

Valorización de residuos agroindustriales lignocelulósicos para la obtención de carbón activado y su aplicación en la adsorción de contaminantes

Filiberta V. Pérez-Castillo* , Maria V. Hernandez-Ruiz** 

Facultad de Ciencias Básicas, Ingeniería y Tecnología, Universidad Autónoma de Tlaxcala, Ángel Solana S/N, San Luis Apizaquito, Apizaco, Tlaxcala, CP 90300, México.

Email de autores para correspondencia: *filibertavirginia.perez.c@uatx.mx;
**mvhernandez@uatx.mx

Recibido: 21 agosto 2025. **Aceptado:** 15 febrero 2026

RESUMEN

La generación a gran escala de residuos agroindustriales lignocelulósicos representa no solo un desafío ambiental significativo, sino también una oportunidad para su valorización dentro de la bioeconomía circular, orientada a la obtención de materiales de alto valor añadido, como el carbón activado (CA). Este enfoque permite desarrollar carbones activados aplicables en la remoción de contaminantes presentes en agua y aire, así como en la recuperación de sustancias de interés.

Se analizó la literatura sobre el uso de residuos agroindustriales lignocelulósicos para la obtención de CA, los principales métodos de activación —física, química, fisicoquímica, por microondas, biológica e hidrotérmica— destacando sus fundamentos, condiciones de operación y productos obtenidos. La activación física y química, que emplean agentes activantes como: H_3PO_4 , KOH , $NaOH$, $ZnCl_2$ o CO_2 continúan siendo de las más utilizadas. Los rendimientos reportados de CA varían entre 25 y 45%, dependiendo del tipo de biomasa y agente activante empleado. Las áreas superficiales específicas alcanzan entre 500 y 1800 $m^2 \cdot g^{-1}$, la capacidad de adsorción supera los 300 $mg \cdot g^{-1}$ para colorantes y los 150 $mg \cdot g^{-1}$ para metales pesados como Zn^{2+} , Pb^{2+} , Cu^{2+} y Cr^{6+} entre otros.

Los resultados de la revisión confirman el creciente interés en la valorización de una amplia variedad de residuos agroindustriales mediante su conversión en (CA), lo cual representa una estrategia viable en la transición hacia sistemas productivos sostenibles. Esta alternativa promueve el uso en cascada de la biomasa dentro de una bioeconomía circular y fomenta la simbiosis industrial entre distintos sectores productivos. Finalmente, se resalta la necesidad de profundizar en líneas de investigación orientadas al escalamiento de procesos, la caracterización avanzada de materiales y la evaluación de su desempeño bajo condiciones reales de tratamiento de contaminantes.

Palabras clave: Carbón activado; precursor lignocelulósico; residuos agroindustriales; sostenibilidad.

ABSTRACT

The large-scale generation of lignocellulosic agro-industrial waste represents not only a significant environmental challenge but also an opportunity for its valorization within the circular bioeconomy, aimed at obtaining high value-added materials such as activated carbon (AC). This approach enables the development of activated carbons applicable in the removal of contaminants from water and air, as well as in the recovery of substances of interest.

A review of the literature on the use of lignocellulosic agro-industrial residues for obtaining AC and on the main activation methods—physical, chemical, physicochemical, microwave, biological, and hydrothermal—was analyzed, highlighting their fundamentals, operating conditions, and obtained products. Physical and chemical activation, utilizing H_3PO_4 , KOH , NaOH , ZnCl_2 or CO_2 as activating agents, remain among the most widely used methods. Reported AC yields range between 25 and 45%, depending on the type of biomass and activating agent employed. Specific surface areas reach between 500 and 1800 $\text{m}^2\cdot\text{g}^{-1}$, the adsorption capacity exceeds 300 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ for dyes and 150 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ for heavy metals, metal such as Zn^{2+} , Pb^{2+} , Cu^{2+} and Cr^{6+} , among others.

The results of the review confirm the growing interest in the valorization of a wide variety of agro-industrial waste through its conversion into (AC), which represents a viable strategy in the transition towards sustainable production systems. This alternative promotes the cascading use of biomass within a circular bioeconomy and fosters industrial symbiosis between different productive sectors. Finally, the necessity to deepen research lines oriented towards process scaling, advanced material characterization, and the evaluation of its performance under real contaminant treatment conditions is highlighted.

Keywords: Activated carbon; lignocellulosic precursor; agro-industrial wastes; sustainability.

INTRODUCCIÓN

La agroindustria transforma productos agrícolas, ganaderos, pesqueros y forestales [1], generando una gran cantidad de residuos a lo largo de toda la cadena productiva [2-4]. Se estima que cerca de un tercio de los alimentos producidos en el mundo (1.3 mil millones de toneladas) terminan como desechos [5]. Industrias como: la cervecera, aceitera, láctea, café y cacao utilizan entre el 8 y 10% de sus

insumos, mientras que la industria papelera y de frutas usan entre el 30 y 50% generando enormes volúmenes de residuos que representan un reto ambiental urgente [6-12].

Los residuos agroindustriales son productos orgánicos sólidos, semisólidos o líquidos que, aunque no se aprovechan en el proceso que los genera, pueden transformarse mediante tecnologías físicas, químicas, biológicas o térmicas para originar productos de valor



económico, comercial y/o social [6, 8, 10, 11, 13-16].

La valorización de residuos agroindustriales no solo contribuye a reducir el volumen de desechos y la contaminación asociada, sino que también ofrece beneficios económicos y sociales. El uso de la biotecnología permite disminuir insumos contaminantes y favorecer la generación de materiales verdes, biodegradables y reciclables de alto valor añadido, como el carbón activado, además de biocombustibles, alimentos y suplementos nutricionales para animales, bioplásticos (empaques y embalajes), compuestos químicos (adsorbentes, ésteres, bioplaguicidas, antibióticos y pigmentos), enzimas (celulasas, hemicelulasas, xilanasas y pectinasas) y composta para el acondicionamiento de suelos [6, 8, 17-19].

Desde una perspectiva social, estas estrategias fortalecen el desarrollo local y la generación de empleo en comunidades rurales, en el marco de un modelo de economía circular que integra sostenibilidad, innovación y aprovechamiento eficiente de recursos biológicos renovables [20]. Este enfoque de bioeconomía circular promueve el uso en cascada de la biomasa priorizando la obtención de productos de alto valor añadido antes de su recuperación energética, y convierte los residuos agroindustriales lignocelulósicos en recursos estratégicos capaces de sustituir materiales fósiles, reducir impactos ambientales y dinamizar las economías del entorno. En consecuencia, el aprovechamiento de estos residuos se plantea como una estrategia de

manejo, siendo un factor clave del plan de desarrollo sostenible que atiende la demanda energética, el cambio climático, la escasez de recursos naturales y el manejo de los residuos [21-27].

Los residuos agroindustriales son ricos en contenido de carbono y, por tanto, son materiales adecuados para la producción de CA. Los grupos funcionales que presenta el CA en su estructura, hidroxilo, carboxilo, amino, tiol, fenilo y carbonilo le proveen capacidad de adsorción potencial para metales pesados [28-31], adsorción de diferentes colorantes, eliminación de contaminantes emergentes, captación de gases contaminantes, purificación de agua potable [32], entre otras. Este potencial se debe al contenido de material lignocelulósico (60–80%) y lignina (20–35%), que son perjudiciales para el medio ambiente si no se gestionan adecuadamente.

Entre las alternativas tecnológicas más destacadas para la valorización de residuos se encuentra la producción de CA mediante procesos sostenibles de activación física, química, fisicoquímica, biológica, hidrotermal o por microondas. Sin embargo, la producción sostenible de CA enfrenta diversos desafíos tecnológicos, económicos y ambientales, como el alto consumo energético de los métodos tradicionales, el uso de agentes activantes no renovables y la limitada escalabilidad industrial. En este contexto, emergen oportunidades de innovación orientadas a la sostenibilidad, como la activación verde, el uso de fuentes renovables de energía y la integración con modelos de simbiosis

industrial, donde los subproductos de una industria sirven como materia prima para otra, cerrando los ciclos materiales y energéticos [33].

El presente trabajo desarrolla una investigación cualitativa de la literatura, orientada a comprender, describir y analizar la producción de CA a partir de residuos agroindustriales lignocelulósicos. En el estudio se utilizan los métodos teóricos inductivo-deductivo y de análisis-síntesis, para examinar los aspectos clave del proceso: precursores lignocelulósicos, métodos de activación (física, química, fisicoquímica, microondas, biológica e hidrotérmica), condiciones operativas, propiedades del producto final y aplicación en la adsorción de contaminantes. Asimismo, se abordan las oportunidades y desafíos actuales en el desarrollo de estos procesos, desde una perspectiva de sostenibilidad y economía circular. La información analizada se recopiló progresivamente de publicaciones científicas relevantes, lo que permitió estructurar la revisión y profundizar en los aspectos antes mencionados, como se detalla en el apartado de Metodología.

Antecedentes

El CA es un adsorbente carbonoso, microcristalino y no grafitico, caracterizado por una alta superficie específica (entre 500 y 3000 m²/g) [34, 35], gran porosidad y la presencia de grupos funcionales en su superficie [29]. Estas propiedades le confieren una elevada capacidad de adsorción de contaminantes presentes en

corrientes gaseosas y líquidas [36].

El alto costo del CA comercial ha restringido su uso a gran escala en aplicaciones industriales [32, 37]. Por ello, ha surgido un creciente interés en la valorización de residuos agroindustriales como materia prima alternativa [38]. Estos materiales, también conocidos como biomasa lignocelulósica, cumplen con los requisitos esenciales para la síntesis de CA: bajo costo o insignificante, disponibilidad, y un alto contenido de carbono.

Los precursores son sometidos a procesos de activación para aumentar su porosidad y multiplicar el área superficial potenciando su capacidad como adsorbente [34, 38]. En el proceso de activación se promueve la desaparición del carbono volátil de los espacios situados entre las formaciones cristalográficas, haciendo que se formen una gran cantidad de pequeños espacios entre las partículas que se denominan poros, lo que produce que estos materiales posean una gran superficie interna en comparación con la superficie externa o geométrica. La estructura porosa de los CA se debe a los poros de diferentes tamaños, según la IUPAC, son clasificados en macroporos (diámetro de poro > 50 nm), mesoporos (diámetro de poro entre 2 y 50 nm) y microporos (diámetro de poro < 2 nm) [34]. Los macroporos sirven como poros alimentadores y de transporte de las sustancias adsorbidas hacia los micro y mesoporos, los mesoporos contribuyen en los procesos de adsorción líquido – sólido y los microporos proporcionan la superficie específica del CA y a la adsorción eficiente de moléculas.

Por lo general, los CA se producen a partir de recursos finitos como carbones minerales, turba y materiales residuales de petróleo. No obstante, no son materias primas baratas, ni están disponibles en todas las partes del planeta. La alta demanda y las necesidades han llevado al descubrimiento de recursos más baratos, ecológicos, sostenibles, de origen renovable y/o que su aprovechamiento implique un beneficio ambiental adicional para la producción de CA. Así, en las últimas décadas surgió un interés en el biocarbonizado, producido a partir del tratamiento térmico de biomasa, que luego puede ser convertido en CA [39-41].

