

Co-carbonización hidrotérmica de cascarilla de arroz y digestato para generar agua de proceso con potencial fertilizante

Sandra Janeth Salgado-Serrano, Juan Manuel Méndez-Contreras, Alejandro Alvarado-Lassman y Norma Alejandra Vallejo-Cantú *

División de Estudios de Posgrado e Investigación, Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Orizaba, Av. Oriente 9, 852. Col. Emiliano Zapata, Orizaba, Veracruz C.P. 94320, México.

* Autor de correspondencia: norma.vc@orizaba.tecnm.mx

Desarrollo Sustentable (Gestión y aprovechamiento de residuos sólidos)

Recibido: 23 de agosto de 2025 Aceptado: 2 de octubre de 2025 Publicado: 28 de enero de 2026

DOI: <https://doi.org/10.56845/terys.v5i1.634>

Resumen: La co-carbonización hidrotérmica (co-CHT) de residuos agroindustriales surge como una alternativa sostenible para la gestión y aprovechamiento de residuos. En este estudio se evaluó la transformación de cascarilla de arroz y digestato, proveniente del proceso de digestión anaerobia, en agua de proceso e hidrochar mediante co-CHT a 180 °C, 1 MPa y durante 2 h, utilizando proporciones 1:1 y 1:3. El objetivo principal fue caracterizar el agua de proceso para su posible aplicación como fertilizante líquido. El agua de proceso presentó pH ácido de 3.48 (1:1) y 3.96 (1:3), bajo contenido de sólidos totales 1.64 % (1:1) y 0.92 % (1:3), sólidos volátiles 77.13 % (1:1) y 70.78 % (1:3), cenizas 22.87 % (1:1) y 29.22 % (1:3) y alta carga orgánica total (DQO_T 51.43 g/L en 1:1 y 28.00 g/L en 1:3) y soluble (DQO_S 50.43 g/L en 1:1 y 26.20 g/L en 1:3), así como concentraciones relevantes de macronutrientes (N y P); 21 mg N/L (1:1), 250 mg N/L (1:3), 180 mg P/L (1:1) y 130 mg P/L (1:3). El hidrochar seco mostró los siguientes valores para las proporciones 1:1 y 1:3, respectivamente; un pH ácido (4.55 y 4.68), alto contenido de sólidos totales (94.98 y 96.69 %), bajo contenido de humedad (5.02 y 3.31 %), sólidos volátiles (75.32 y 75.31 %) y cenizas (24.68 y 24.69 %). Los rendimientos obtenidos fueron de 71.55 % (1:1) y 71.59 % de hidrochar (1:3), respecto a la masa de cascarilla, así como 93.23 % (1:1) y 87.25 % de agua de proceso (1:3), respecto a la masa de digestato, destacando que la proporción 1:3 mostró mayor rendimiento de agua de proceso. En general, la co-CHT de cascarilla de arroz y digestato representa una alternativa viable para el aprovechamiento de residuos, generando productos con características prometedoras para su uso agrícola.

Palabras clave: hidrochar, agua de proceso, co-carbonización hidrotérmica, digestión anaerobia, fertilizante orgánico líquido

Co-hydrothermal carbonization of rice husk and digestate to produce process water with fertilizing potential

Abstract: Hydrothermal co-carbonization (co-HTC) of agro-industrial residues emerges as a sustainable alternative for waste management and valorization. In this study, rice husk and digestate derived from anaerobic digestion were transformed into process water and hydrochar through co-HTC at 180 °C, 1 MPa, for 2 h, using mixing ratios of 1:1 and 1:3. The main objective was to characterize the process water for its potential application as a liquid fertilizer. The process water presented an acidic pH of 3.48 (1:1) and 3.96 (1:3), low total solids content of 1.64 % (1:1) and 0.92 % (1:3), volatile solids of 77.13 % (1:1) and 70.78 % (1:3), ash contents of 22.87 % (1:1) and 29.22 % (1:3), as well as high organic load, both total (TCOD: 51.43 g/L at 1:1 and 28.00 g/L at 1:3) and soluble (SCOD: 50.43 g/L at 1:1 and 26.20 g/L at 1:3). Relevant concentrations of macronutrients (N and P) were also found: 21 mg N/L (1:1), 250 mg N/L (1:3), 180 mg P/L (1:1), and 130 mg P/L (1:3). The dry hydrochar showed, for 1:1 and 1:3 respectively, acidic pH values (4.55 and 4.68), high total solids (94.98 and 96.69 %), low moisture content (5.02 and 3.31 %), volatile solids (75.32 and 75.31 %), and ash contents (24.68 and 24.69 %). The obtained yields were 71.55 % (68 g) at 1:1 and 71.59 % (34 g) at 1:3 for hydrochar relative to rice husk mass, as well as 93.23 % (312 g) at 1:1 and 87.25 % (438 g) at 1:3 for process water relative to digestate mass. Biogas generation reached 1020 mL (1:1) and 580 mL (1:3), with the 1:3 ratio showing a higher yield of process water. Overall, co-HTC of rice husk and digestate represents a viable alternative for waste valorization, generating products with promising characteristics for agricultural use.

