

BIOCARBÓN SOLAR COMO ALTERNATIVA PARA APROVECHAR LA BIOMASA RESIDUAL DE PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUA

Cristian Alberto López Moreno*
Aurora Margarita Pat Espadas **
Víctor Manuel Maytorena Soria ***

DOI: 10.59730/rer.v12n59a1

Departamento de Ingeniería Química y Metalurgia, Universidad de Sonora, Blvd. Luis Encinas y Rosales s/n, Hermosillo, Sonora, 83000, México.

*a212204340@unison.mx ;

**aurora.pat@unison.mx;

***victor.maytorena@unison.mx

Palabras Clave: pirólisis solar, biocarbón, lodos, tratamiento de agua, aprovechamiento

GENERACIÓN DE LODOS DURANTE EL TRATAMIENTO DE AGUA: ¿UN PROBLEMA?

Cada día utilizamos grandes volúmenes de agua no solo para beber y cocinar, sino también para actividades domésticas como el aseo personal, la limpieza y otras tareas cotidianas, lo que genera como consecuencia aguas residuales. Estas aguas residuales, en la mayoría de los casos, se conducen a plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) donde son sometidas a procesos biológicos y físico-químicos para proteger la salud pública y evitar contaminación ambiental.

Sin embargo, un efecto colateral poco visible de estos

sistemas es la generación de lodos residuales, un subproducto inevitable de dichos procesos. La magnitud del problema es considerable. Por ejemplo, estudios estiman que por cada metro cúbico de agua tratada se generan entre 0.1 y 0.3 kg de lodo seco [1]. Si suponemos una planta que atiende a una población de 50,000 a 100,000 habitantes y trata de 10,000 a 20,000 m³/día puede producir entre 1,000 y 2,500 toneladas de lodos secos al año. Esto equivale aproximadamente a 16–26 kg de lodos por persona anualmente.

A escala global, la producción estimada de lodos fue de 53 millones de toneladas secas en 2023, y se proyecta que esta cifra se triplique hasta 160 millones de toneladas anuales para 2050 [2]. Este crecimiento sostenido representa uno de los principales desafíos técnicos, económicos y ambientales asociados a la operación de las plantas de tratamiento.

ESTRATEGIAS DE MANEJO ACTUALES Y NECESIDAD DE ALTERNATIVAS SOSTENIBLES

Actualmente, la gestión de lodos se basa en distintas estrategias [3]:

🌱 **Uso agrícola y compostaje (~40%):** permite aprovechar el lodo como fertilizante y reducir su volumen en un 50–70%. Aunque es una opción con bajo impacto ambiental, requiere grandes extensiones de terreno, largos tiempos de estabilización (2–6 meses) y un control cuidadoso de olores, lixiviados. ⚠️ Requiere especial cuidado con contaminantes que pudieran estar presentes en los lodos como metales pesados o compuestos orgánicos que pueden limitar su uso agrícola seguro.

🗑️ **Disposición en vertederos o incineración (30–40%):** los vertederos son una opción sencilla y de bajo costo, pero no permiten el aprovechamiento energético y además contribuyen a emisiones de metano. 🔥 La incineración reduce notablemente el volumen y destruye patógenos, aunque implica altos costos energéticos y genera emisiones que deben ser controladas.

🦠 **Digestión anaerobia y estabilización alcalina:** aunque eficaces, pueden requerir inversiones elevadas y conllevan riesgos sanitarios y ambientales si no se operan adecuadamente.

Ante este panorama, surge la necesidad de estrategias de tratamiento más sostenibles que no solo reduzcan riesgos y volumen, sino que también valoricen el potencial energético y material contenido en los lodos de PTAR.

Una de estas alternativas innovadoras es la pirólisis solar, un proceso térmico que emplea energía solar concentrada para transformar los lodos en tres productos principales: gas de síntesis, bioaceite y biocarbón. El gas de síntesis es una mezcla de gases combustibles (principalmente hidrógeno y monóxido de carbono) que puede utilizarse para generar energía o como materia prima en procesos industriales. El bioaceite es un líquido oscuro y viscoso con un alto contenido energético, útil como combustible o como base para obtener productos químicos. Finalmente, el biocarbón es un material sólido rico en carbono, que tiene múltiples aplicaciones ambientales y agrícolas, como mejorar la fertilidad del suelo, retener agua y nutrientes, o incluso ayudar a descontaminar agua y suelos. Este enfoque ofrece una visión más circular y sostenible de la gestión de lodos, al convertir un residuo problemático en un recurso con valor agregado.

