(II) superiores al 80%, comparables a las de biocarbones

fabricados a 500 °C, aunque con capacidades inferiores a las de los carbones activados de área superficial muy alta.

Nursiah y sus colaboradores [13] obtuvieron un adsorbente mediante pirólisis de cáscaras de cacao (300–380 °C) para la remoción de Hg(II). La capacidad de adsorción reportada fue de aproximadamente 0,106 mg/g a los 90 min, con una cinética de pseudo segundo orden, luego de la caracterización estructural mediante Microscopía Electrónica de Barrido (MEB), Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR) y Difracción de Rayos X (DRX). En comparación con este valor, el hidrochar de baja temperatura presenta un rendimiento competitivo, lo que demuestra que las temperaturas muy altas no son esenciales para obtener materiales eficaces para el Hg(II) si se optimizan el pH, la dosis y el tiempo de contacto.

Asimismo, los materiales modificados o nanoestructurados derivados de residuos de cacao representan un paso adicional en la cadena de valor. En el estudio de Okoya, Akinyele, Amuda y Ofoezie [18], se dopó quitosano en carbón de cáscara de cacao, obteniendo un compuesto con mayor capacidad de adsorción de Cr(VI) y Pb(II) que un carbón activado comercial, debido a la introducción de grupos amino y mayor afinidad por especies aniónicas y cationes metálicos. Por su parte, Fotsing y su equipo [19] modificaron la superficie de un biomaterial a base de cáscara de cacao para aumentar la eliminación de Cr(VI) y nitrato, atribuyendo la mejora a la combinación de intercambio iónico, formación de complejos y cambios en la carga superficial.

Desde la perspectiva de esta revisión, el hidrochar de residuos de cacao puede interpretarse como un eslabón intermedio hacia nanomateriales funcionalizados, pero ofrece una plataforma carbonosa susceptible a la magnetización, dopado de polímeros o anclaje de nanopartículas metálicas que aumentan la selectividad hacia Hg(II) y otros metales pesados.

D. Avances y desafíos

Los biosorbentes crudos elaborados a partir de cáscara y pericarpio de cacao han demostrado altas capacidades de remoción en sistemas por lotes optimizados. Además, los biocarbones y carbones activados derivados de residuos de cacao solidifican este residuo como un precursor importante de materiales adsorbentes como los biocarbones que han logrado una eliminación prácticamente completa de Pb(II), Cd(II) y Hg(II), mientras que los carbones activados alcanzan áreas superficiales del orden de 700–800 m^2/g y una eliminación significativa de As(V).

Mientras tanto, los materiales modificados o nanoestructurados evidencian que la química superficial es tan importante como la porosidad y que combinar residuos de cacao con biopolímeros u otras fases activas permite superar el rendimiento de los materiales no modificados. Los biochars de cáscara de mazorca y el adsorbente pirolizado de Nursiah et al. [13] aportan datos valiosos, pero pocos estudios exploran sistemáticamente la influencia del pH, la competencia iónica y las matrices reales en la eliminación del Hg(II). El hidrochar de baja temperatura de residuos de cacao llena este vacío, aportando evidencia adicional en condiciones ácidas relevantes para efluentes mineros o industriales.

Muchos estudios se centran en una única vía de transformación como la pirólisis a 500 °C o la activación química con $ZnCl_2$, lo que dificulta establecer relaciones cuantitativas entre la energía del proceso, la funcionalidad superficial, la estabilidad y el rendimiento de la adsorción. La combinación de resultados de biochars, carbones activados e hidrochars resalta la necesidad de protocolos comparativos estandarizados.

Si bien existen estudios en columnas de lecho fijo para Pb(II), Cd(II) y Ni(II), estos aún son minoritarios en comparación con los ensayos por lotes, y son todavía más escasos cuando se trata de aguas residuales reales o matrices que contienen múltiples metales y aniones en competencia. Ampliar este tipo de evaluaciones es esencial para que los materiales derivados del cacao se incorporen a los sistemas de tratamiento prácticos.

El estudio pionero de Meunier y sus colaboradores [10] marcan el inicio del uso de cáscara de cacao para la remoción de metales en soluciones ácidas, seguido por trabajos sobre carbones activados y materiales modificados en 2012 y 2016 [11], [18]. A partir de 2018, se observa un incremento sostenido de publicaciones, con especial concentración desde 2020 [7], [8], [9], [12], [13], [14], [19]. Esta distribución confirma que la valorización de residuos de cacao como base para materiales carbonosos y nanomateriales orientados a la remoción de metales pesados constituye una línea de investigación emergente consolidada en los últimos cinco años.

Desde una perspectiva latinoamericana, una parte importante de los estudios primarios se realizó en Colombia, Perú y Ecuador [9], [15], [17]. En conjunto, estos trabajos muestran que la región dispone de grandes volúmenes de residuos de cacao y ha generado evidencia experimental propia sobre su uso como biosorbentes, biochars e hidrochars en laboratorio y, en algunos casos, en columnas de lecho fijo. La evaluación del pericarpio de cacao para Cr(VI) en Perú, el modelado de columnas con cáscara de cacao en Colombia y la producción de hidrochar a partir de residuos de procesamiento en Ecuador, ilustran el progreso regional en la valorización de estos residuos para el tratamiento de aguas contaminadas con metales pesados. Estos estudios, destacan una línea emergente de investigación en América Latina, alineada con los desafíos ambientales y productivos de las regiones productoras de cacao.