Keywords: hydrochar, process water, hydrothermal co-carbonization, anaerobic digestion, liquid organic fertilizer

Introducción

En los últimos años, la generación de residuos agrícolas e industriales ha incrementado considerablemente, dichos residuos suelen ser desechados de forma incorrecta representando un grave problema ambiental. Tan solo en México se generan aproximadamente 56 427 toneladas de residuos orgánicos diarios (SEMARNAT, 2020). Generalmente, la cascarilla de arroz, un subproducto generado por la industria arrocería, y el digestato, un residuo líquido resultante del

proceso de digestión anaerobia, son residuos dispuestos de forma inadecuada generando impactos negativos como emisiones de gases de efecto invernadero, contaminación del agua y del suelo (Chen *et al.*, 2025).

De acuerdo con datos de la SIAP (2023) se tuvo una producción de 246 000 toneladas de arroz palay, de los cuales Veracruz produjo 30 766 toneladas, que al mismo tiempo genera una enorme cantidad de cascarilla como residuo. A su vez, dicha producción ha hecho necesario el aumento en la productividad de los cultivos para satisfacer la demanda alimentaria, sin embargo, debido al uso excesivo de fertilizantes químicos, las tierras que son utilizadas para el cultivo están sufriendo pérdida de nutrientes, acidificación y degradación (Wang *et al.*, 2024).

Ante esta problemática, la combinación de residuos como el digestato y la cascarilla de arroz, puede ser aprovechada para enmienda de suelos y fertilizantes orgánicos, mediante el proceso de co-carbonización hidrotérmica (co-CHT), ya que permite el aprovechamiento de biomasa húmeda en condiciones de temperatura y presión adecuadas, sin requerir un secado previo. Como resultado, se obtienen tres fracciones: hidrochar, agua de proceso y biogás.

Si bien el hidrochar ha sido ampliamente estudiado por su potencial como enmienda del suelo, la fase líquida (agua de proceso) ha recibido menor atención. No obstante, diversos estudios han reportado que en esta fase se concentra una fracción considerable de nutrientes como nitrógeno, fósforo y potasio, los cuales son fundamentales para el crecimiento de las plantas, por ejemplo, Mau *et al.* (2016) realizaron la CHT de la cama de aves de corral, examinaron el agua de proceso y encontraron concentraciones relativamente altas de los macronutrientes N, P y K en el líquido (N de 1356 a 2292 mg/L, P de 940 a 2250 mg/L y K de 5870 a 6330 mg/L), sin embargo, los autores señalan que agua de proceso tendría que diluirse para que los nutrientes pudieran estar presentes en concentraciones adecuadas para las plantas.

Huang *et al.* (2022) prepararon fertilizantes con diferentes porcentajes de agua de proceso (de la CHT de estiércol de aves de corral, 220 °C, 1 u 8 h) y urea para suministrar 160 mg kg⁻¹ de N total en un suelo alcalino árido; y los resultados demostraron que la adición de agua de proceso en relación con la urea pura disminuyó la mineralización de N orgánico por baja bioaccesibilidad, aumentó la pérdida de N por alto pH del suelo y disminuyó NO₃⁻-N por sustrato de baja nitrificación, además se potenciaron las bacterias de descomposición, ureólisis y desnitrificación.

Celletti *et al.* (2021) estudiaron la carbonización hidrotérmica de estiércol de vaca caracterizando el agua de proceso resultante en términos de pH, conductividad, C orgánico total, N total, minerales y compuestos orgánicos; en hidroponía con maíz, observaron que una dilución 1:30 del agua de proceso resultó tóxica (por sodio y alcalinidad), mientras que diluciones 1:60 y 1:90 permitieron el desarrollo vegetal adecuada, destacando la importancia de diluir la fase líquida antes de su uso agrícola.

Shan *et al.* (2023) evaluaron el potencial del agua de proceso generada mediante CHT de lodos municipales (a 180 °C y 220 °C) como fertilizante líquido en aplicaciones agrícolas y encontraron que tiene una abundancia relativa de 67 % y 75 % de compuestos que contienen N a 180 °C y 220 °C, respectivamente, además su concentración de metales pesados fue significativamente menor que los límites impuestos por los estándares de aplicación agrícola en varios países.

Tsarpali *et al.* (2021) encontraron que la fase acuosa generada durante la carbonización hidrotérmica de algas extraídas de lípidos contenía altas concentraciones de nitrógeno (2.4 g/L), fósforo (1.75 g/L), carbono orgánico (20.9 g/L) y oligoelementos, además demostraron que puede servir como un medio de cultivo económico que mejora la productividad lipídica de las algas.

Los antecedentes muestran que la composición del agua de proceso depende del tipo de biomasa empleada, en este sentido, la co-CHT de digestato y cascarilla de arroz resulta una alternativa adecuada, ya que ambos residuos son abundantes y con un gran potencial para aportar nutrientes al agua de proceso: el digestato aporta nitrógeno, mientras que la cascarilla de arroz contribuye con compuestos orgánicos. Su combinación mediante co-CHT permite un mejor aprovechamiento de nutrientes y una estrategia sostenible de bajo costo para reducir los impactos ambientales de su disposición inadecuada.