Los residuos ricos en contenido de carbono se utilizan como precursores para la obtención de CA. Al ser modificados mediante procesos físicos, químicos, fisicoquímicos, biológicos o térmicos, estos residuos mejoran sus propiedades como adsorbentes. Asimismo, el CA producido puede regenerarse o reactivarse mediante métodos térmicos, químicos (ácido clorhídrico, ácido nítrico, hidróxido de sodio, cloruro de calcio, carbonato de sodio, EDTA) y microbiológicos. Estos procesos buscan prolongar la vida útil del material. Sin embargo, la capacidad adsorbente puede disminuir tras varios ciclos de regeneración.

El CA además de la estructura interna contiene otros elementos como el hidrógeno, oxígeno, azufre y material inorgánico. Estos elementos pueden provenir del precursor o ser introducidos en el proceso de activación, y/o en el tratamiento o modificación después de la activación [39, 42]. Los factores que influyen en la producción de CA son la materia prima, la

temperatura, la velocidad de calentamiento, el tiempo de residencia, el tamaño de las partículas, el efecto de los catalizadores, la presión y el pH inicial [39]. La utilidad de los CA depende de la superficie expuesta o BET (Teoría Brunauer, Emmet y Teller) que presenten después del tratamiento de activación.

La porosidad de los carbones activados es principalmente de microporosidad la cual es esencialmente espacio molecular, es decir, espacio con las dimensiones de átomos y moléculas dentro de la red de átomos de carbono. La estructura microporosa es esencialmente una red tridimensional de átomos de carbono, algunos en arreglos hexagonales y otros como átomos de carbono individuales unidos entre sí de manera extremadamente estrecha pero no empaquetados. Esta disposición de enlace da como resultado, un espacio que existe entre los átomos para crear un “pasaje” tridimensional interconectado (dimensiones de alrededor **0.5 nm**), en el que cada unidad espacial tiene una conexión con todas las demás dentro del carbón [43]. La macroporosidad, **> 50 nm**, se considera una superficie abierta y solo ayuda con el transporte del adsorbente al interior de las partículas de carbono. La estructura microporosa interna bien desarrollada provee al CA una gran capacidad adsorbente [4]. Esta capacidad puede variar con las propiedades inherentes del adsorbente como son área específica y la química de la superficie (Figura 1) [42-45]. La presencia o ausencia de los grupos superficiales, así como el mayor o

menor grado de deslocalización de los electrones π afecta a las interacciones del carbón con otros elementos o compuestos.

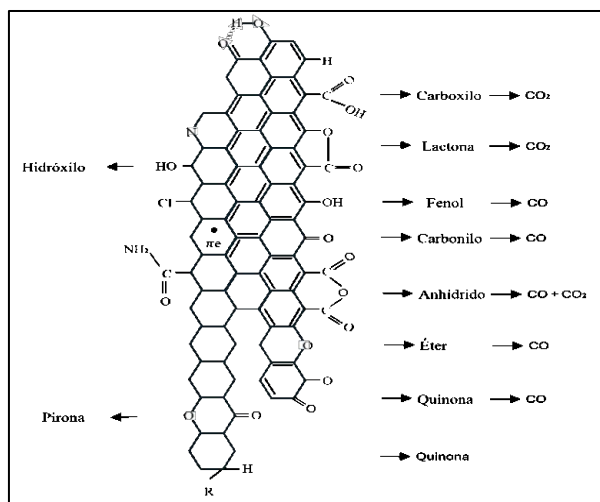


Figura 1. Grupos funcionales superficiales en un carbón activado, modificado de [42, 43, 65].

El rendimiento final en la producción también es otro aspecto a considerar a la hora de la elección del precursor los cuales deben contar con una serie de requisitos mínimos: a) no debe pasar por una etapa fluida o pseudo fluida durante su procesamiento térmico, ya que podría dar lugar a una estructura final ordenada, contraria a la estructura del CA, b) los precursores termoplásticos no son recomendables, ya que se funden al elevar la temperatura, perdiendo su forma inicial y su tamaño de partícula, c) los materiales de partida deben presentar un elevado contenido en carbono fijo, ya que este elemento es, en definitiva, el esqueleto del CA, d) el contenido inorgánico ha de ser reducido, ya que la presencia de fracción mineral afecta, entre otras cosas, a la capacidad de adsorción, e) la materia prima ha de contar, con buena disponibilidad,

accesibilidad y bajo precio, para garantizar un precio estable y competitivo del producto final [40].

Precusores lignocelulósicos utilizados para la obtención de CA

Debido a su alto contenido de carbono, bajo contenido de cenizas y su disponibilidad regional, se han explorado múltiples fuentes de materia prima, entre ellas, los residuos lignocelulósicos provenientes de actividades agroindustriales. La tabla 1 resume algunos de los más comunes reportados en la literatura.

Tabla 1. Residuos utilizados como precursores lignocelulósicos para obtener CA

Residuo Agroindustrial	Ejemplos específicos	Fuente
Bagazo	Caña de azúcar, café, agave, maíz	[20, 47-51]
Cáscaras de frutas y verduras	Mandarina, mango, melón, toronja, plátano, naranja, coco, garbanzo, lima, palma de aceite, café.	[48, 52-58]
Semillas y nueces	Pistacho, nuez, hueso de oliva, cereza, durazno	[57, 59, 60]
Residuos de cultivo	Paja de cebada, tallo de algodón, malezas	[59, 61]
Desechos forestales	Aserrín, cortezas de árboles	[48, 62, 63]
Otros	Pulpa de manzana, desechos de té	[61]

METODOLOGÍA

En el proceso de revisión se recopiló, seleccionó y analizó de manera progresiva la información científica publicada principalmente entre 2005 y 2025, considerando estudios que abordaran el proceso de carbonización de residuos lignocelulósicos, los distintos métodos de activación (física,



química, fisicoquímica, por microondas, biológica e hidrotérmica) y las posibles aplicaciones del CA en la eliminación de contaminantes. Este enfoque permitió organizar de forma coherente los avances tecnológicos, las tendencias de investigación y los desafíos asociados con la valorización de residuos y la sostenibilidad del proceso, en el marco de la bioeconomía circular y la simbiosis industrial.

Síntesis de CA a partir de residuos agroindustriales

La preparación de CA a partir de residuos lignocelulósicos comprende dos etapas principales: carbonización y activación. La carbonización implica la descomposición térmica del precursor en atmósfera inerte, típicamente a temperaturas entre 400 y 800 °C [34, 35], con el objetivo de eliminar volátiles y enriquecer el contenido de carbono fijo. La activación, por su parte permite el desarrollo de la porosidad y el incremento del área superficial, se mejora el volumen de poro, se agranda el diámetro de poro, características que le proveen de propiedades adsorbentes.

Durante la carbonización, las variables como la temperatura, la velocidad de calentamiento, el flujo de gas inerte y el tiempo de residencia influyen en el rendimiento del proceso. Durante la descomposición térmica de los precursores se pueden distinguir cinco intervalos de temperatura asociados con la descomposición secuencial de humedad, extractables, hemicelulosa, celulosa y lignina (Tabla 2).

Tabla 2. Intervalos de temperatura de la descomposición de materiales lignocelulósicos [64].

Zona	Intervalo de temperatura	Descripción de la etapa
I	< 100 °C	Evolución de la humedad y liberación de gases y líquidos
II	100 a 250 °C	Inicio de la descomposición de los extractables: terpenos, taninos, ácidos grasos, aceites y resinas
III	250 a 350 °C	Predomina la descomposición de la hemicelulosa
IV	350 a 500 °C	Principalmente descomposición de celulosa y lignina
V	> 500 °C	Descomposición de lignina

La microporosidad del carbón es independiente de la composición del precursor y de la velocidad del calentamiento en el proceso de carbonización [34, 35]. No obstante, la proporción entre los componentes en el precursor (hemicelulosa, celulosa y lignina) influyen en el rendimiento del carbón. Altos contenidos de celulosa y hemicelulosa reducen el rendimiento ya que en la degradación térmica se descompone casi en su totalidad; mientras que altos contenidos de lignina lo incrementan, debido a la gran estabilidad térmica que presenta. Por lo tanto, bajas temperaturas de proceso (baja volatilización), velocidad de calentamiento lenta (10 a 15 °C/min) y mayor contenido en lignina son los tres factores fundamentales que favorecen la producción del CA. La tabla 3 resume las principales características de los métodos que han sido reportados para la síntesis de CA a partir de diversos residuos.

Durante el proceso de carbonización se generan reacciones de descomposición del material (Figura 2). Inicialmente los enlaces menos estables generan un numeroso grupo de radicales libres muy reactivos, algunos de ellos se estabilizan y reaccionan con hidrógeno para producir material volátil. Ocurren reacciones de polimerización y condensación para los demás radicales libres que forman la estructura sólida del carbonizado. Se obtiene un material con alto

contenido de carbono fijo y con estructura porosa inicial, pues durante la carbonización los elementos no carbonosos se eliminan como gases combustibles del proceso y los átomos de carbono se reorganizan en cristales gráficos elementales, que son estructuras microcristalinas poco ordenadas. Este tipo de estructura genera espacios o poros en la superficie sólida del material [35].

Tabla 3. Características principales de los métodos de activación del Carbono.