En el marco de la economía circular, los resultados muestran que los residuos de cacao pueden pasar de pasivo ambiental a insumo para tecnologías de tratamiento de aguas basadas en recursos locales. Integrar la producción de biosorbentes, biochars e hidrochars en plantas de procesamiento abre opciones de tratamiento descentralizado que aprovechan sinergias logísticas y reducen costos de transporte y disposición. Sin embargo, la aplicación en sistemas reales aún enfrenta desafíos poco abordados, como la variabilidad estacional de la biomasa, el escalamiento de la síntesis, la regeneración y gestión del adsorbente saturado, el cumplimiento normativo y la evaluación de la sostenibilidad. Abordar estos aspectos es clave para que las propuestas basadas en residuos de cacao pasen de las pruebas de laboratorio a sistemas operativos en contextos cacaoteros latinoamericanos.

CONCLUSIONES

El análisis de los estudios posiciona los residuos de cacao como una plataforma tecnológica versátil para el tratamiento de aguas contaminadas con metales pesados, con aplicaciones que abarcan desde biosorbentes crudos de muy bajo costo hasta materiales carbonosos avanzados y nanocompuestos. El hidrochar de baja temperatura se perfila como un enlace estratégico entre biosorbentes simples y materiales altamente activados o nanoestructurados, al ofrecer rendimientos competitivos sin requerir procesos térmicos ni etapas de activación extremadamente agresivos, lo que lo hace más viable en contextos con recursos limitados.

La principal contribución de esta revisión es organizar el conocimiento disperso según el tipo de residuo, ruta de transformación, metal objetivo y modo de operación, proporcionando una base práctica para seleccionar estrategias de tratamiento y reducir la fragmentación de la literatura. Desde una perspectiva regional, los resultados refuerzan el potencial de los materiales derivados de cacao como herramientas de economía circular en América Latina, favoreciendo sistemas de tratamiento descentralizados, adaptados a comunidades productoras, cooperativas y pequeñas plantas de procesamiento. Esto representa una oportunidad para conectar las cadenas de valor agrícolas con soluciones ambientales locales.

Finalmente, se identifican vacíos de conocimiento que orientan futuras investigaciones: escasez de estudios en matrices reales, poca evidencia sobre regeneración y vida útil de los adsorbentes, falta de comparaciones directas entre rutas de síntesis y casi nulos análisis de sostenibilidad. Los materiales a base de cacao muestran resultados prometedores, aunque aún parciales, que justifican el desarrollo de estudios comparativos y ensayos piloto.

REFERENCIAS

[1] V. Singh, N. Singh, S. N. Rai, A. Kumar, A. K. Singh, M. P. Singh, A. Sahoo, S. Shekhar, E. Vamanu, and V. Mishra, "Heavy metal contamination in the aquatic ecosystem: Toxicity and its remediation using eco-friendly approaches," *Toxics*, vol. 11, no. 2, p. 147, feb 2023, doi: 10.3390/TOXICS11020147.

[2] M. Y. Abubakar, K. B. Ahmad, T. S. Mathew, R. Shamsudden, H. M. Muhammad, M. Haladu, and A. B. Adam, "Heavy metal pollution in aquatic ecosystems: A review of toxic impacts and remediation strategies," *Kwaghe International Journal of Sciences and Technology*, vol. 1, no. 1, pp. 416–427, jul 2024, doi: 10.58578/KIJST.V1I1.3621.

[3] "Guidelines for drinking-water quality: Fourth edition incorporating the first and second addenda," En línea, 2022, consultado: dic. 12, 2025. Disponible en: https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/35417116/.

[4] M. Vera, C. Cruzat, and M. E. Vanegas, "Low-cost crop waste biosorbent technology for removing toxics and pollutants from wastewater," in *Agricultural, Forestry and Bioindustry Biotechnology and Biodiscovery*, aug 2020, pp. 177–216, doi: 10.1007/978-3-030-51358-0_11.

[5] B. B. Vera Raza, R. A. Mero Intriago, G. A. Burgos Briones, and R. E. Cevallos Cedeño, "Lignocellulosic waste and activated carbon production method," *Minerva*, vol. 1, no. Special, pp. 122–130, dec 2022, doi: 10.47460/minerva.v1ispecial.87.

[6] J. Wang, S. Zhang, C. Wei, H. Hou, G. Song, L. Cao, and J. Zhang, "Hydrothermal carbonization of heavy metal-contaminated biomass: Migration, transformation, and ecological stability changes of metals," *Int J Mol Sci*, vol. 26, no. 6, p. 2551, mar 2025, doi: 10.3390/IJMS26062551/S1.