Por tal motivo, el objetivo de este estudio fue evaluar las propiedades del agua de proceso obtenida a partir de la co-carbonización hidrotérmica de la mezcla de cascarilla de arroz y digestato con el fin de determinar su potencial uso

agrícola como fertilizante orgánico líquido, además de representar una alternativa para disminuir la cantidad de residuos orgánicos, promoviendo la economía circular y el aprovechamiento de residuos.

Materiales y Métodos

Recolección de la materia prima

La cascarilla de arroz utilizada en este estudio (500 g) fue obtenida de una planta procesadora de arroz de la ciudad de Orizaba, Ver. El digestato (2 L) se recolectó de un Reactor de Biopelícula Anaerobio (RBA) del Laboratorio de Ambiental I del Instituto Tecnológico de Orizaba alimentado con residuos sólidos de frutas y verduras (jitomate, lechuga y naranja) obtenidos del mercado municipal “Emiliano Zapata” ubicado en la ciudad de Orizaba, Ver.

Caracterización fisicoquímica de la cascarilla de arroz y digestato

Antes de llevar a cabo el proceso de co-carbonización hidrotérmica se realizó la caracterización de los residuos utilizados para conocer las propiedades iniciales y el comportamiento de la materia prima durante el proceso.

Para el análisis de la cascarilla de arroz se determinaron sólidos totales, contenido de humedad, cenizas y sólidos volátiles siguiendo los métodos establecidos en la Tabla 1, asimismo, se midió el pH de acuerdo con la norma NMX-AA-025-1984 que establece el método potenciométrico para determinar el pH en residuos sólidos.

Por otra parte, al digestato se le realizaron determinaciones que incluyen el pH, demanda química de oxígeno (DQO), y se evaluó el contenido de sólidos totales, sólidos volátiles, humedad y cenizas como se muestra en la Tabla 1, también se le realizó un análisis de macronutrientes para evaluar la concentración de nitrógeno y fósforo.

Todas estas determinaciones se realizaron para conocer la influencia de los residuos en la calidad del agua de proceso resultante.

Co-carbonización hidrotérmica de la mezcla digestato y cascarilla de arroz

Para la obtención del agua de proceso se realizó la co-carbonización hidrotérmica (co-CHT) mediante el uso de un reactor de acero inoxidable tipo batch, (Modelo CF-1, TOPTION INSTRUMENTS, China) con capacidad de 1 L, utilizando las siguientes condiciones de operación; $T=180\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t_{\text{reacción}}=2\text{ h}$ y $P=1\text{ MPa}$, utilizando las proporciones 1:1 y 1:3, operando el reactor al 70 % de su capacidad.

Para la carbonización con la proporción 1:1 se agregó al reactor 95.03 g de cascarilla de arroz triturada (equivalente a 350 mL) con 350 mL de digestato y para la proporción 1:3 se agregó al reactor 47.49 g de cascarilla de arroz triturada (175 mL) con 525 mL de digestato.

Una vez finalizado el proceso y enfriado el sistema, el agua de proceso se recolectó de forma manual directamente del reactor, utilizando un sistema de filtración compuesto por una malla y un embudo de vidrio para remover sólidos suspendidos (hidrochar), el volumen recolectado fue cuantificado mediante el uso de una probeta graduada de 500 mL, posteriormente el agua de proceso se almacenó en recipientes para su posterior caracterización.

Por otra parte, el hidrochar húmedo se separó por filtración y se secó en una estufa(modelo H-33, Riossa) a $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante 2 horas, para su caracterización y almacenamiento. El gas de síntesis únicamente se cuantificó a través de una válvula superior localizada en la tapa del reactor.

Caracterización de las fases de la co-carbonización hidrotérmica

Después del proceso de co-carbonización hidrotérmica y la recolección de las fases (sólida y líquida), se realizó su caracterización. Al agua de proceso se le determinó pH, demanda química de oxígeno (DQO), sólidos totales, sólidos volátiles, cenizas, humedad y un análisis que incluye la determinación de macronutrientes como nitrógeno y fósforo y

al hidrochar seco se le determinó pH, sólidos totales, sólidos volátiles, cenizas y humedad. Las Tablas 1 y 2 muestran los métodos utilizados para realizar las caracterizaciones.

Tabla 1. Parámetros físicos evaluados y métodos de prueba

Físicos	Método
pH	Potenciómetro 4500-H ⁺ B Standard Methods
Sólidos Totales (ST)	Gravimétrico
Sólidos Totales Volátiles (SV)	Gravimétrico
Cenizas	Gravimétrico
Humedad	Gravimétrico

Tabla 2. Parámetros químicos evaluados y métodos de prueba

Químicos	Método
DQO Total (DQO _T)	Micrométodo Colorimétrico 5220 D Standard Methods
DQO Soluble (DQO _S)	Micrométodo Colorimétrico 5220 D Standard Methods
Nitrógeno	Nitrógeno total (HI 93767B) Método de ácido cromotrópico
Fósforo	Método colorimétrico (Técnica de Fiske-Subbarow)

Todas las mediciones se realizaron por duplicado y se reporta el valor promedio.