Método de activación	Etapas principales	T (°C)	tiempo	Características del CA	Aplicaciones recomendadas	Ventajas	Desventajas
Activación Física	Carbonización en atmósfera inerte + Activación con gas oxidante (CO_2, H_2O)	700-1000	1-2 h	Microporos bien desarrollados, alta superficie específica (>1000 m ² /g)	Adsorción de gases y metales pesados	Bajo costo, sin químicos agresivos	Requiere altas temperaturas y más tiempo
Activación Química	Impregnación con agente químicos y oxidantes + Tratamiento térmico + enfriamiento, lavado y secado	350 – 900	<1 h	Alta porosidad, grupos funcionales superficiales ricos en oxígeno o nitrógeno	Adsorción en fase líquida (colorantes, metales)	Mayor rendimiento, temperatura más baja, mejor desarrollo de poros	Costo de químicos, necesidad de lavado posterior
Activación Físico-química	Combinación de activación química y física	600 – 850	Variable	Porosidad balanceada (micro, meso, macro).	Adsorción de compuestos orgánicos y metales.	Propiedades mejoradas por combinación de técnicas.	Proceso más complejo y costoso.
Activación Asistida por Microondas	Carbonización o activación mediante radiación microondas.	180 – 800	10–30 min	Poros uniformes, mejor textura y estructura, alta eficiencia energética	Aplicaciones avanzadas en remediación ambiental	Rápido, ahorro energético, mejor distribución de poros	Costo inicial de equipo, control de temperatura
Carbonización Hidrotérmica	Tratamiento en agua caliente a presión en autoclave	180 – 280	2 – 8 h	Precursor poroso (hidrocarbonizado) con activación posterior	Precusores húmedos o difíciles de secar	Proceso más limpio, menor energía y no gases tóxicos	Material inicial menos poroso; usa activación adicional

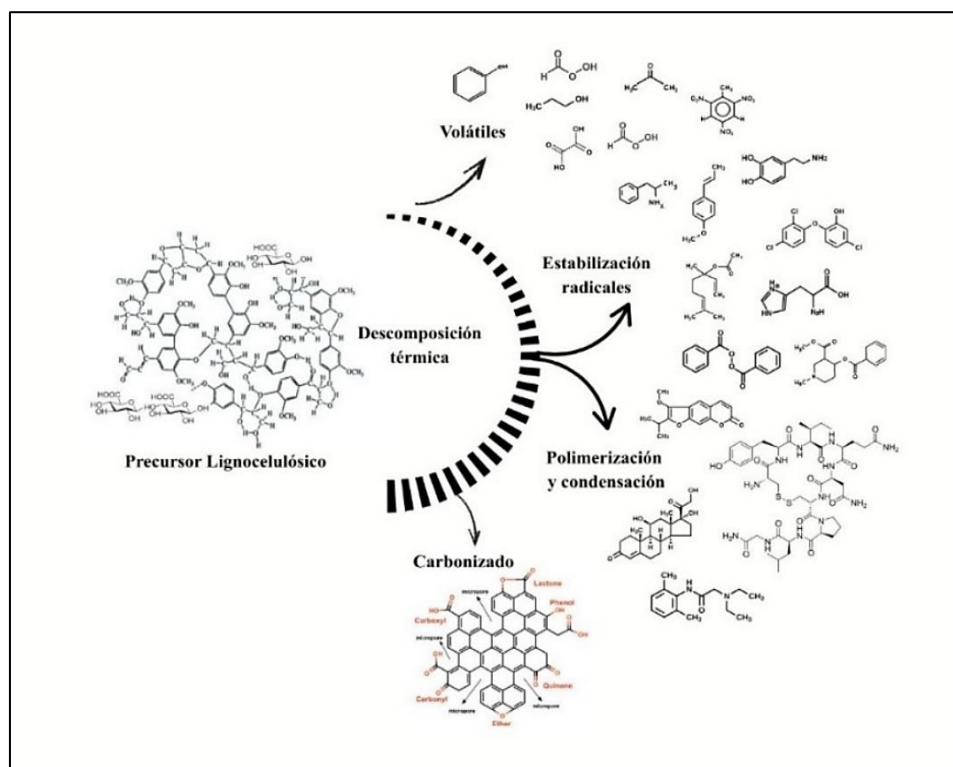


Figura 2. Esquema de la descomposición térmica del material lignocelulósico en la carbonización, modificado de [35].

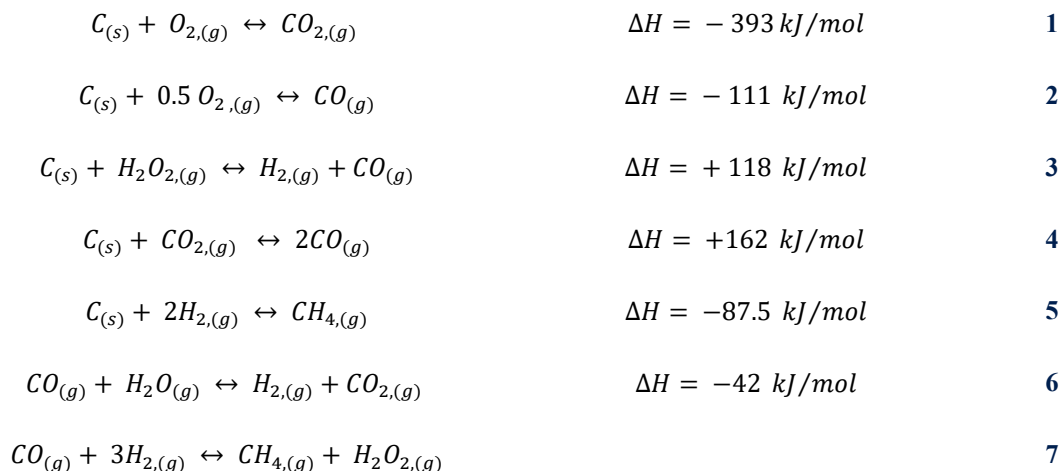
Activación Física

La activación física consiste en la carbonización del material precursor mediante reacciones de gasificación heterogénea (Ecuaciones 1 a 5) u homogénea (Ecuaciones 6 y 7), llevadas a cabo a temperaturas entre 400 y 600 °C en atmósfera inerte. Posteriormente, se realiza la activación a temperaturas entre 700 y 1000 °C durante un tiempo de 0.5 a 12 h, en presencia de gases oxidantes (O₂, H₂O, CO₂ o Cl₂), los cuales arrastran los compuestos volátiles y reaccionan con los átomos de carbono. Estas reacciones provocan la pérdida parcial de masa en la superficie interna del sólido, el ensanchamiento de poros estrechos y la formación de nuevos poros, dando lugar a

una estructura microporosa altamente desarrollada [35, 39, 40].

El oxígeno, por su alta reactividad, genera reacciones exotérmicas que pueden causar sobrecalentamientos localizados dentro de las partículas, dificultando el control de temperatura y limitando la generación uniforme de poros. Además, puede inducir gasificación superficial sin desarrollo efectivo de porosidad, lo que restringe su uso a escala industrial [39, 40].

El vapor de agua y el dióxido de carbono también pueden generar reacciones de gasificación sin formación de poros si se utilizan a temperaturas muy elevadas. No obstante, su combinación o aplicación



individual puede optimizar la estructura del carbón; el CO_2 favorece la creación de microporos, mientras que el H_2O promueve el ensanchamiento de microporos hacia meso- y macroporos, lo que permite una amplia distribución de poros [41].

La presencia de materia inorgánica (cenizas), en especial metales como calcio, bario, hierro, cobalto o cobre, ejerce un efecto catalítico sobre la gasificación, afectando la cinética del proceso y favoreciendo la formación de mesoporos y macroporos [40].

La activación física puede realizarse en una o dos etapas. En el proceso de una sola etapa, la carbonización y la activación ocurren de forma consecutiva en un solo reactor, lo cual reduce el consumo energético, el costo y el tiempo de operación. En el proceso en dos etapas, ambas operaciones se realizan de manera secuencial con un periodo de enfriamiento intermedio [41]. Se logran áreas superficiales mayores a $1000 \text{ m}^2/\text{g}$ mediante activación física de precursores como cáscara de naranja, de

cacahuete, de almendra y de coco [34].

Activación química

La activación química, ampliamente utilizada en la síntesis de carbones activados a partir de biomasa, permite obtener materiales con alta porosidad y funcionalización superficial mediante la impregnación con reactivos químicos, seguida de tratamiento térmico. A continuación, se describen los principales tipos de agentes activantes, sus mecanismos de acción y los factores que influyen en la eficiencia del proceso. En la impregnación húmeda, se añade una disolución del agente activador a la biomasa y se deja actuar por un tiempo determinado; posteriormente el material se seca antes del proceso de tratamiento térmico. Por otro lado, en la mezcla seca, el agente activador en forma pulverizada se incorpora directamente al precursor crudo o carbonizado, seguido de la etapa térmica. Rashidi [57] reportó que la mezcla directa mejora las propiedades superficiales de CA en

comparación con la impregnación por vía húmeda.

Durante el tratamiento térmico, el agente activante actúa deshidratando u oxidando el precursor. Este proceso facilita la penetración del activante en la estructura macromolecular carbonosa, promoviendo la aromatización, el entrecruzamiento de la matriz y la formación de una estructura carbonosa porosa tridimensional mediante la eliminación de compuestos orgánicos y sales. La naturaleza del precursor, el método de activación y las condiciones operativas determinan en gran medida las propiedades químicas y estructurales del CA obtenido.

Los agentes activantes actúan como deshidratantes e inhiben la formación de alquitranes. Se clasifican, según su naturaleza química, en:

- a) **Ácidos:** nítrico, sulfúrico, clorhídrico, fosfórico, tartárico y cítrico.
- b) **Bases:** hidróxido de sodio, potasio y zinc.
- c) **Sales:** cloruros, carbonatos y sulfuros de calcio, magnesio, hierro y zinc [41, 57].

La selección del activante depende del tipo de precursor y de la aplicación final del CA, dado que cada reactivo influye de forma distinta en el desarrollo de porosidad. Por ejemplo, el cloruro de zinc y el ácido fosfórico son comunes para precursores lignocelulósicos, mientras que los hidróxidos de sodio o potasio se emplean en carbones minerales [65]. En el caso del aserrín, se han utilizado diversos ácidos orgánicos e inorgánicos, así como hidróxido de sodio [62, 63].

La activación química presenta ventajas respecto a la activación física, como temperaturas más bajas de operación, mayores rendimientos, tiempos más cortos y mejor desarrollo de poros [41, 66]. Los agentes químicos actúan como catalizadores de reacciones gas-sólido, influyen en la pirolisis, degradación y deshidratación de los componentes celulósicos, y reducen la formación de alquitranes y cenizas. Además, incrementan la retención de carbono, inhiben la volatilización de materia orgánica y favorecen la incorporación de grupos funcionales en la superficie del CA [39, 67, 68].

Uno de los parámetros más relevantes del proceso es la relación de impregnación (proporción en peso agente activante/precursor), que incide directamente en el rendimiento y la porosidad final. Relaciones más altas favorecen el desarrollo de una mayor área superficial y volumen de poros [46]. Otros factores críticos incluyen: la atmósfera de activación/carbonización, el tamaño de partícula del precursor, la temperatura y duración del tratamiento térmico, el tiempo y temperatura de impregnación, y la velocidad de calentamiento [39].

Entre las desventajas destacan el costo de los agentes activantes y la necesidad de realizar un lavado intensivo posterior para eliminar residuos químicos, lo que puede implicar varios ciclos de enjuague [34]. Aunque las condiciones de activación influyen en las propiedades del CA, la naturaleza del precursor y su reactividad química son determinantes clave en el resultado final.

En general, los carbones activados obtenidos por activación química presentan una porosidad bien desarrollada, lo que los hace especialmente útiles en aplicaciones en fase líquida. Se han sintetizado CA de alta calidad a partir de diversos residuos agroindustriales como agave, hojas de palma, madera, cáscara de coco, cascarilla de arroz, eucalipto, granos de café, semillas de girasol, residuos de té, tallos de tomate, cáscara de pomelo y caña de azúcar [34].

Activación fisicoquímica

Esta consiste en la combinación de los métodos de activación física y química, permite obtener carbones activados con propiedades texturales y químicas distintas a las generadas mediante un solo tipo de activación, es útil cuando el agente químico activante no se elimina completamente tras el lavado y obstruye los poros formados, la activación física adicional ayuda a desbloquear la estructura porosa, mejorando la accesibilidad, la distribución de los poros, el área superficial; además, influye en los grupos funcionales formados favoreciendo la capacidad de adsorción del CA [40, 57]. Esta técnica se ha utilizado para potenciar la porosidad, mejorar la distribución de poros y aumentar la capacidad de adsorción del material final.