"Ante este panorama, surge la necesidad de estrategias de tratamiento más sostenibles que no solo reduzcan riesgos y volumen, sino que también valoricen el potencial energético y material contenido en los lodos de PTAR."

CARACTERÍSTICAS DE LOS LODOS DE PTAR: UN RECURSO CON POTENCIAL PARA VALORIZACIÓN MEDIANTE PIRÓLISIS SOLAR

En las plantas de tratamiento de aguas residuales, los lodos se generan principalmente en dos etapas clave del proceso: el tratamiento primario y el secundario. Los lodos primarios se producen durante la sedimentación inicial, cuando se remueven los sólidos sedimentables del agua residual cruda. Los lodos secundarios provienen del proceso biológico, en el cual microorganismos transforman la materia orgánica en biomasa, es decir, en más microorganismos.

Existen diferencias notables entre el lodo primario (más rico en sólidos inorgánicos) y el lodo secundario (mayor contenido orgánico). La composición del lodo secundario suele ser de 59–88% de sólidos volátiles, 32–41% de proteínas, 2.4–5% de nitrógeno, 2.8–11% de fósforo y un contenido energético estimado entre 19,000 y 23,000 kJ/kg [4].

Este alto contenido de materia orgánica y nutrientes, revela que los lodos no son solo un residuo a eliminar sino un recurso con valor energético. Aprovechar estas propiedades mediante tecnologías de valorización térmica, como la pirólisis solar, permitiría transformar este subproducto en recursos útiles. En lugar de ser un problema, el lodo puede convertirse en una fuente alternativa de energía y materiales.

PIRÓLISIS SOLAR DE LODOS: DEL RESIDUO HÚMEDO AL RECURSO ENERGÉTICO

Los lodos secundarios recién extraídos de las plantas de tratamiento de aguas residuales pueden considerarse biomasas saturadas, ya que su contenido de agua suele ser muy superior a su masa seca. Esta elevada humedad limita su aprovechamiento energético, por lo que el primer paso esencial es eliminar la mayor cantidad posible de agua mediante un secado pasivo o solar.

En regiones con alta radiación solar, como el noroeste de México, el secado puede realizarse a cielo abierto, confinando los lodos en zonas estratégicas y dejándolos expuestos al sol durante varios días, según las condiciones climáticas locales. Este proceso reduce la humedad hasta valores de 5 a 16 % en peso [5,6] mejorando considerablemente el poder calorífico y facilitando su manejo posterior.

Una vez que el lodo es deshidratado, puede aprovecharse energéticamente mediante procesos termoquímicos como incineración, gasificación o pirólisis, siendo esta última la que permite obtener productos con mayor valor agregado. La pirólisis se clasifica en lenta, rápida o instantánea, según la velocidad con la que el material es calentado. En el caso de la pirólisis lenta, la biomasa se somete a un calentamiento progresivo durante tiempos prolongados (calentamiento lento). La velocidad de incremento térmico —conocida como rampa de calentamiento— suele ser menor a 50 °C/min, favoreciendo la producción de biocarbón como producto predominante de la conversión [6].

PIRÓLISIS SOLAR: ENERGÍA LIMPIA PARA PROCESOS TERMOQUÍMICOS

En los últimos años, la pirólisis solar se ha consolidado como una alternativa innovadora y sostenible para la producción de biocarbón y biocombustibles. Su principio consiste en sustituir las fuentes fósiles de calor por radiación solar concentrada, lo que reduce drásticamente las emisiones y mejora la eficiencia del ciclo de vida de los biocombustibles [7].

La irradiancia solar directa sobre la superficie terrestre alcanza valores cercanos a 1000 W/m², insuficiente para alcanzar las altas temperaturas requeridas (400–800 °C) en procesos de pirólisis. Por ello, se emplean tecnologías solares que

concentran la luz del sol en una zona focal, aumentando considerablemente la cantidad de energía que llega al material. Entre las tecnologías más utilizadas se destacan: los colectores cilindro-parabólicos, los sistemas lineales y puntuales de Fresnel, los platos parabólicos, los sistemas de torres solares y los hornos solares, estos últimos especialmente valiosos para la investigación y el desarrollo experimental [7].

