

Sustainable use of rice husk for value-added products

Robinson Ubau, 1 Dannette Bernice; Robinson Ubau, 2 Dannette Bernice; Vílchez Pérez, 3 Henry Javier

1 Dannette Bernice Robinson Ubau 1

d.urielt@yahoo.es

Universidad Nacional de Ingeniería, UNI., Nicaragua

2 Dannette Bernice Robinson Ubau 2

ing.drobinson@gmail.com

Universidad Nacional de Ingeniería, UNI., Nicaragua

3 Henry Javier Vílchez Pérez 3

jvil12p@gmail.com

Extraceite S.A., Nicaragua

Revista Científica de Ciencia y Tecnología El Higo

Universidad Nacional de Ingeniería, Nicaragua

ISSN-e: 2413-1911

Periodicidad: Anual

vol. 12, núm. 1, 2022

alba.diaz@norte.uni.edu.ni

Recepción: 23 Febrero 2022

Aprobación: 24 Mayo 2022

URL: <http://portal.amelica.org/ameli/journal/230/2304072004/>

DOI: <https://doi.org/10.5377/elhigo.v12i1.14516>

Resumen: En este artículo se hace una revisión exhaustiva de la conversión termoquímica de la cáscara de arroz (CA) en productos de valor añadido. La cáscara de arroz es un residuo orgánico que se produce en volúmenes considerables en Nicaragua, representando una fuente viable de productos de valor añadido a partir de procesos termoquímicos. Las propiedades de la CA y las condiciones de funcionamiento afectan la calidad y el rendimiento de los productos de bioaceite, biochar y en la elaboración de concreto. Se revisaron sistemáticamente las técnicas de conversión, como la gasificación, la pirólisis lenta y rápida, y la distribución de los productos. La bibliografía muestra que los catalizadores basados en níquel (Ni) demostraron una alta actividad en el craqueo de compuestos de alquitrán e hidrocarburos, mejoraron la calidad del gas y obtuvieron una alta producción de hidrógeno. Las cenizas de CA también se utilizan como material cementante alternativo en el sector de la construcción. El nivel óptimo de sustitución del cemento por cenizas de CA en el concreto es del 15-20%, y se observa una mayor resistencia a la compresión en el concreto con cenizas de CA que en el concreto de cemento convencional.

Palabras clave: Cáscara de arroz, Valorización, Pirólisis, Catálisis, Biochar, Bioaceite.

Abstract: This paper covers a comprehensive review of the thermochemical conversion of rice husk (RH) into value-added products. RH is an organic residue and is produced in large quantities in Nicaragua and appears to be a viable source for value-added products from thermochemical processes. The RH properties and operating conditions affect the quality and yield of the bio-oil, gaseous, alternative cementitious material and biochar products. The literature shows that the Ni-based catalysts demonstrated high activity towards cracking of tar compounds and hydrocarbons, upgraded gas quality, and yielded high hydrogen production. RH ash is also used as an alternative cementitious material in the construction sector. The optimum level of cement replacement with RH ash in concrete is 15–20%, and higher compressive strength is witnessed for RH ash used concrete than conventional cement concrete.

Keywords: Rice husk, Valorization; Pyrolysis; Catalysis; Biochar; Bio-oil.

INTRODUCCIÓN

De acuerdo con Liu et al. (2021) el arroz, es uno de los cereales más consumidos, muestra características regionales en su distribución geográfica. Se concentra principalmente en Asia, donde se produce más del 90% del arroz mundial (Vigneshwari et al., 2018). Hay más de 75 países que cultivan arroz, entre ellos Nicaragua.

De acuerdo con el plan nacional de producción 2020-2021 en Nicaragua durante el Ciclo 2020-2021, se registró una cosecha de 5.8 millones de quintales oro, 2% superior a la producción del Ciclo anterior, se espera un crecimiento de 2.4% para el Ciclo 2021-2022, significando una producción de 5.94 millones de quintales. Como subproducto inevitable de la industria del arroz, la cáscara de arroz tiene tradicionalmente una baja tasa de utilización, especialmente en Nicaragua. La práctica común de eliminación de estos residuos agrícolas es apilarlos y/o depositarlos en terrenos baldíos (Aprianti et al., 2015; Vigneshwari et al., 2018).