En general, el proceso consiste en una activación química convencional —impregnación del precursor con un agente químico, seguida de carbonización en atmósfera inerte— complementada con una etapa posterior de

activación física en presencia de un gas oxidante a temperaturas elevadas (600–850 °C) [40, 57]. Esta combinación puede realizarse en dos secuencias principales:

- **Activación poscarbonización:** el precursor se somete primero a una carbonización térmica, luego se impregna con el agente químico, y finalmente se activa físicamente con gases oxidantes como CO₂ o vapor de agua.
- **Activación precarbonización:** el precursor se impregna químicamente antes de la carbonización, y posteriormente se aplica la activación física bajo flujo oxidante.

Diversas materias primas lignocelulósicas han sido evaluadas mediante este método, incluyendo cáscaras de pistache, almendra y coco, obteniéndose áreas superficiales entre 796 y 1077 m²/g. Estos valores son superiores a los alcanzados por activación física sola y comparables a los logrados mediante activación química [34].

Activación asistida por microondas

La activación asistida por microondas emplea energía electromagnética en el rango de 0.3 a 300 GHz para calentar el material mediante un mecanismo dieléctrico, en el cual el calor se genera directamente dentro del precursor y se transfiere desde el interior hacia la superficie. Este tipo de calentamiento volumétrico y uniforme favorece el desarrollo de estructuras porosas más homogéneas en el CA, mejorando sus propiedades texturales y morfológicas [69]. El uso de microondas como fuente de

activación ha demostrado ser una alternativa viable frente a los métodos convencionales, ya que permite obtener CA con morfología de cavidades bien distribuidas, poros abundantes y elevada superficie específica [41]. Entre las principales ventajas de este método se destacan [39, 57]:

- Calentamiento rápido, uniforme y volumétrico, sin necesidad de contacto directo con una fuente externa de calor.
- Menor temperatura y tiempo de tratamiento (hasta 15 minutos), lo que reduce el consumo energético y el tiempo de operación.
- Facilidad para liberar componentes volátiles, lo que favorece la formación de poros.
- Operación flexible y segura, con arranques y paradas inmediatas, bajo riesgo de sobrecalentamiento y posibilidad de control automatizado.
- Equipos más compactos, que requieren menos espacio físico.

El calentamiento por microondas puede integrarse tanto en procesos de activación física como química, en etapas de carbonización o degradación térmica, en configuraciones de una o dos fases [41, 57]. Esta versatilidad lo convierte en una herramienta prometedora para la producción eficiente de CA.

No obstante, este método también presenta algunas limitaciones, como la dificultad para medir y controlar con precisión la temperatura interna del material, y el riesgo de fuga de radiación si no se cuenta con un sistema de blindaje adecuado [39]. Las principales

variables para considerar en este tipo de activación incluyen la configuración del sistema, la potencia de radiación, el tiempo de exposición, las propiedades del precursor y las interacciones específicas entre el microondas y los agentes químicos utilizados [41].

La carbonización hidrotérmica para acondicionar el precursor es una alternativa para la producción de CA con un menor consumo de energía y en condiciones de operación más fáciles en comparación que la carbonización por pirolisis que se da a temperaturas elevadas de 400 a 600 °C y que produce emisiones de gases tóxicos. Este método es más amigable con el ambiente porque no produce gases tóxicos como el dióxido de carbono, óxidos de nitrógeno y óxidos de azufre y el material sintetizado se conoce como hidrocarbonizado.

El proceso se realiza en pocas horas dentro de un reactor de autoclave a temperaturas entre 180 y 280 °C en una atmósfera inerte y en suspensión de agua a presión saturada que actúa como medio de reacción y reactante [70]. En el proceso de carbonización se produce un reordenamiento estructural del material lignocelulósico causado por la degradación de la biomasa mediante hidrólisis, deshidratación, descarboxilación, aromatización y recondensación [71, 72] que incrementa la concentración de grupos funcionales oxigenados. Este método se realiza en fase líquida, favorece el uso de biomasa con alto contenido de humedad, que ahorra energía, tiempo y costo de secado de los precursores. Resulta un proceso relevante para la

valorización de biomasa húmeda, que resulta en biocarbones, un precursor directo o material alternativo al CA [20].

Se ha utilizado el material hidrocarbonizado de biomasa como la lignina, semilla de dátil, el tallo de girasol, las cascarras de nuez, arroz y coco, hueso de aceituna y el aserrín [57].

Postratamientos para aplicaciones específicas

Las propiedades adsorbentes del CA pueden modificarse significativamente mediante tratamientos posteriores a su síntesis, ya que la naturaleza de los grupos funcionales superficiales depende del precursor, del método de activación y del postratamiento empleado [35, 65, 73]. Estos tratamientos, de carácter oxidativo o no oxidativo, permiten ajustar la química superficial del material para mejorar su afinidad hacia contaminantes específicos. En general, se aplican tras la etapa de activación-carbonización.

Entre los principales postratamientos se encuentran:

1. **Tratamiento ácido.** Oxida la superficie del CA, aumentando su acidez, eliminando impurezas minerales y mejorando su hidrófilicidad. Ácidos como el nítrico o sulfúrico generan grupos oxigenados (carboxilos, lactonas, fenoles) que favorecen la adsorción de metales pesados por interacción electrostática o formación de complejos [74-76]. Sin embargo, esta modificación puede reducir la adsorción de compuestos orgánicos hidrofóbicos, debido al aumento de polaridad

superficial [74, 76].

2. **Tratamiento alcalino.** Proporciona carga superficial positiva al CA, mejorando su eficiencia para remover contaminantes aniónicos. Generalmente se realiza mediante exposición a atmósferas de hidrógeno o amoníaco a temperaturas entre 400 y 900 °C. Bajo estas condiciones, se introducen grupos nitrogenados (aminas, amidas, estructuras tipo piridina), cuya presencia favorece la adsorción de especies cargadas negativamente [65].

3. **Impregnación con metales o reactivos químicos.** Este procedimiento incorpora agentes activos al interior de la estructura porosa del CA. Se ha demostrado su efectividad para mejorar la remoción de fluoruro, cianuro y metales pesados como el arsénico. Metales como hierro, aluminio, níquel, plata o manganeso se emplean comúnmente. En el caso del cianuro, la adsorción mejora por la formación de complejos tipo $[Me(CN)_n-(n-1)]$. Este tratamiento requiere asegurar la estabilidad de los metales impregnados, evitando su lixiviación y posibles impactos ambientales [29, 65].

4. **Tratamiento con ozono.** La ozonización del CA modifica significativamente la distribución de grupos funcionales superficiales. El proceso de oxidación convierte sitios básicos en ácidos, incrementando la proporción de estos últimos hasta una relación aproximada de 5:1 respecto a los básicos. Durante los primeros minutos de exposición al ozono se observa la formación predominante de grupos fenólicos, los cuales disminuyen progresivamente a medida que se

generan especies más oxidadas, como lactonas, carbonilos y carboxilos. Tras exposiciones prolongadas, la superficie del CA presenta un predominio de grupos oxigenados de tipo carbonilo y carboxilo, siendo estos últimos los principales responsables del desarrollo de la carga superficial del material. La formación de la mayoría de los grupos oxidados está asociada principalmente a la adición del ozono sobre los dobles enlaces de la estructura carbonosa [77, 78].

La acción del ozono sobre el CA también modifica sus características texturales reduciendo el área superficial debido al ataque oxidativo del ozono y la generación de grupos oxigenados adicionales en la superficie [77, 79]. La incorporación de grandes cantidades de grupos ácidos en la superficie ocurre principalmente en la estructura mesoporosa, manteniendo la naturaleza no polar de los microporos inalterada. Los CA tratados con ozono presentan un carácter bifuncional: una red microporosa predominantemente hidrofóbica y una superficie externa hidrofílica, atribuida a la presencia de grupos oxigenados [80]. La temperatura de ozonización afecta el tipo de grupos de oxígeno superficiales fijados en el CA. A 25 °C se generan principalmente grupos carboxílicos, mientras que a 100 °C se observan además de los carboxílicos, el hidroxilo y carbonilo [81].

El uso de CA tratado con ozono puede no ser adecuado para la remoción de colorantes como azul de metileno [65], ya que la ozonización incrementa la cantidad de oxígeno quimisorbido en la superficie del carbón y

provoca el bloqueo parcial de los microporos [79]. Como consecuencia, se reducen las interacciones entre las moléculas de azul de metileno y el carbón, afectando la capacidad de adsorción.

5. CA modificado biológicamente. El carbón activado biológico (CAB) se basa en el efecto sinérgico entre la adsorción sobre este material y el fenómeno de biodegradación. En la tecnología CAB, el CA actúa como soporte para la inmovilización de microorganismos los cuales, bajo las condiciones adecuadas, se reproducen cubriendo la superficie de este material desarrollando un biofilm. Existe una sinergia entre capacidad de adsorción y biodegradación ya que, si bien los biofilm muy extendidos promueven la biodegradación, dificultan la capacidad de adsorción del CA debido al bloqueo de los poros. Al tratar un efluente, con una etapa previa de ozonización, se puede convertir una parte de los compuestos orgánicos recalcitrantes presentes en orgánicos biodegradables los cuales, tras adsorberse en la superficie del CAB, son degradados por los microorganismos alojados. Algunas de las sustancias que han sido eliminadas satisfactoriamente con CAB son: la hormona sexual esteroidea femenina 17 β -estradiol, Materia Orgánica Natural, pesticidas y fenoles [29, 82, 83].

Se debe tener en cuenta que, además de implicar un gasto económico adicional, la mayor parte de los métodos aquí descritos producen un declive de los parámetros texturales del CA, es decir, disminuyen el área superficial específica y la porosidad [65].

Aplicación de CA a partir de residuos agroindustriales en la remoción de contaminantes en agua, aire y suelo

Los metales pesados son contaminantes inorgánicos no biodegradables que pueden encontrarse en el agua, el aire y el suelo. Debido a su estructura química, tienden a ser persistentes en el ambiente, bioacumulativos y altamente tóxicos, incluso con efectos cancerígenos al ser ingeridos. Para su tratamiento, se han propuesto diversos métodos fisicoquímicos, entre los cuales la adsorción mediante CA destaca por su bajo costo, simplicidad operativa y alta eficiencia [84-86].

El CA producido a partir de residuos agroindustriales presenta propiedades texturales y funcionales adecuadas para interactuar con los iones metálicos a través de mecanismos como la complejación, la micro precipitación y el intercambio iónico [87-90]. Entre los residuos más utilizados como precursores se encuentran: el bagazo de caña (para plomo), la cáscara de mandarina (plomo y cromo), la cáscara de plátano (plomo y cromo), la cascarilla de arroz (plomo y cromo) y los residuos de café (cobre y cadmio), entre otros [91].