[7] J. Coello-Cabezas, M. Verdezoto Carvajal M., N. Mejía cabezas, H. Sánchez-Moreno, E. Basantes Basantes, M. Estrella Semblantes, I. Gavilanez alvares, and R. Ormaza Hugo, "Organic coagulant combined with magnetite nanoparticles for the treatment of mercury-contaminated waters," *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, vol. 9, p. 100579, jun 2024, doi: 10.1016/J.CSCEE.2023.100579.

[8] C. Li, C. Zhang, S. Zhong, J. Duan, M. Li, and Y. Shi, "The removal of pollutants from wastewater using magnetic biochar: A scientometric and visualization analysis," *Molecules*, vol. 28, no. 15, p. 5840, aug 2023, doi: 10.3390/MOLECULES28155840.

[9] R. Ormaza Hugo, J. Naranjo, I. Gavilanez Alvarez, V. M. Cando, K. Tixi Gallegos, H. Sánchez-Moreno, F. Londo, O. D. Gavilanez, and J. Coello-Cabezas, "Production of hydrochar by low-temperature hydrothermal carbonization of residual biomass from cocoa production for mercury adsorption in acidic aqueous solutions," *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, vol. 10, p. 100938, dec 2024, doi: 10.1016/J.CSCEE.2024.100938.

[10] N. Meunier, J. Laroulandie, J. F. Blais, and R. D. Tyagi, "Cocoa shells for heavy metal removal from acidic solutions," *Bioresour Technol*, vol. 90, no. 3, pp. 255–263, dec 2003, doi: 10.1016/S0960-8524(03)00129-9.

[11] G. Cruz, M. Pirilä, and M. Huuhtanen, "Production of activated carbon from cocoa (Theobroma cacao) pod husk," *Journal of Civil & Environmental Engineering*, vol. 02, no. 02, 2012, doi: 10.4172/2165-784X.1000109.

[12] C. Y. B. Abbey, A. B. Duwiejuah, and A. K. Quianoo, "Removal of toxic metals from aqueous phase using cacao pod husk biochar in the era of green chemistry," *Applied Water Science*, vol. 13, no. 2, p. 57, dec 2022, doi: 10.1007/S13201-022-01863-5.

[13] C. Nursiah, H. Desvita, E. Elviani, N. Farida, A. Muslim, C. M. Rosnelly, M. Mariana, and S. Suhendrayatna, "Adsorbent characterization from cocoa shell pyrolysis (Theobroma cacao L) and its application in mercury ion reduction," *Journal of Ecological Engineering*, vol. 24, no. 6, pp. 366–375, 2023, doi: 10.12911/22998993/163167.

[14] J. Correa-Abril, U. Stahl, E. V. Cabrera, Y. J. Parra, M. A. Vega, S. Taamalli, F. Louis, and J. M. Rodríguez-Díaz, "Adsorption dynamics of Cd^{2+}(aq) on microwave-synthetized pristine biochar from cocoa pod husk: Green, experimental, and DFT approaches," *iScience*, vol. 27, no. 6, p. 109958, jun 2024, doi: 10.1016/J.ISCI.2024.109958.

[15] M. C. Fernández Pezua, "Biosorción de cromo hexavalente (Cr VI) de soluciones acuosas utilizando pericarpio de cacao (Theobroma cacao)," Master's thesis, Universidad Nacional

Intercultural de la Selva Central Juan Santos Atahualpa, nov 19 2024, consultado: dic. 18, 2025. Disponible en: http://hdl.handle.net/20.500.14744/27.

[16] C. Tejada-Tovar, K. López-Cantillo, K. Vidales-Hernández, A. Villabona-Ortiz, and D. Acevedo-Correa, "Kinetics and bioadsortion equilibrium of lead and cadmium in batch systems with cocoa shell (Theobroma Cacao L.)," *Contemporary Engineering Sciences*, vol. 11, no. 23, pp. 1111–1120, 2018, doi: 10.12988/ces.2018.83100.

[17] L. M. Vera-Cabezas, D. Bermejo-Campos, M. F. Uguña-Rosas, N. García-Alvear, M. Flores-Zamora, and D. Brazales, "Modelado en columna de lecho fijo para la bioadsorción de Cd^{2+} y Pb^{2+} con cáscara de cacao," *Revista internacional de contaminación ambiental*, vol. 34, no. 4, pp. 611–620, 2018, doi: 10.20937/RICA.2018.34.04.05.

[18] A. Okoya, A. Akinyele, O. Amuda, and I. Ofoezie, "Chitosan-grafted carbon for the sequestration of heavy metals in aqueous solution," *American Chemical Science Journal*, vol. 11, no. 3, pp. 1–14, jan 2016, doi: 10.9734/ACSJ/2016/21813.

[19] P. N. Fotsing, E. D. Woumfo, S. Mezghich, M. Mignot, N. Mofaddel, F. Le Derf, and J. Vieillard, "Surface modification of biomaterials based on cocoa shell with improved nitrate and Cr(VI) removal," *RSC Adv*, vol. 10, no. 34, pp. 20 009–20 019, may 2020, doi: 10.1039/D0RA03027A.