En el enfoque de este artículo, se plantea la implementación de un sistema de pirólisis solar indirecta, en el cual los lodos pretratados se introducen en un reactor de acero

inoxidable o al carbon, herméticamente cerrado, que permite la expulsión controlada de los gases pirolíticos. El reactor se calienta mediante radiación solar concentrada y altamente controlada, la cual es absorbida por las paredes externas y transferida por conducción principalmente hacia el interior, elevando la temperatura del lodo hasta el rango deseado para promover la conversión térmica (550°C). El resultado es la formación simultánea de biocarbón, bioaceite y gas de síntesis, productos que almacenan energía solar en forma química.

POTENCIAL ENERGÉTICO DE LOS LODOS TRATADOS POR PIRÓLISIS SOLAR






Para estimar la energía potencial que puede obtenerse de estos residuos, consideremos el caso de una planta que genera una tonelada de lodo seco al mes (1000 kg) y que dichos residuos se tratasen por medio de pirólisis solar. De acuerdo con resultados experimentales, a una temperatura de 500 °C y bajo condiciones de pirólisis lenta, las fracciones de producto que se podrían obtener son: 41 % biocarbón, 54 % bioaceite humedo y 15 % gas de síntesis [5]. Otros estudios han reportado poderes caloríficos superiores (PCS) de 16 MJ/kg, 35 MJ/kg y 25 MJ/kg [6]. Esto se resume en la Tabla 1.

El poder calorífico indica cuánta energía puede entregar un biocombustible al quemarse, lo que indica que cuanto mayor sea este más calor puede generar. Para medirlo existen dos referencias comunes Poder Calorífico Superior (PCS) y Poder Calorífico Inferior (PCI). EL PCS corresponde a la energía total del combustible, incluyendo el calor que puede recuperarse si el vapor de agua generado durante la combustión se condensa. Recordemos que al quemar biomasa se producen principalmente CO₂ y vapor de agua, y en el PCS se considera también la energía contenida en ese vapor. Mientras que el PCI, indica la energía efectivamente aprovechable cuando el vapor de agua no se condensa y se pierde con los gases de combustión. Por ello, el PCI siempre resulta menor, ya que no contempla esa fracción adicional de calor. En términos simples, el PCS muestra el máximo potencial energético del biocombustible, mientras que el PCI refleja la energía utilizable en condiciones reales de operación.

"El poder calorífico indica cuánta energía puede entregar un biocombustible al quemarse, lo que indica que cuanto mayor sea este más calor puede generar."

Potencial energético de los lodos tratados por pirólisis solar (cont...)






Tabla 1 Transformación energética de los lodos secundarios mediante pirólisis solar: rendimientos y energía contenida en cada producto

Producto	Rendimiento (%)	PCS (MJ/kg)	Energía total (MJ)
 Lodos	—	13	10 859
 Biocarbón	41	16	5 471
 Bioaceite	44	35	12 844
 Gas de síntesis	15	25	3 090
 Agua de reacción	10	—	—

Estos resultados muestran que la energía recuperable duplica el contenido energético original del lodo seco ($\approx 10\,859$ MJ; [5]), lo que representa un factor de aprovechamiento neto cercano a 1.97, gracias al aporte gratuito y renovable del recurso solar.

DEL RESIDUO AL PRODUCTO

La valorización de los lodos mediante pirólisis solar no es solo un proceso térmico, sino una cadena integrada de etapas que permitirían transformar un residuo problemático en un producto útil y versátil: el biocarbón. De manera general, el flujo del proceso puede dividirse en cinco pasos principales:

-  **1** Recepción y secado: Los lodos generados en las plantas de tratamiento se reciben y se someten a un secado, preferentemente solar, para reducir su contenido de humedad y mejorar su aprovechamiento energético.
-  **2** Acondicionamiento: Antes de la pirólisis, el material puede mezclarse o preacondicionarse (por ejemplo, combinando lodos primarios y secundarios) para lograr una composición más homogénea que facilite una pirólisis más eficiente y controlada.
-  **3** Pirólisis solar: El material seco se introduce en un reactor cerrado, donde es sometido a altas temperaturas en ausencia de oxígeno. De este proceso se obtiene una fracción sólida (biocarbón), una fracción líquida (bioaceite) y una fracción gaseosa (syngas).
-  **4** Molienda y tamizado: Una vez enfriado, el biocarbón se muele y se tamiza para obtener un tamaño de partícula adecuado a las aplicaciones previstas (por ejemplo, filtros, sustratos o enmiendas de suelo).
-  **5** Uso o venta del biocarbón: El producto final puede destinarse a diversas aplicaciones como remediación y mejora de suelos agrícolas, producción de sustratos para viveros, filtros y adsorbentes en tratamientos fisicoquímicos de agua, otras aplicaciones emergentes en investigación.