Algunos estudios han evaluado la eficiencia de diversos residuos agroindustriales en la síntesis de CA para la remoción de colorantes e iones metálicos en aguas residuales. Oliveira y França en 2011 [92] analizaron las propiedades estructurales y morfológicas de CA obtenidos por activación química ($ZnCl_2$, $FeCl_3$) y física (CO_2) a partir de residuos como cáscaras de

café, observando áreas superficiales entre 900 y 1500 m^2/g y estructuras micro o mesoporosas según el método aplicado [92].

Lomelí-Ramírez et al, en 2024 [20] abordan con un enfoque multidisciplinario el desafío global de la acumulación de residuos agroindustriales, promoviendo su valorización a través de la producción de biomateriales y la implementación de la economía circular, identifican claramente la oportunidad que tiene México, en particular Jalisco, con una enorme variedad de residuos lignocelulósicos con potencial para ser estudiados, mencionando principalmente, los derivados de la caña de azúcar, maíz y coco. En tanto, Alvez-Tovar et al., en 2025 [93] demostraron que el CA obtenido de monguba (*Pachira aquatica*) y activado con H_3PO_4 alcanzó áreas superficiales de 1604 m^2/g y una alta capacidad de adsorción de azul de metileno y rojo de metilo (~50 mg/g), posicionándose como una opción sostenible para el tratamiento de aguas residuales teñidas, aunado a ello los autores concluyen que este proceso no solo es eficiente y económico, sino que también promueve la economía circular y contribuye a los objetivos de desarrollo sostenible [93].

El análisis de la literatura confirma que la valorización de los residuos agroindustriales como precursores de CA representa una estrategia de bioeconomía circular que aborda la problemática del alto costo del CA comercial y la acumulación de desechos [26, 27, 94]. Estos materiales lignocelulósicos, seleccionados por su alto contenido de carbono, renovabilidad y bajo costo, son transformados

mediante activación química —generalmente preferida por su menor consumo energético y mayor rendimiento— en adsorbentes altamente porosos. Las propiedades texturales y químicas resultantes (como una elevada superficie específica y la funcionalización superficial) son cruciales para determinar la eficacia del material, permitiendo la adsorción eficiente de una amplia gama de contaminantes en matrices acuosas como colorantes, metales pesados, purificación de agua y fármacos emergentes [94-97].

En consecuencia, el reto de la investigación actual se centra en la optimización de las condiciones de síntesis para maximizar el rendimiento y la capacidad adsorbente, consolidando estos residuos como una alternativa sostenible e irremplazable para el tratamiento ambiental, en la tabla 4, se enlistan algunas de las aplicaciones que han sido estudiadas a partir de diversos precursores, la capacidad de adsorción y área superficial del CA depende del precursor y el proceso de activación aplicado [97].

Valorización de residuos agroindustriales lignocelulósicos como estrategia de economía circular

El estudio de aprovechamiento de residuos agrícolas y/o alimentarios planteados como materia prima para la obtención de materiales descontaminantes como lo es el CA forma parte de la solución para retardar el cambio climático presente en el mundo; por tanto, debe ser considerado prioritario en todas las entidades científicas.

Los modelos de economía circular aplicados a la valorización de residuos agroindustriales lignocelulósicos para producir CA se sustentan en cerrar ciclos de materiales, reducir impactos y generar valor agregado a partir de desechos y pueden ser:

1) El aprovechamiento o valorización (bioeconomía circular) de residuos como recursos indica que los residuos lignocelulósicos dejan de verse como un “desecho” y se consideran materia prima secundaria. Esta puede transformarse para producir CA y utilizarse en el tratamiento de aguas residuales y captura de contaminantes atmosféricos o remediación de suelo. El uso del CA cierra el ciclo de los subproductos agroindustriales y evita una disposición inadecuada como quema o disposición en vertederos.

2) La simbiosis industrial se basa en el principio de que los residuos generados por una industria pueden transformarse en insumos o recursos útiles para otra. De esta manera se reducen los costos de gestión de residuos, se generan nuevas cadenas de valor y se fomentan alianzas empresa-academia-gobierno.

promueve el uso de tecnologías limpias, la reducción en el uso de reactivos químicos agresivos y la recuperación y reutilización de energía, consolidando un enfoque integral hacia la sostenibilidad.

Tabla 4. Condiciones de producción de CA, características y uso.

Precursor	Condiciones de producción	Características Obtenidas	Aplicaciones del CA
Hueso de Olivo	Carbonización a 600 °C R.I. 1:1 Activación Química con KOH al 75% en atmósfera inerte (N ₂) y 800 °C % de Rendimiento de carbonización 19.08 % de Rendimiento de activación 14.60	$q_m = 720 \text{ mg de l g}^{-1}$ $D_p = 8.28 \times 10^{-3} \mu\text{m}$	Recuperación de Oro, Purificación de agua [60]
Cáscara de coco y residuos de olivo.	Carbonización a 600 °C R.I. 1:1 Activación Química con H ₃ PO ₄ al 85% a 600 °C	No proporcionada	Purificación del agua en de río [98]
Cáscara de coco (Pretratamiento con vapor)	Activación química H ₃ PO ₄ , Pretratamiento con vapor a 210 °C durante 2 h, Activación química a 475 °C por 2 h	Calidad superior al CA comercial	Purificación de agua (mejorando la calidad respecto al CA comercial [32]
Endocarpio de coco	Carbonización por pirolisis a 700°C por 2 h. R.I 1:4 Activación Química con KOH	$A_s = 384 \text{ m}^2\text{g}^{-1}$	Remoción Anaranjado de metilo en fase acuosa [99]
Carbón vegetal de <i>Quercus</i>	Carbonización 450 °C, Activación química con ácido fosfórico al 85 % y ácido sulfúrico al 85 %, R.I. 1:1	No reportada	Eliminación de colorantes: cristal violeta, azul de metileno, y verde de Malaquita [100]
Aserrín de pino (<i>Pinus</i>)	Carbonización 500 °C, Activación química con ácido fosfórico al 40 %. R.I. 1:1	No reportada	Remoción de colorantes: cristal violeta, azul de metileno, y verde de Malaquita [100]
Tallo de plátano	Activación química ácida con HCl 1N Carbonización a 700 °C por 1 h R.I. 1:1 Activación química a 800°C por 2 h combinando la activación física con KOH en atm de CO ₂	$A_s = 684.11 \text{ m}^2\text{g}^{-1}$, $V_p = 0.482 \text{ cm}^3\text{g}^{-1}$ $0.482 \text{ cm}^3\text{g}^{-1}$	Remoción de verde de malaquita [101] Metales Fe ²⁺ , Cr ³⁺ , Ni ²⁺ , Cu ²⁺ Zn ²⁺ [102]
Tallo de Plátano	Activación química ácida con HCl 1N a 600 °C. 83,93 g de biocarbón en una solución compuesta por 21 ml de HCl disueltos en 250 ml de agua destilada por 30 min.	No especificado	Remoción de Arsénico en solución acuosa con eficiencia del 95% [103]
Cáscara de nuez (<i>walnut shell</i>) y Cáscara de avellana (<i>hazelnut shell</i>)	Secado natural por 20 días a 25-30 °C. Triturada y tamizada a 1 y 2 mm	$A_s = 750 \text{ m}^2\text{g}^{-1}$ $D_p = 0.044 \text{ o } 0.074 \text{ mm}$	Eliminación de Colorantes azoicos Rojo de metilo Naranja de Metilo Amarillo de metilo [38a]
Cáscara de Nuez de Pacana (<i>Carya illinoensis</i>)	NaCl y KCl (Activación Química/Física, Pirólisis en horno microondas con N ₂ ; tiempo inferior a 10 min.	$A_s > 500 \text{ m}^2\text{g}^{-1}$	Eliminación de metales pesados Zn ²⁺ , Cd ²⁺ , Ni ²⁺ , Cu ²⁺ [32]
Cáscara de cacao.	HCl (Activación por microondas)	$\cong 500 \text{ m}^2\text{g}^{-1}$	Eliminación eficiente de fármacos (diclofenaco de sodio y nimesulida) [32]
Mezcla de semilla y piel de Aguacate	Química y térmica con ZnCl ₂ , 650 °C en 3 h	$A_s = 620 \text{ m}^2\text{g}^{-1}$	Remoción de rodamina 12 mg/l en 4 h con eficiencia de 95% [104]
Pulpa de Café	Activación química con H ₃ PO ₄ . 500 °C 40 min 40% v/v Proceso post activación con pH de 7.5 y tratamiento térmico a 110 °C por 16 h	$A_s = 355\text{m}^2\text{g}^{-1}$	Remoción de Rojo de Congo (adsorción 14.7 ppm en 24 h) [51]
Cáscara de Semilla de Girasol	H ₃ PO ₄ y NaOH (R.I. 80% p/p) Carbonización 544 °C por 1 h Activación 544 °C por 1 h en atmósfera de N ₂	$A_s = 1531 \text{ m}^2\text{g}^{-1}$ $0.98 \text{ cm}^3\text{g}^{-1}$ $D_p = 5.5 \text{ nm}$	Adsorción y foto degradación de fármacos Diclofenaco e Ibuprofeno, así como Azul de Metileno [37]

A_s = Área Superficial, q_m =capacidad de adsorción, D_p =Tamaño del poro, R.I.=Relación de Impregnación

CONCLUSIONES

La agroindustria genera grandes cantidades de residuos que, si no se gestionan adecuadamente, pueden representar una fuente significativa de contaminación ambiental. No obstante, su valorización ofrece la posibilidad de transformar estos subproductos en materiales de alto valor agregado, contribuyendo a la sostenibilidad y a la mejora de la calidad ambiental.

Los residuos agroindustriales lignocelulósicos —como el bagazo y la cachaza de caña, la cascarilla de arroz, la pulpa de café y el rastrojo de maíz— presentan una composición rica en carbono y estructuras porosas que los hacen idóneos como precursores en la producción de (CA). Este material ha demostrado alta eficacia en la adsorción de metales pesados, colorantes, hidrocarburos y fármacos, ofreciendo una alternativa sostenible frente a los adsorbentes derivados de fuentes fósiles.

Entre los métodos de activación empleados para su obtención, la activación física en una sola etapa destaca por su bajo costo, menor requerimiento energético y simplicidad operativa. Asimismo, la activación asistida por microondas, tanto en procesos físicos como químicos, ha mostrado mejorar la distribución de poros y aumentar el rendimiento del proceso en comparación con las técnicas convencionales.

Desde una perspectiva integral, la valorización de residuos agroindustriales para la obtención de CA se enmarca en los principios de la bioeconomía circular, promoviendo el uso en

cascada de la biomasa y fomentando la simbiosis industrial entre sectores productivos. Esta estrategia impulsa modelos de producción más eficientes, resilientes y bajos en carbono, capaces de dinamizar las economías locales y contribuir a la transición hacia sistemas de producción más sostenibles.