Resultados y Discusión

Caracterización de la cascarilla de arroz y el digestato

Los resultados obtenidos de la caracterización de la materia prima (cascarilla de arroz y digestato) empleada en el proceso experimental se muestran en las Tabla 3 y Tabla 4, respectivamente.

Tabla 3. Caracterización de la cascarilla de arroz

Determinaciones	Resultados
pH	5.78
% ST	89.61
% SV	78.80
% Cenizas	21.19
% Humedad	10.39

Los resultados de la caracterización de la cascarilla de arroz (Tabla 3), muestran valores altos del porcentaje de sólidos totales y bajo contenido de humedad, demostrando que es un residuo con una gran cantidad de materia seca. De igual forma se muestran valores altos de sólidos volátiles, esto se debe a que, de acuerdo con Kordi *et al.*, 2024 la mayor parte de la cascarilla de arroz está constituida por materia orgánica como celulosa (23-25 %), hemicelulosa (18-21 %) y lignina (25-31 %), mientras que el porcentaje de cenizas de 21.19 % indica la fracción inorgánica compuesta principalmente por sílice (18-25 %). Por otra parte, la cascarilla de arroz presentó un pH ácido debido a su composición

lignocelulósica. Estos valores son comparables con los reportados por Arshad y Moin (2025), quienes observaron humedad entre 9.2 - 11.2 %, sólidos volátiles entre 58.8 - 66.4 % y cenizas de 15.9 - 25.6 % en cascarilla de arroz.

Tabla 4. Caracterización fisicoquímica del digestato

Determinaciones	Resultados
pH	6.67
% ST	0.42
% SV	50.22
% Cenizas	49.78
% Humedad	99.58
DQO _T (g/L)	16.95
DQO ₅ (g/L)	11.29
Nitrógeno (mg N/L)	347.5
Fósforo (mg P/L)	80

En la Tabla 4 se observa que el digestato presentó un pH ligeramente ácido (casi neutro), que es característico de este tipo de residuos provenientes de un proceso de digestión anaerobia. Como se muestra en la Tabla 4, el porcentaje de sólidos totales fue muy bajo debido a que el reactor de biopelícula trata la fracción líquida de los residuos y su configuración evita la salida en exceso de biomasa. Respecto al porcentaje de sólidos volátiles (50.22 %) y el de cenizas (49.78 %) se refieren a los sólidos totales (ST), indicando que aproximadamente la mitad de los sólidos corresponden a materia orgánica y la otra mitad a materia inorgánica (minerales), los resultados de la demanda química de oxígeno mostraron valores elevados, con una DQO_T de 16.95 g/L y una DQO₅ de 11.29 g/L, esto indica que se tiene una carga orgánica alta pero menor que la de su materia prima de origen (residuos de frutas y verduras) debido a la acción de los microorganismos durante la degradación. Finalmente, respecto al análisis de macronutrientes se encuentran valores de 347.5 mg N/L y 80 mg P/L. Los resultados obtenidos en este estudio coinciden con los reportados en la literatura para digestato líquido derivados de la digestión anaerobia de residuos orgánicos, presentan un pH neutro, bajo contenido de sólidos totales debido a su alta proporción de agua, y una elevada demanda química de oxígeno (DQO_T y DQO₅), indicando alta carga orgánica, tal como reportan estudios previos (Camilleri-Rumbau *et al.*, 2021; Nayak y Ranade., 2025; Parra-Orobio *et al.*, 2021). En cuanto a los valores de nitrógeno y fósforo reportados se sitúan en un rango intermedio en comparación con los valores reportados en la literatura, por ejemplo, Krzemińska *et al.* (2019) encontraron concentraciones de nitrógeno total más bajas (115.73 mg/L) y en cuanto a fósforo encontraron 2.08 mg P/L en el digestato líquido proveniente de la fermentación de metano del ensilado de maíz, esto sugiere que la concentración de nutrientes en el digestato puede variar considerablemente dependiendo de la fuente y el proceso de digestión anaerobia utilizado.

Rendimiento obtenido a partir de la co-carbonización

El proceso de la co-carbonización hidrotérmica de la mezcla de digestato y cascarilla de arroz, así como el tratamiento posterior del agua de proceso y el hidrochar se ilustran a continuación en las siguientes figuras.

En la Figura 1, se muestra el proceso de co-carbonización hidrotérmica y los productos obtenidos al finalizar la reacción; sin embargo, el hidrochar y el agua de proceso se encontraban mezclados, por lo que, como se muestra en la Figura 2 se realizó el proceso de separación mediante filtrado, recuperando el agua de proceso en una probeta de 500 mL.

Por otro lado, el hidrochar húmedo recuperado se colocó en una charola de aluminio (Figura 3a) y se secó en la estufa a 105 °C



Figura 1. Co-carbonización hidrotérmica finalizada



Figura 2. Agua de proceso obtenida

durante 2 horas, para obtener el hidrochar seco (Figura 3b) que fue utilizado para la caracterización.