En algunos casos, se ha intentado recuperar la energía de la cáscara de arroz mediante la combustión y la gasificación, con la generación de calor, electricidad y biogás (Pode, 2016; Yaseri et al., 2019). Sin embargo, la combustión inadecuada de las partículas de carbono dentro de la cáscara de arroz provoca la liberación de gases tóxicos.

En consecuencia, los métodos actuales de eliminación de la cáscara de arroz no solo plantean problemas de seguridad y desperdicio de recursos, sino que también causan una grave contaminación del medio ambiente (Gu et al., 2020; Liang et al., 2019; Pode, 2016; Yaseri et al., 2019). Por lo tanto, la utilización de este recurso de cáscara de arroz de forma ecológica y sostenible se ha convertido en uno de los principales retos medioambientales que se deben plantear en Nicaragua.

Considerando que, en Nicaragua los problemas técnicos, ambientales y de salud pública que genera este residuo y otros, no se han tratado adecuadamente, pese a que existe un marco legal que obliga a los generadores de residuos a su gestión integral. Es así que, la Política Nacional sobre la Gestión Integral de Residuos Sólidos (2005), establece como precedente, que su objetivo general es lograr el manejo integral de los residuos sólidos, no peligrosos y peligrosos incorporando los aspectos técnicos, administrativos, económicos, ambientales y sociales dirigidos a evitar y minimizar la generación de los mismos, fomentando su valorización y reduciendo la cantidad de residuos destinados a disposición final.

La conversión de cascarilla de arroz en bioenergía y productos de valor agregado de cualquier transformación termoquímica (pirolisis, acidificación o combustión) desarrollada a partir de la CA dependen principalmente de las condiciones implementadas en el proceso particular tomando en consideración las características físico-químicas.

NOTAS DE AUTOR

- 1 Graduado en Ingeniería Civil y egresado como maestro en Ingeniería Ambiental, por la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI), Consultor en Ingeniería Sanitaria y Ambiental, con domicilio en Cedro Galán distrito III Managua, correo electrónico d.urielt@yahoo.es
- 2 Graduada en Ingeniería Ambiental por la Universidad Centroamericana (UCA) y egresado como maestro en Ingeniería Ambiental, por la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI), consultora en Gestión ambiental e hidrogeología, con domicilio en Km 10.5 carretera Masaya, correo electrónico ing.drobinson@gmail.com
- 3 Graduado en ingeniería civil y maestro en Ingeniería Ambiental, por la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI), estudios doctorales en el Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México; con una amplia experiencia en trabajos de investigación de aguas residuales Urbanas e industriales, así como, gestión de residuos sólidos urbanos y FORSU; docente de posgrado en maestría de ciencias del agua Centro para la Investigación en Recursos Acuáticos de Nicaragua CIRA/UNAN-Managua y Programa de Investigación, Estudios Nacionales y Servicios del Ambiente de la Universidad Nacional de Ingeniería en la maestría de Ingeniería Ambiental.

Considerando todo lo anterior, el objetivo de la revisión bibliográfica es hacer un análisis en el que se consideran diversos métodos de aprovechamiento de la cascarilla de arroz para Nicaragua tomando en consideración aquellos en los que se han tenido los mejores resultados como son: las transformaciones termoquímicas, combustión de la CA, gasificación, biochar y la elaboración de concreto.