Del residuo al producto (cont...)

Es importante destacar que el rendimiento y la calidad o propiedades del biocarbón dependen de los parámetros del proceso (temperatura, tiempo de residencia, atmósfera, velocidad de calentamiento) y de la materia prima, es decir de la composición de los lodos. Variaciones en la composición de entrada pueden reflejarse directamente en las propiedades físicas y químicas del biocarbón obtenido, por lo que el control y la caracterización son esenciales para asegurar productos de calidad y uso confiable.

CONCLUSIONES: IMPACTO ENERGÉTICO Y AMBIENTAL

El aprovechamiento energético de los lodos mediante pirólisis solar representa una oportunidad concreta para transformar un residuo problemático en una fuente alternativa de energía y un sumidero de carbono.

Si esta energía se aprovechara plenamente, una tonelada de lodos pirolizados podría aportar un contenido energético equivalente al consumo eléctrico mensual de aproximadamente ocho familias mexicanas promedio, considerando un uso doméstico de 2 425 kWh por habitante [8].

Además, el biocarbón obtenido funcionaría como un sumidero de carbono estable, simplemente al ser incorporado al suelo, además de los beneficios de retención de agua y fertilidad. Con base en los factores de conversión reportados en la literatura, este proceso podría capturar alrededor de 431 toneladas de carbono al año para una planta con capacidad de procesamiento mensual de 1 tonelada. Esta captura contribuiría significativamente a los compromisos de mitigación del cambio climático y a las metas de neutralidad de carbono.

Finalmente, la pirólisis solar de lodos se alinea con los principios de economía circular (Figura 1), al reducir la necesidad de disposición final, recuperar energía y agregar valor a un residuo urbano abundante.

En síntesis, esta tecnología no solo representa una vía limpia y eficiente para aprovechar los lodos de PTAR, sino también una herramienta estratégica para avanzar hacia sistemas energéticos más sostenibles, resilientes y con menor huella ambiental.



Figura 1. Perspectiva del aprovechamiento de los lodos (residuo) para obtener, además del agua tratada, energía y biocarbón.

Declaratoria de uso de Inteligencia Artificial (AI): Se empleó para la mejora de la figura ilustrativa y como apoyo para la edición de algunas secciones del escrito.

REFERENCIAS

1. Seiple, T. E., Coleman, A. M. & Skaggs, R. L. Municipal wastewater sludge as a sustainable bioresource in the United States. *Journal of Environmental Management* 197, 673–680 (2017).
2. García-López, C. D. et al. Evaluating sludge management strategies using wastewater treatment plant simulations and life cycle assessment. *J Mater Cycles Waste Manag* 27, 2972–2986 (2025).
3. Kacprzak, M., Baran, J. & Fijalkowski, K. Emerging sewage sludge treatment technologies for land carbon sequestration: a comprehensive review. *J Mater Cycles Waste Manag* 27, 2866–2886 (2025).
4. Tchobanoglous, G., Burton, F. L., Stensel, H. D. & Metcalf & Eddy, Inc. *Wastewater Engineering: Treatment and Reuse*. (McGraw-Hill Education, 2003).
5. Sobek, S. & Werle, S. Solar pyrolysis of waste biomass: A comparative study of products distribution, in situ heating behavior, and application of model-free kinetic predictions. *Fuel* 292, 120365 (2021).
6. Barry, D., Barbiero, C., Briens, C. & Berruti, F. Pyrolysis as an economical and ecological treatment option for municipal sewage sludge. *Biomass and Bioenergy* 122, 472–480 (2019).
7. Maytorena, V. M. & Buentello-Montoya, D. A. Worldwide developments and challenges for solar pyrolysis. *Heliyon* 10, e35464 (2024).
8. SENER. Capítulo 6. Demanda y consumo. Programa de Desarrollo del Sistema eléctrico nacional 2022-2036. (2022).