Figura 3. Hidrochar obtenido: (a) Húmedo y (b) seco

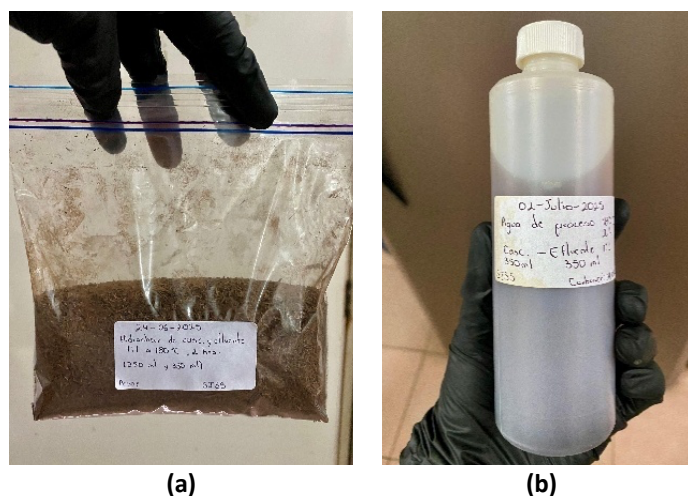


Figura 4. Productos etiquetados para su caracterización y almacenamiento: (a) Hidrochar seco y (b) agua de proceso

Como se muestra en la Figura 4 el hidrochar seco y el agua de proceso se almacenaron adecuadamente en bolsa hermética y botella de plástico, respectivamente, para su almacenamiento y caracterización.

El rendimiento que se genera a partir de las co-carbonizaciones de las proporciones 1:1 y 1:3 de cascarilla de arroz y digestato a 180 °C y 1 MPa, se muestra a continuación en la Tabla 5.

Tabla 5. Productos obtenidos de la co-carbonización hidrotérmica de cascarilla de arroz-digestato

Proporción de la co-carbonización	Cantidad de hidrochar seco (g)	Cantidad de agua de proceso (g)	Volumen total de biogás* (mL)
1:1	68	312	1020
1:3	34	438	580

*El biogás no se utilizó en este trabajo, únicamente se cuantificó

En la Tabla 5 se muestra que la co-carbonización hidrotérmica en proporción 1:1 (350 mL de cascarilla de arroz triturada y 350 mL de digestato) produjo una mayor cantidad de hidrochar (68 g), mientras que al incrementar la proporción de digestato 1:3 (175 mL de cascarilla de arroz triturada y 525 mL de digestato) la producción de agua de proceso fue superior (438 g). Esto indica que la cantidad de cada residuo que se introduce al reactor influye directamente en la cantidad de los productos obtenidos: una mayor cantidad añadida de cascarilla de arroz favorece la formación de hidrochar, mientras que una mayor cantidad de digestato incrementa la fracción líquida. En cuanto al biogás, aunque no se utilizó en este estudio, se puede observar que su volumen fue mayor en la proporción 1:1, lo que sugiere que la composición de la mezcla también influye en la generación de gases durante el proceso.

Tabla 6. Rendimiento de la co-carbonización hidrotérmica de cascarilla de arroz-digestato

	Proporción (cascarilla de arroz:digestato)	
	1:1	1:3
Cascarilla de arroz (g húmeda)	95.03	47.49
Digestato (g húmedo)	334.65	501.97
Rendimiento del hidrochar seco (% base cascarilla de arroz)	71.55	71.59
Rendimiento del agua de proceso (% base digestato)	93.23	87.25
Hidrochar (g)	68.00 g	34.00 g
Recuperación hidrochar (% alimentación total)	15.82	6.19
Agua de proceso (g)	312.00	438.00
Recuperación agua (% alimentación total)	72.61	79.71
Biogás contabilizado (g)	49.68	77.49
Biogás (% alimentación total)	11.57	14.10

En la Tabla 6 se presentan los rendimientos y recuperaciones obtenidos en la co-carbonización hidrotérmica de cascarilla de arroz y digestato. A nivel de rendimiento relativo, tanto en la proporción 1:1 como en 1:3 se alcanzaron valores de hidrochar superiores al 71 % respecto a la masa de cascarilla, mientras que los rendimientos de agua de proceso superaron el 87 % respecto a la masa de digestato. Sin embargo, al considerar la alimentación total (cascarilla + digestato), la recuperación de hidrochar correspondió al 15.82 % y 6.20 % para las proporciones 1:1 y 1:3, respectivamente, mientras que la recuperación de agua de proceso alcanzó 72.61 % y 79.71 %. El balance de materia mostró además una fracción contabilizada de 11.57 % en la proporción 1:1 y de 14.10 % en la proporción 1:3, atribuible a la generación de gases (biogás). Cabe destacar que las proporciones 1:1 y 1:3 se expresan en base húmeda. Estos resultados reflejan que la co-carbonización hidrotérmica permite una recuperación eficiente de ambos productos, destacando su potencial como una estrategia sostenible para el aprovechamiento de residuos, además estos rendimientos superiores al 70 % implican una reducción significativa del volumen del residuo original (cascarilla de arroz y digestato), lo que es relevante desde el punto de vista ambiental, ya que facilita su manejo y almacenamiento, representando menores costos de transporte y almacenamiento, y convierte un residuo difícil de gestionar en un producto con valor agregado, como un fertilizante parcial u orgánico. Sin embargo, para que sea considerado un fertilizante orgánico conforme a la normativa mexicana, sería necesario realizar estudios de efectividad biológica que demuestren su impacto positivo en el crecimiento y desarrollo de las plantas, siguiendo los protocolos establecidos en la NOM-077-FITO-2000. Por lo tanto, el término “fertilizante” se emplea aquí solo para indicar el potencial de uso agronómico del producto, sin implicar que cumpla actualmente con los criterios oficiales para su aplicación agrícola.