Perspectivas futuras

El desarrollo de tecnologías sostenibles para la valorización de residuos agroindustriales lignocelulósicos representa una línea de investigación con alto potencial en el marco de la bioeconomía circular y la mitigación de la contaminación ambiental. Futuras investigaciones deberán centrarse en optimizar las condiciones de activación para maximizar el rendimiento y la funcionalidad del (CA), así como en escalar los procesos hacia niveles piloto e industriales. La integración de métodos de activación emergentes —como la activación por microondas, hidrotérmica o enfoques híbridos— abre nuevas oportunidades para mejorar la eficiencia energética y la selectividad en la generación de estructuras porosas.

Asimismo, se requiere avanzar en la caracterización avanzada de los materiales obtenidos y evaluar su desempeño bajo condiciones reales de tratamiento de contaminantes, considerando la regeneración y reutilización del adsorbente para fortalecer su viabilidad económica y ambiental.

La generación de residuos o subproductos agroindustriales puede tener impactos tanto

negativos como positivos sobre el ambiente, dependiendo de la gestión realizada. Si bien su disposición inadecuada puede ocasionar contaminación, su aprovechamiento racional los convierte en agentes de mejora ambiental, capaces de transformar los problemas de gestión de residuos en oportunidades tecnológicas y sociales.

En este contexto, la colaboración entre centros de investigación, agroindustrias y tomadores de decisiones resulta esencial para consolidar un modelo de simbiosis industrial que permita integrar flujos de materia y energía entre sectores, impulsando la creación de economías del entorno más resilientes, eficientes y sostenibles. De esta manera, la valorización de residuos agroindustriales dentro de la simbiosis industrial se perfila como una estrategia clave para avanzar hacia una transición productiva baja en carbono, en consonancia con los principios de sostenibilidad y economía circular [33].

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a todas aquellas personas que, de manera directa o indirecta, contribuyeron al desarrollo de este trabajo.

REFERENCIAS

[1]. FAO. 2021. Citrus Fruit Statistical

Compendium 2020. Rome. Disponible en: <https://openknowledge.fao.org/handle/20.500.14283/cb6492en>

[2]. Sarkar N, Ghosh SK, Bannerjee S, Aikat K. Bioethanol production from agricultural wastes: an overview. *Renew Energy*. 2012; 37(1):19–27. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S096014811100382X>

[3]. Preciado-Saldaña AM, Ruiz-Canizales J, Villegas-Ochoa MA, Domínguez-Ávila JA, González-Aguilar G. Aprovechamiento de subproductos de la industria agroalimentaria. Un acercamiento a la economía circular. *Revista Iberoamericana de Tecnología Postcosecha*. 2022; 23(2): 92–99. Disponible en: <https://www.redalyc.org/journal/813/81373798002/html/>

[4]. Castro-Muñoz R, Díaz-Montes E, Gontarek-Castro E, Boczkaj G, Galanakis CM. A comprehensive review on current and emerging technologies toward the valorization of bio-based wastes and by products from foods. *Compr Rev Food Sci Food Saf*. 2022; 21(1): 46-105. Disponible en: <https://ift.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1111/1541-4337.12894>

[5]. Benítez R O. Losses and food waste in Latin America and the Caribbean. Santiago de Chile: FAO Regional Office for Latin America and the Caribbean; 2020. Disponible en: <https://www.fao.org/americas/news/news-detail/Food-Loss-and-Waste-An-Unacceptable-Reality/es>

[6]. Saval S. Aprovechamiento de residuos agroindustriales: pasado, presente y futuro. Biotecnología, 2012; 16(2): 14-16. Disponible en:

<https://es.scribd.com/document/187335434/Saval-Residuosagroindustriales>

[7]. Pineda-Ayala DM, Durán-Herrera JE. Evaluación de residuos de raquis de palma de aceite como adsorbente para la remoción de tintes reactivos de soluciones acuosas. Ing. Invest. y Technol. 2019; 20(1): 1-9. Disponible en:

https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-77432019000100008

[8]. Mejías-Brizuela N, Orozco-Guillen E, Galaán-Hernández N. Aprovechamiento de los residuos agroindustriales y su contribución al desarrollo sostenible de México. Revista de Ciencias Ambientales y Recursos Naturales 2016; 2: 27-41. Disponible en: [Revista de Ciencias Ambientales y Recursos Naturales V2 N6 4.pdf](#)

[9]. Aguiar-Novillo S, Enríquez-Estrella M, Uvidia-Cabadiana H. Residuos agroindustriales: su impacto, manejo y aprovechamiento. AXIOMA. Revista Científica de Investigación, Docencia y Proyección Social 2022; 27:5-10. Disponible en: <https://doi.org/10.26621/ra.v1i27.803>

[10]. Cury RK, Aguas MY, Martínez MA, Olivero V, Chams CL. Residuos agroindustriales su impacto, manejo y aprovechamiento. Revista Colombiana de Ciencia Animal – RECIA 2017; 9: 122-132. Disponible en:

https://www.researchgate.net/publication/355453385_Residuos_agroindustriales_su_impacto_manejo_y_aprovechamiento

[11]. Aguiar-Novillo S, Uvidia-Cabadiana H, Arboleda L. Aprovechamiento de residuos agroindustriales como alternativa en el mejoramiento de la calidad del ambiente. Revista Alfa, 2021; 5(15): 649-660. Disponible en:

<https://doi.org/10.33996/revistaalfa.v5i15.145>

[12]. INDESOL: Instituto Nacional de Desarrollo Social. Manual de elaboración de quesos. Acervo del centro de documentación [online]. Disponible en:

<https://es.scribd.com/document/496760585/Manual-de-Elaboracion-de-Quesos>

[13]. Alcivar-Gavilanes MG, Carrillo-Anchundia KL, Riera MA. Development of a Bioplastic from Banana Peel. Ingeniería e Investigación. 2022; 42(3). Disponible en: <https://doi.org/10.15446/ing.investig.92768>

[14]. Vargas-Corredor YA, Pérez-Pérez LI. Aprovechamiento de residuos agroindustriales para el mejoramiento de la calidad del ambiente. Rev. Fac. Cienc. Básicas 2018; 14(1): 59-72. Disponible en:

<http://dx.doi.org/10.18359/rfcb.3108>

[15]. Barragán BE, Téllez A, Laguna A. Utilización de residuos agroindustriales. Revista Sistemas Ambientales, 2008; 2(1): 44-50. Disponible en:

https://www.researchgate.net/publication/310441706_UTILIZACION_DE_RESIDUOS_AGROINDUSTRIALES

[16]. Yepes SM, Montoya Naranjo LJ, Orozco

Sánchez F. Valorización de residuos agroindustriales –frutas– en Medellín y el sur del valle del Aburrá, Colombia. Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín, 2008; 61(1): 4422-4431. Disponible en: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0304-28472008000100018

[17]. Calero-Zurita M, De Santis-Arauz D, Rivas-Sierra D, Bernal-Gutiérrez A. Estado del arte de bioplástico proveniente de los residuos agroindustriales del plátano (musa paradisiaca), para la producción de envases biodegradables. Revista Ingeniería e Innovación, 2021; 9(1): 10. Disponible en:

<https://revistas.unicordoba.edu.co/index.php/rii/article/view/2416>

[18]. Alconada-Magliano MM, Garbi M, Martínez SB. Producción intensiva florihortícola sustentable en el Gran La Plata. Proyecto de Extensión, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, UNLP, 2018. Disponible en:

https://idihcs.fahce.unlp.edu.ar/greenstone3/glp/collection/granlapl/document/L_2017_FCAyF_Alconada

[19]. Haug R. The practical handbook of compost engineering. Routledge: Londres 2018. Disponible en: <https://www.taylorfrancis.com/books/mono/10.1201/9780203736234/practical-handbook-compost-engineering-robertim-haug>

[20]. Lomelí-Ramírez MG, Guevara-Castillo AM, González-Pérez MA. Innovación en biomateriales sustentables para un mundo mejor: Un enfoque multidisciplinario.

Guadalajara: Universidad de Guadalajara; 2024. Disponible en: <https://riudg.udg.mx/handle/20.500.12104/106861>

[21]. NMX-SAST-004-IMNC-2004. Norma Mexicana “Sistema de Administración de Responsabilidad Social para todos los procesos fundamentales de la empresa que incluyen Dirección, Realización, Gestión de Recursos, Comunicación, Medición, Análisis y mejora”. Disponible en: https://diariooficial.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5049521&fecha=01/03/2005#gsc.tab=0

[22]. NMX-SAA-14020-IMNC-2004. Norma Mexicana “Etiquetas y declaraciones ambientales – principios generales”. Disponible en:

https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=678207&fecha=21/05/2004#gsc.tab=0

[23]. Agenda 2030, objetivos de desarrollo sostenible. Disponible en: <https://www.economia.gob.mx/secna2030/>

[24]. Cumbre Naciones Unidas. Transformar nuestro Mundo: la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible. Documento A/70/L.1. ONU, septiembre 25, 2015. Disponible en: https://unctad.org/system/files/official-document/ares70d1_es.pdf

[25]. Contreras-Franco KS. Gestión Sostenible de Residuos Agrícolas [Trabajo de Titulación]. Babahoyo, Ecuador: Universidad Técnica de Babahoyo; 2024.

[26]. Rocha-Pimienta J. Aprovechamiento y revalorización de subproductos de la agroindustria para la conservación de alimentos

como modelo de economía circular [Tesis doctoral]. España: Universidad de Extremadura; 2025. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=382280>

[27]. Díaz-Orozco L. Valorización de residuos agroalimentarios mediante procesos biotecnológicos [Tesis de Maestría]. San Luis Potosí, México: Universidad Autónoma de San Luis Potosí; 2025. Disponible en: <https://repositorioinstitucional.uaslp.mx/xmlui/bitstream/handle/i/9486/TesisM.FCQ.2025.Valorizaci%C3%B3n.D%C3%ADaz.PDF.pdf>

[28]. Castro RSD, Caetano L, Ferreira G, Padilha PM, Saeki MJ, and Zara LF. Banana Peel Applied to the Solid Phase Extraction of Copper and Lead from River Water: Preconcentration of Metal Ions with a Fruit Waste. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2011; 50(6): 3446–3451. Disponible en: <https://doi.org/10.1021/ie101499e>

[29]. Bhatnagar A, Hogland W, Marques M, Sillanpää M. An overview of the modification methods of activated carbon for its water treatment applications. *Chemical Engineering Journal*, 2013; 219: 499-511. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1385894712016786>

[30]. Akar-Sibel T, Yilmazer D, Celik S, Balk-Yasemin Y, Akar Tamer. Effective biodecolorization potential of surface modified lignocellulosic industrial waste biomass. *Chemical Engineering Journal*, 2015; 259: 286–292. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2014.07.112>

[31]. Jayakumar R, Rajasimman M, Karthikeyan C. Optimization, equilibrium, kinetic, thermodynamic and desorption studies on the sorption of Cu (II) from an aqueous solution using marine green algae: *Halimeda gracilis*. *Ecotoxicology and environmental safety*. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2015; 121: 199-210. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2015.03.040>

[32]. Vidal MV, Rodríguez-Suarez A, Martínez-Barrios K, Ocampo- Pérez J, Barrios-Lara W. Potencial de residuos agroindustriales para la síntesis de Carbón Activado: una revisión. *Scientia Et Technica*, 2018; 23(3): 412-420. Disponible en: <https://www.redalyc.org/journal/849/84959041015/html/>