Caracterización del agua de proceso obtenida

Los resultados de la caracterización fisicoquímica del agua de proceso obtenida en ambos ensayos de co-carbonización hidrotérmica (1:1 y 1:3) se presentan en la Tabla 7.

Tabla 7. Caracterización del agua de proceso

Carbonización	pH	% ST	% SV	% Cenizas	% Humedad	DQO _T (g/L)	DQO _S (g/L)
1:1	3.48	1.64	77.13	22.87	98.36	51.43	50.43
1:3	3.96	0.92	70.78	29.22	99.08	28.00	26.20

¹ Los valores corresponden a promedios de duplicado

En cuanto al agua de proceso obtenida, se observó que el pH presentó valores ácidos en ambas proporciones, siendo ligeramente mayor en la proporción 1:3 (pH=3.96) respecto a 1:1 (pH=3.48) este pH se presentó debido a la formación de ácidos orgánicos en la co-carbonización hidrotérmica, además el aumento del pH en la proporción 1:3 se debe a que hubo una mayor adición de digestato a la mezcla, estos valores son más ácidos que los reportados en estudios previos con lodos y residuos urbanos, donde el pH del agua de proceso suele estar alrededor de 4.5 o superior (Langone y

Basso, 2020). En cuanto al contenido de sólidos totales, se registró una disminución al pasar de 1.64 % en la proporción 1:1 a 0.92 % en la proporción 1:3, mientras que los sólidos volátiles también mostraron una reducción (de 77.13 % a 70.78 %), acompañada de un incremento en el porcentaje de cenizas (de 22.87 % a 29.22 %). Finalmente, la demanda química de oxígeno total (DQO_T) y la disuelta (DQO_S) disminuyeron de manera importante con el incremento de digestato en la mezcla, pasando de 51.43 a 28.00 g/L (DQO_T) y de 50.43 a 26.20 g/L (DQO_S), lo que sugiere una menor carga orgánica en el efluente cuando se trabaja con mayor proporción de digestato. Los valores de DQO_T y DQO_S que se reportan se encuentran en los rangos más altos reportados en estudios similares, pues trabajos como el de Nobre *et al.*, (2021) reportan DQO de hasta 27.2 g/L para residuos similares.

Tabla 8. Análisis de nutrientes del agua de proceso

Carbonización	Nitrógeno (mg N/L)	Fósforo (mg P/L)
1:1	21	180
1:3	250	130

¹ los valores corresponden a promedios de duplicado

La Tabla 8 muestra los resultados obtenidos tras la determinación de macronutrientes (N y P) en ambas carbonizaciones. Se observa que el nitrógeno aumentó de manera significativa al pasar de 21 mg N/L (1:1) a 250 mg N/L (1:3). Por otro lado, el fósforo presentó una disminución de 180 mg P/L en la proporción 1:1 a 130 mg P/L en la proporción 1:3. Esto indica que una mayor proporción de cascarilla favorece la liberación de N al líquido y puede reducir la disponibilidad de P, evidenciando la influencia directa de la relación inicial sobre la distribución de nutrientes tras la co-carbonización hidrotérmica. En comparación con lo reportado por Mau *et al.* (2016), quienes evaluaron el agua de proceso obtenida tras la carbonización hidrotérmica de cama de aves de corral y encontraron concentraciones elevadas de N (1356-2292 mg/L) y P (940-2250 mg/L), los valores obtenidos en este estudio fueron menores. Esta diferencia puede deberse a las materias primas empleadas, ya que la cama de aves de corral presenta un alto contenido de nutrientes debido a las excretas y materia orgánica fácilmente degradable, lo que favorece la liberación de N y P al agua de proceso durante la CHT, por otro lado, la cascarilla de arroz es un residuo lignocelulósico con un menor aporte nutricional, por lo que al combinarse con el digestato se obtienen concentraciones menores en comparación con sustratos de origen animal. Sin embargo, los resultados obtenidos son relevantes desde el punto de vista ambiental, ya que el agua de proceso generada contiene nutrientes en concentraciones más bajas que las reportadas en otros estudios, lo que podría reducir la implicación de procesos de dilución antes de su aplicación en suelos y en plantas. Si bien los resultados de este estudio muestran que el agua de proceso contiene cantidades importantes de nitrógeno y fósforo, para que pueda clasificarse oficialmente como fertilizante orgánico debe demostrarse su eficiencia biológica y el cumplimiento de los límites de contaminantes establecidos en la NOM-077-FITO-2000. En este sentido, el agua de proceso obtenida en este estudio se reconoce como un producto con potencial uso como mejorador de suelo o fertilizante orgánico.

Caracterización del hidrochar obtenido

Los resultados de la caracterización fisicoquímica del hidrochar seco obtenido en ambos ensayos de co-carbonización hidrotérmica se presentan en la Tabla 9.

Tabla 9. Caracterización del hidrochar seco

Carbonización	pH	% ST	% SV	% Cenizas	% Humedad
1:1	4.55	94.98	75.32	24.68	5.02
1:3	4.68	96.69	75.31	24.69	3.31

¹ los valores corresponden a promedios de duplicado

Nota: Los porcentajes de sólidos totales y humedad fueron calculados en base al peso seco del hidrochar, tras el proceso de secado.

La Tabla 9 muestra que el hidrochar presentó un pH ácido en ambas condiciones, con valores ligeramente mayores en la proporción 1:3 (4.68) frente a 1:1 (4.55). El contenido de sólidos totales fue más alto en la proporción 1:3 (96.69 %) en comparación con 1:1 (94.98 %), mientras que los sólidos volátiles y las cenizas se mantuvieron prácticamente constantes (75 % y 24 %, respectivamente) lo que indica que la composición orgánica e inorgánica del hidrochar no se vio significativamente afectada por la proporción inicial. La humedad fue menor en 1:3 (3.31 %) respecto a 1:1 (5.02 %). Los valores obtenidos en este estudio son consistentes con los reportados en la literatura para hidrochar, por ejemplo, un estudio reciente sobre la caracterización de hidrochar derivado de biomasa de madera blanda (Mohan *et al.*, 2025) reportó valores de pH ácido, alto contenido de sólidos totales y sólidos volátiles relativamente constantes.

Conclusiones

Los resultados obtenidos en este estudio demuestran que la co-carbonización hidrotérmica de la mezcla de digestato y cascarilla de arroz es una estrategia eficiente para la valorización de residuos agroindustriales, permitiendo la producción de agua de proceso e hidrochar con altos rendimientos (>87 % para agua de proceso y >70 % para hidrochar), lográndose mejores resultados (mayor cantidad de agua de proceso) en la carbonización 1:3. El agua de proceso generada se caracterizó por un pH ácido, alto contenido de humedad y baja proporción de sólidos totales, lo que confirma que es mayormente líquida. Los valores altos de DQO_T y DQO₅ demuestran que el agua de proceso posee una carga orgánica alta, principalmente en forma soluble (líquida). En cuanto a la determinación de macronutrientes en el agua de proceso, los resultados muestran que la proporción de materias primas en la co-carbonización hidrotérmica influye directamente en la composición final del agua de proceso, mientras que la relación 1:1 favoreció un mayor contenido de fósforo (180 mg P/L), la relación 1:3 incrementa de forma considerable la concentración de nitrógeno (250 mg N/L). Desde una perspectiva agrícola, la relación 1:1 resulta más adecuada en aplicaciones donde se busca un mayor aporte de fósforo, nutriente fundamental en los procesos de floración. Por otro lado, la relación 1:3 representa una alternativa viable si se busca un elevado contenido de nitrógeno, especialmente durante las etapas iniciales de crecimiento vegetativo. En términos generales, dado que el nitrógeno constituye el macronutriente más demandado por la mayoría de los cultivos, la relación 1:3 puede considerarse la opción más favorable para el desarrollo de un fertilizante líquido. Esta variación de nutrientes permite ajustar la cantidad de digestato que se debe ingresar al reactor de carbonización hidrotérmica para obtener el agua de proceso ideal en función del requerimiento de algún cultivo en específico. Además, mostró concentraciones de macronutrientes N y P menores a las reportadas en la literatura para residuos de otro origen, lo que podría facilitar su aplicación agrícola sin requerir diluciones significativas. Por otra parte, el hidrochar resultante presentó características fisicoquímicas similares en ambas carbonizaciones, con un alto contenido de sólidos totales y un pH ácido. Los resultados demuestran que el proceso de co-carbonización hidrotérmica no solo reduce significativamente el volumen de los residuos originales, contribuyendo a la disminución de impactos ambientales asociados con su disposición, sino que también genera productos con valor agregado, confirmando que la valorización de residuos agrícolas e industriales mediante co-carbonización hidrotérmica representa una alternativa sostenible para el manejo y aprovechamiento de residuos.

Es importante resaltar que este estudio no evaluó la toxicidad del agua de proceso ni el contenido de metales pesados, por lo que se recomienda precaución antes de su aplicación agrícola directa y la realización de análisis adicionales para garantizar su seguridad.

Agradecimientos y financiamiento: Se agradece a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por el apoyo económico brindado a través de la beca de maestría, el cual hizo posible el desarrollo de este trabajo científico.