[33]. Simões JCT, Vaz-Júnior S. Industrial symbiosis concept applied to green hydrogen production: a critical review based on bibliometric analysis. *Discover Sustainability*. 2024;5:504. 10.1007/s43621-024-00780-8. Disponible en: <https://link.springer.com/article/10.1007/s43621-024-00780-8>

[34]. Canales-Flores RA, Prieto-García F, Otazo-Sánchez EM, Bolarín-Miró AM. Obtención de carbones activados a partir de residuos agroindustriales y su evaluación en la remoción de Color y carga orgánica en lactosuero ácido. *Tópicos de investigación en Ciencias de la Tierra y Materiales, AACTyM-Universidad Autónoma de Hidalgo*, 2015 2: 1-13. ISSN: 2395-8405. Disponible en:

<https://repository.uaeh.edu.mx/revistas/index.php/aactm/article/view/9698>

[35]. Agudelo-Álvarez B L. Estandarización de proceso de producción de carbón activado por activación física a partir de cuesco de palma a escala industrial. Tesis de Ingeniería Química. Universidad de América, Bogota, Colombia. 1-101. 2017. Disponible en: <https://repository.uamerica.edu.co/server/api/core/bitstreams/33e6fb36-dc29-4019-9a57-ec14f8e21f28/content>

[36]. González-García P. Activated carbon from lignocellulosics precursors: A review of the synthesis methods, characterization techniques and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018; 82: 1393-1414. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S136403211730624X>

[37]. Alvear-Daza JJ. Síntesis y caracterización de materiales basados en TiO SUB 2/SUB y g-C SUB 3 /SUB N SUB 4 /SUB inmovilizado en Carbón Activado para la Eliminación de Contaminantes de Origen Farmacéutico [Tesis doctoral]. La Plata, Argentina: Universidad Nacional de La Plata; 2024. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=337338>

[38]. Li G, Iakunkov A, Boulanger N, Lazar O A, Enachescu M, Grimm A, *et al.* Activated carbons with extremely high surface area produced from cones, bark and wood using the same procedure. *RSC Adv.*, 2023; 13:14543. Disponible en: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2023/ra/d3ra00820g>

[3/ra/d3ra00820g](https://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2023/ra/d3ra00820g)

[38a]. Kaya N. A comprehensive study on adsorption behavior of some azo dyes from aqueous solution onto different adsorbents. *Water Science & Technology*. 2017;76(2):478–488. Disponible en: <https://iwaponline.com/wst/article-abstract/76/2/478/25089/A-comprehensive-study-on-adsorption-behavior-of?redirectedFrom=fulltext>

[39]. Marsh H, Rodríguez-Reinoso FH. *Activated Carbon*. London. Elsevier, 2006. ISBN: 978-0-08-044463-5 Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/book/monograph/9780080444635/activated-carbon>

[40]. Plaza-Recobert, M. Carbón activado: evaluación de nuevos precursores y del proceso de activación con dióxido de carbono (Tesis doctoral). Universidad de Alicante, 2015. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=59650>

[41]. Reza MS, Yun CS, Afroze S, Radenahmad N, Bakar MSA, SaidurR, *et al.* Preparation of activated carbon from biomass and its' applications in water and gas purification, a review. *Arab Journal of Basic and Applied Sciences*, 2020; 27(1): 208-238. Disponible en: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/25765299.2020.1766799>

[42]. Húmpola, PD. Estudio de la adsorción de compuestos biorrefractarios en soluciones acuosas. Universidad Nacional del Litoral, 2013. Disponible en:

<http://bibliotecavirtual.unl.edu.ar:8080/handle/11185/604>

[43]. Trombotto-Herfert K, García MA, Versino F. Aprovechamiento de residuos agroindustriales para el desarrollo de sistemas adsorbentes para el tratamiento de efluentes de la industria textil. Universidad Nacional de la Plata. 2021: 1-311. Disponible en: <https://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/157243>

[44]. Menéndez-Díaz JA, Martín-Gullón I. Types of carbon adsorbents and their production. In Interface science and technology, 2006; 7: 1-47. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10261/95477>

[45]. Grzeszczak J, Wróblewska A, Kamińska A, Miądlicki P, Sreńscek-Nazzal J, Wróbel RJ, *et al.* Carbon catalysts from pine cones – Synthesis and testing of their activities. Catalysis Today, 2023; 423: 113882 Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2022.08.024>

[46]. Ibsa N, Girma G, Chandran M. Activated carbon from biomass precursors using phosphoric acid: A review. Heliyon 1-12 2022; 8:1940. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e11940>

[47] Casas L, Sandoval G. Enzimas en la valorización de residuos agroindustriales. Revista digital universitarias, 2014; 15(12): 1-15. Disponible en: <https://www.revista.unam.mx/vol.15/num12/art95/>

[48]. Sánchez-Silva J, González-Estrada R, Blancas-Benítez F, Fonseca-Cantabrana A. Utilización de subproductos agroindustriales

para la bioadsorción de metales pesados. TIP. Revista especializada en ciencias químico-biológicas, 2020; 23: e20200261. Disponible en:

https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-888X2020000100211

[49]. González-Sánchez M, Pérez-Fabiél S, Wong-Villarreal A, Bello-Mendoza R, Yañez-Ocampo G. Residuos agroindustriales con potencial para la producción de metano mediante la digestión anaerobia. Agroindustria. Revista Argentina de Microbiología, 2015; 47 (3): 229-235. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0325754115000826>

[50]. Velazquez-Jimenez L, Pavlick A, Rangel-Mendez R. Chemical characterization of raw and treated agave bagasse and its potential as adsorbent of metal cations from water. Industrial Crops and Products, 2013; 43: 200-206. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0926669012003950>

[51]. Nosenzo SG. Evaluating Sugarcane Bagasse-Based Biochar as an Economically Viable Catalyst for Agricultural and Environmental Advancement in Brazil through Scenario-Based Economic Modeling. Journal of Power and Energy Engineering. 2024;12:97-124. Disponible en: https://www.scirp.org/pdf/jpee20241211_71771164.pdf

[52]. Anwar J, Shafique U, Zaman W, Salman M, Dar A, Anwar S. Removal of Pb (II) and Cd (II) from water by adsorption on peels of

banana. *Bioresource Technology*, 2010; 101(6): 1752–1755. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.10.021>

[53]. Saha P, Chowdhury S. Insight into adsorption thermodynamics. *Thermodynamics. InTech*; 2011. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.5772/13474>

[54]. Tasaso P. Adsorption of Copper Using Pomelo Peel and Depectinated Pomelo Peel. *Clean Energy Technology*, 2014; 2, 154-157. Disponible en: <https://www.jocet.org/papers/112-E043.pdf>

[55]. Monje DS, Chacon KM, Galindo IC, Castaño C, Ballesteros-Rueda LM, Valencia GC, *et al.* Carbon dots from agroindustrial residues: a critical comparison of the effect of physicochemical properties on their performance as photocatalyst and emulsion stabilizer. *Materials today Chemistry*, 2021; 20:100445. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2468519421000252>

[56]. Jing HH, Bardakci F, Akgöl S, Kusat K, Adnan M, Alam MJ, *et al.* Green Carbon Dots: Synthesis, Characterization, Properties and Biomedical Applications. *Journal of Functional Biomaterials*, 2023; 14(1), 27. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/jfb14010027>

[57]. Rashidi NA, Yusup SA. A review on recent technological advancement in the activated carbon production from oil palm wastes. *Chem. Eng. J.* 2017; 314: 277–290. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1385894716316217>

[58]. Alvarez-Cubillos LG, Benavides-Morales DA. Evaluación de la capacidad de remoción de colorante azoico del carbón activado obtenido a partir de pulpa de café. [Título de la Tesis/Proyecto]. Bogotá D.C.: Fundación Universidad de América; 2024. Disponible en: <https://repository.uamerica.edu.co/items/acda1e0c-1e8d-40b2-851b-db4d7308e861>

[59]. Pehlivan E, Altun T, Parlayici S. Modified barley straw as a potential biosorbent for removal of copper ions from aqueous solution. *Food Chem.* 2012; 135(4): 2229-34. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0308814612011296>

[60]. Filippin AJ, Pozzi MT, Luna N. Subproductos del olivar y sus procesamientos para obtención de productos con valor agregado. V Jornadas de la Red VITEC. Libro de Resúmenes. Córdoba, Argentina, 2014: 1-9. Disponible en: <https://rdu.unc.edu.ar/items/8c4e98ff-3136-4c1a-9dce-5ebb83cfcfb6>

[61]. Dhankhar R, Hooda A. Fungal biosorption – an alternative to meet the challenges of heavy metal pollution in aqueous solutions. *Environmental Technology*, 2011; 32(5): 467-491. Disponible en: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/09593330.2011.572922>

[62]. Meena AK, Kadirvelu K, Mishra GK, Chitra R, Nagar PN. Adsorptive removal of heavy metals from aqueous solution by treated sawdust (*Acacia arabica*). *J. Hazard Mater.* 2008; 150 (3): 604-611. Disponible en:

<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.05.030>

[63]. Ofomaja AE, Naidoo EB, Modise SJ. Biosorption of copper (II) and lead (II) onto potassium hydroxide treated pine cone powder. *Journal of environmental management*, 2010; 91(8): 1674-1685. Disponible en:

<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2010.03.005>

[64]. Manals-Cutiño E., Penedo-Medina M., Giralto-Ortega G. Análisis termogravimétrico y térmico diferencial de diferentes biomásas vegetales. *SciELO*. 2011; 180-190. Disponible en:

<http://scielo.sld.cu/pdf/rtq/v31n2/rtq05211.pdf>

[65]. Figueiredo JL, Pereira MFR, Freitas MM A, Orfao JJM. Modification of the surface chemistry of activated carbons. *Carbon*, 1999; 37:1379–1389. Disponible en:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0008622398003339>

[66]. Rodríguez Correa C, Kruse A. Biobased functional carbon materials: production, characterization, and applications—a review. *Materials*, 2018; 11(9): 1568. Disponible en:

<https://www.mdpi.com/1996-1944/11/9/1568>

[67]. Tay T, Ucar S, Karagöz S. Preparation and characterization of activated carbon from waste biomass. *J. Hazard. Mater.* 2009 165:481–485. Disponible en:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0304389408014982>

[68]. Horikawa T, Kitakaze Y, Sekida T, Hayashi JI, Katoh M. Characteristics and humidity control capacity of activated carbon from bamboo. *Bioresour. Technol.*, 2010; 101: 3964–3969. Disponible en:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960852410000891>

[69]. Lin BJ, Chen WH. Sugarcane bagasse pyrolysis in a carbon dioxide atmosphere with conventional and microwave-assisted heating. *Front. Energy Res.*, 2015; 3:1-9. Disponible en:

<https://www.frontiersin.org/journals/energy-research/articles/10.3389/fenrg.2015.00004/full>

[70]. Reza MT, Andert J, Wirth B, Busch D, Pielert J, Lynam JG, *et al.* Hydro-thermal carbonization of biomass for energy and crop production. *Appl. Bioenerg*, 2014; 1: 11-29. Disponible en:

<https://access.portico.org/Portico/auView?auId=ark:%2F27927%2Fpgjm0r0z51>

[71]. Funke A, Ziegler F. Hydrothermal Carbonization of Biomass: A Summary and Discussion of Chemical Mechanisms for Process Engineering. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 2010; 4: 160-177. Disponible en:

<https://doi.org/10.1002/bbb.198>

[72]. Wang T, Zhai Y, Zhu Y, Li C, Zeng G. A review of the hydrothermal carbonization of biomass waste for hydrochar formation: Process conditions, fundamentals, and physicochemical properties. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018; 90:223-247. Disponible en:

<https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.071>

[73]. Ahmed MJ. Application of agricultural based activated carbons by microwave and conventional activations for basic dye adsorption: Review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2016; 4: 89-99.

Disponible en:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2213343715300270>

[74]. Rivera-Utrilla J, Sánchez-Polo M, Gómez-Serrano V, Álvarez PM, Alvim-Ferraz MCM, Dias JM. Activated carbon modifications to enhance its water treatment applications. An overview. *Journal of Hazardous Materials*, 2011; 187(1–3): 1–23. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.01.033>

[75]. Rodríguez P, Giraldo L, Moreno J. Oxidación de la superficie de carbón activado mediante HNO₃ y H₂O₂: Efecto sobre la remoción de níquel (II) en solución acuosa. *Revista Colombiana de Química*, 2011; 40(3): 349-364. Disponible en: http://scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-28042011000300005

[76]. Aylas-Orejón EJ, Picasso-Escobar G, Sun-Kou M R. Modificación ácida del carbón activado y la influencia del grupo sustituyente en la adsorción de compuestos fenólicos. *Revista de la Sociedad Química del Perú*, 2016; 82(3): 339-351. Disponible en: http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1810-634X2016000300009

[77]. Chiang HL, Huang PC, Chiang PC. The surface characteristics of AC as affected by ozono and alkaline treatment. *Chemosphere*, 2002; 47: 257-265. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0045653501002156>

[78]. Valdés H, Sánchez-Polo M, Zaror CA. Impacto del tratamiento con ozono sobre las propiedades superficiales del carbón activado.

Ingeniare, 2011: 19(2), 174-185. Disponible en: https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-33052011000200003

[79]. Valdés H, Sánchez-Polo M, Rivera-Utrilla J, Zaror CA. Effect of ozone treatment on surface properties of activated carbon. *Langmuir*, 2002; 18(6), 2111-2116. <https://doi.org/10.1021/la010920a>

[80]. Jaramillo J, Gómez-Serrano V, Alvarez PM. Enhanced adsorption of metal ions onto functionalized granular ACs prepared from cherry stones. *J. Hazard. Mat*, 2009; 161: 670–676. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S030438940800530X>

[81]. Alvarez PM, Garcia-Araya JF, Beltran FJ, Masa FJ, Medina F. Ozonation of ACs: effect on the adsorption of selected phenolic compounds from aqueous solutions. *J. Colloids Interf. Sci*, 2005; 283 503–512. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0021979704009105>

[82]. Cecen F, Aktas Ö. Activated carbon for water and wastewater treatment: Integration of adsorption and biological treatment. John Wiley and Sons. 2011. Disponible en: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9783527639441?msocid=2fa08a48afb36a8f2b698477ae916bb5>

[83]. Salvador F, Martin-Sanchez N, Sanchez-Hernandez R, Sanchez-Montero MJ, Izquierdo C. Regeneration of carbonaceous adsorbents. Part II: chemical, microbiological and vacuum regeneration. *Microporous and Mesoporous Materials*, 2015b; 202:277-296. Disponible en:



<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1387181114004454>

[84]. Sun K, Leng CY, Jiang JC, Bu Q, Lin GF, Lu XC, *et al.* Microporous activated carbons from coconut shells produced by self-activation using the pyrolysis gases produced from them, that have an excellent electric double layer performance. *New Carbon Mater*, 2017; 32: 451–459. Disponible en:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1872580517601343>

[85]. Aljeboree AM, Alshirifi AN, Alkaim AF. Kinetics and equilibrium study for the adsorption of textile dyes on coconut shell activated carbon. *Arab J Chem*, 2017; 10(2): S3381–S3393. Disponible en:

<https://arabjchem.org/kinetics-and-equilibrium-study-for-the-adsorption-of-textile-dyes-on-coconut-shell-activated-carbon/>

[86]. Wang B, Gao B, Fang J. Recent advances in engineered biochar productions and applications. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2018; 47(22): 2158–2207. Disponible en: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/10643389.2017.1418580>

[87]. Fu F, Wang Q. Removal of heavy metal ions from wastewaters: A review. *Journal of Environmental Management*, 2011; 92(3): 407–418. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2010.11.011>

[88]. Cañizares-Villanueva R. Biosorción de metales pesados mediante el uso de biomasa microbiana. *Revista Latinoamericana de*

Microbiología, 2019; 42: 131-143. Disponible en:

<https://www.medigraphic.com/pdfs/lamicro/mi-2000/mi003f.pdf>

[89]. Liu C, Wu T, Hsu P, Xie J, Zhao J, Liu K, *et al.* Direct/Alternating Current Electrochemical Method for Removing and Recovering Heavy Metal from Water Using Graphene Oxide Electrode. *ACS nano*, 2019; 13(6): 6431-6437. Disponible en: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acsnano.8b09301>

[90]. Abdullah N, Yusof N, Lau W, Jaafar J, Ismail A. Recent trends of heavy metal removal from water/wastewater by membrane technologies. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2019; 76: 17-38. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1226086X19301194>

[91]. Patriota S, Cerutti M, Mulhollans D, Marques M, Acheidt G. Potencial dos resíduos da agroindústria no desenvolvimento de adsorventes de metais pesados. *Periódico Tchê Química*, 2016; 6(12):42-51. Disponible en: <https://zenodo.org/records/18131595>

[92]. Oliveira LS, Franca AS. Conventional and Non-conventional Thermal Processing for the Production of activated Carbons from Agroindustrial Wastes. Capítulo 5. Kwiatkowski JF (Ed) 2011;. ISBN 978-1-61209-684-1. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/287330856_Conventional_and_non-conventional_thermal_processing_for_the_pro

[duction of activated carbons from agro-industrial wastes](#)

[93]. Alvez-Tovar B, Scalize PS, Angiolillo-Rodríguez G, Albuquerque A, Ebang NM, de Oliveira TF. Agro-Industrial waste Upcycling into Activated Carbons: A Sustainable Approach for Dye Remocal and Wastewater Treatment. Sustainability, 2025; 17: 2036. Disponible en: <https://www.mdpi.com/2071-1050/17/5/2036>

[94]. Bulgariu L, Bulgariu D. Functionalized soy waste biomass - A novel environmental-friendly biosorbent for the removal of heavy metals from aqueous solution. J. Clean Prod, 2018; 197:875–885. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652618319206>

[95]. Senthil Kumar P, Fernando PSA, Ahmed RT, Srinath R, Priyadharshini M, Vignesh AM, *et al.* Efecto de la temperatura en la adsorción del colorante azul de metileno sobre cáscara de naranja tratada con ácido sulfúrico. Chem. Eng. Commun. 2014, 201(11): 1526 – 1547. Disponible en: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/00986445.2013.819352>

[96]. Baba E, Wyasu G, Adefila AJ, Dikko NA Yakasa JB. Producción y caracterización de carbón activado derivado de cáscara de naranja para la adsorción del colorante azul de metileno. Science World Journal, 2023; 18(3): 492–498. Disponible en: <https://doi.org/10.4314/swj.v18i3.25>

[97]. Vera-Raza BB, Mero-Intriago RA, Burgos-Briones GA, Cevallos-Cedeño RE.

Residuos lignocelulósicos y método de producción de carbón activado. Revista Minerva 2022; (Especial I): 122-130. Disponible en: <https://doi.org/10.47460/minerva.v1iSpecial.87>

[98]. Rosas-Cachicatari MA, Velásquez-Gómez AA, Condori-Yapuchura LA, Ochoa-Rivera AR. Efecto del carbón activado proveniente de cáscara de coco y residuos de olivo en los parámetros fisicoquímicos del río Caplina, Tacna. Ciencia y Educación. 2025; 6 (7.1): 32-38. Disponible en: <https://cienciayeducacion.com/index.php/journal/article/view/1297>

[99]. Zambrano-Campitelli ME, Pérez-Hernández MM. Elaboración de carbón activado a partir de endocarpio de coco para la remoción de anaranjado de metilo en fase acuosa. Rev Int Contam Ambie. 2023;39:59-70. Disponible en: https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-49992023000100108

[100]. Modesto-Erasto R, Ruiz-Aquino F, Valenzuela-Encinas C, López-Luna J, Mijangos-Ricárdez OF. 2025, Capítulo 4.1. Activación química para la obtención de carbón activado (CA) a partir de carbón vegetal del género Quercus y de aserrín del género Pinus. In: Tecorralco-Bobadilla AL, Sotelo-Navarro PX, Carreto-Morales EY, Bahena-Ramírez J, Ortega-Clemente LA, Santiago-Valentín E (Editors). Ambiente y Bioenergía. El camino a la sustentabilidad, pp. 12-13. Ed. ABIAER A.C., México City, México. Disponible en:

https://www.researchgate.net/publication/393945909_Activacion_quimica_para_la_obtencion_de_carbon_activado_CA_a_partir_de_carbon_vegetal_del_genero_Quercus_y_de_aserrin_del_genero_Pinus

[101]. Raval NP, Shah PU, Shah NK. Malachite green “a cationic dye” and its removal from aqueous solution by adsorption. *Appl Water Sci.* 2017;7:3407–3445. Disponible en: <https://link.springer.com/article/10.1007/s13201-016-0512-2>

[102]. Bedoya-Betancur SA, Arriola-Villaseñor E, Valencia-Gonzalez JD, Ortiz-Muñoz DA, Barrera-Zapata R, Hernández-Camacho JA, *et al.* Adsorción de metales pesados presentes en aguas residuales no domésticas usando residuos agroindustriales de banano. *Rev. Ion.* 2023;36(2):15-32. Disponible en:

http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-100X2023000200015

[103]. Arévalo-España SK, Sarango-Jaramillo MJ, Maza-Maza JE, Romero-Bonilla HÍ. Evaluación del biocarbón de raquis de banano como adsorbente de As en soluciones acuosas. *Conocimiento Global.* 2025:71–85. Disponible en:

<https://conocimientoglobal.org/revista/index.php/cglobal/article/view/570>

[104]. Orozco S, Espino J, Rivero M. Materiales a partir de residuos agroindustriales de aguacate para la remoción de contaminantes en agua. *Revista Materiales Avanzados.* 2024; 40: 79-83. Disponible en:

https://revista.iim.unam.mx/index.php/material_esa_avanzados/article/view/35