Bibliografía

- Arshad, H., & Moin, A. (2025). Physical and chemical properties of rice husk. In *Rice Husk Biomass: Processing, Properties and Applications* (pp. 27–42). Springer Nature Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-96-1082-2_2
- Camilleri-Rumbau, M., Briceño, K., Fjerbæk Sjøft, L., Christensen, K., Roda-Serrat, M., Errico, M., & Norddahl, B. (2021). Treatment of manure and digestate liquid fractions using membranes: Opportunities and challenges. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(6), 3107. <https://doi.org/10.3390/ijerph18063107>
- Celletti, S., Lanz, M., Bergamo, A., Benedetti, V., Basso, D., Baratieri, M., Cesco, E., & Mimmo, T. (2021). Evaluating the aqueous phase from hydrothermal carbonization of cow manure digestate as possible fertilizer solution for plant growth. *Frontiers in Plant Science*, 12, 687434. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.687434>

- Chen, H., Sheng, J., Ye, Q., Li, J., Yu, X., Wu, H., Zhang, R., Zhao, S., Zou, X., Li, X., Xue, G., & Yuan, B. (2025). Efficient resource recovery from food waste digestate via hydrothermal treatment and its application as organic fertilizer. *Bioresource Technology*, 416, 131742. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2024.131742>
- Huang, H., Su, Q., Li, J., Niu, Z., Wang, D., Wei, C., Long, S., Ren, J., Wang, J., Shan, B., Li, Y., Liu, Y., Li, Q., & Zhang, Y. (2022). Effects of process water obtained from hydrothermal carbonization of poultry litter on soil microbial community, nitrogen transformation, and plant nitrogen uptake. *Journal of Environmental Management*, 323, 116307. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116307>
- Kordi, M., Farrokhi, N., Pech-Canul, M., & Ahmadikhah, A. (2024). Rice husk at a glance: From agro-industrial to modern applications. *Rice Science*, 31(1), 14–32. <https://doi.org/10.1016/j.rsci.2023.08.005>
- Krzemińska, I., Oleszek, M., & Wiącek, D. (2019). Liquid anaerobic digestate as a source of nutrients for lipid and fatty acid accumulation by *Auxenochlorella protothecoides*. *Molecules*, 24(19), 3582. <https://doi.org/10.3390/molecules24193582>
- Langone, M., & Basso, D. (2020). Process waters from hydrothermal carbonization of sludge: Characteristics and possible valorization pathways. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(18), 6618.
- Mau, V., Quance, J., Posmanik, R., & Gross, A. (2016). Phases' characteristics of poultry litter hydrothermal carbonization under a range of process parameters. *Bioresource Technology*, 219, 632–642. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.08.027>
- Mohan, O., Fakayode, O., & Kumar, A. (2025). Biofuel production from pipeline-transported lignocellulosic biomass via hydrothermal liquefaction: Process optimization and product characterization. *Biomass and Bioenergy*, 202, 108210. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2025.108339>
- Nayak, J., & Ranade, V. (2025). Valorisation of digestate: Characteristics, products, processes and potential. *Chemical Engineering Journal Advances*, 100887. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2025.100887>
- Nobre, C., Alves, O., Durão, L., Şen, A., Vilarinho, C., & Gonçalves, M. (2021). Characterization of hydrochar and process water from the hydrothermal carbonization of refuse-derived fuel. *Waste Management*, 120, 303–313. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.11.040>
- Parra-Orobio, B., Rotavisky-Sinisterra, M., Pérez-Vidal, A., Marmolejo-Rebellón, L., & Torres-Lozada, P. (2021). Physicochemical and microbiological characterization and phytotoxicity of digestates produced on single-stage and two-stage anaerobic digestion of food waste. *Sustainable Environment Research*, 31(1), 11. <https://doi.org/10.1186/s42834-021-00085-9>
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2020). *Diagnóstico Básico para la Gestión Integral de Residuos 2020*. México. <https://www.gob.mx/semarnat/prensa/presenta-semarnat-el-diagnostico-basico-para-la-gestion-integral-de-residuos-2020>
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. (2023). *Escenario mensual de productos agroalimentarios*. México. https://www.fec-chiapas.com.mx/sistema/biblioteca_digital/escenario-julio-productos-agroalimentarios-huevo-para-plato.pdf
- Shan, G., Li, W., Bao, S., Liu, J., Zhu, L., & Tan, W. (2023). Evaluating the aqueous phase obtained from hydrothermal carbonization of municipal sludge as possible liquid fertilizer for plant growth: An analysis of heavy metals and their molecular composition. *Journal of Cleaner Production*, 404, 136989. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136989>
- Tsarpali, M., Arora, N., Kuhn, J., & Philippidis, G. (2021). Beneficial use of the aqueous phase generated during hydrothermal carbonization of algae as nutrient source for algae cultivation. *Algal Research*, 60, 102485. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2021.102485>
- Wang, J., Xia, R., Xu, C., Yang, X., Li, Y., Li, Q., Zhang, T., Chen, Q., Zhou, H., & Zhang, Y. (2024). Characteristics of industrialized hydrothermal cracking solid organic fertilizer and its effects on fresh corn growth. *Waste Management*, 177, 243–251. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2024.02.005>