DESARROLLO

Características y composición de la cascarilla de arroz (CA)

La composición de la CA depende de la fuente y la ubicación climática (Abu y Titilover, 2013). Los tres componentes principales de la CA son: hemicelulosa (14.04 – 29.3%), celulosa (28,6 - 41.52 %) y lignina (12.84 – 33.67%). La hemicelulosa está formada por sacáridos como la xilosa, manosa, glucosa, galactosa, entre otros; tiene una estructura amorfa aleatoria y es rica en ramificaciones. La hemicelulosa comienza a descomponerse en un rango de temperatura de 200-315°C y libera hidrocarburos oxigenados. Los hidrocarburos son principalmente metanol, ácidos acéticos, acetona furfural y algunas trazas de fenoles. En el pirólisis catalítico, los ácidos y las cetonas se convierten en hidrocarburos aromáticos, fenoles e hidrocarburos aromáticos policíclicos (Williams y Nugranad 2000; Guo et al., 2011; Ang et al., 2012).

En cambio, la celulosa está formada por una larga cadena polimérica de glucosa sin ramificaciones, y tiene una estructura fuerte y ordenada, por lo que la celulosa tiene mayor estabilidad térmica. La celulosa se descompone a una temperatura de 315-400 °C en levoglucosano durante el tratamiento térmico y se fragmenta además en compuestos lineales como furfural, acetona, cetonas y alcoholes (Williams y Nugranad 2000; Guo et al., 2011; Ang et al., 2012).

La lignina tiene una columna vertebral aromática con varias ramificaciones. La actividad de los enlaces químicos en la lignina cubre un amplio rango debido a que su degradación se produce desde la temperatura ambiente hasta los 900 °C. Sin embargo, las cadenas laterales presentes pueden ser convertidas por el proceso de pirólisis catalítica en otros compuestos (Williams y Nugranad 2000; Guo et al., 2011; Ang et al., 2012).

Análisis proximal y final biomasa

Los análisis proximales y de biomasa final proporcionan detalles clave sobre la composición, y dependiendo de la fuente de cultivo. El análisis proximal del arroz se realiza en un analizador termogravimétrico basado en los métodos estándar GB/T 212-2001, ASTM D3172-07a, GB/T 28731-2012. El análisis proximal muestra los porcentajes de humedad, volátiles, cenizas y carbono fijo (combustibles) presentes en la biomasa. Los contenidos de humedad, cenizas y combustibles de la CA varían en el rango de 4-13%, 12-23,5%, 71-78%, respectivamente (Shukla et al., 2022).

La humedad se libera cuando la biomasa se calienta a temperaturas superiores a 100-200 °C. La ceniza es la fase sólida inorgánica que queda tras la combustión completa. Los elementos inorgánicos consisten en óxidos de Na, K, Ca, Si, entre otros. De tal manera que desempeñan un papel crucial en la pirólisis. Estos elementos actúan como catalizadores de las reacciones de craqueo de los volátiles generados durante la pirólisis de la biomasa. Los combustibles consisten tanto en volátiles como en carbono fijo y se convierten en H₂, CO, CO₂, H₂O e hidrocarburos ligeros y pesados durante el tratamiento térmico (Heo et al., 2010; Reddy y Vinu 2018; Efomah y Gbabo 2015).

El análisis final se realiza en un analizador elemental. Da la composición elemental como C, H, N, S, O. Los contenidos de C, H, S, N y O en la CA varían 37-54%, 4-7%, 0,1-0,61%, 0,14-2,17% y 31-60%, respectivamente (Heo et al., 2010; Zhang y Chen 2018; Reddy y Vinu 2018; Efomah y Gbabo 2015). El contenido de oxígeno para la CA es excepcionalmente alto y afecta a la calidad del bioaceite producido, haciéndolo de naturaleza altamente ácida. El oxígeno está presente en grupos funcionales de compuestos orgánicos complejos y también en forma de óxidos de elementos inorgánicos.

Estado del arte sobre la cascarilla del arroz

La cáscara de arroz (CA) se diferencia de otras variedades de biomasa por su alto contenido en sílice y cenizas. Aunque la mayoría de los agricultores del norte de la India crían ganado, la CA no se considera apto para la alimentación del ganado debido a su alto contenido en sílice y su bajo contenido en nutrientes (Heo et al., 2010).

La CA tiene una baja densidad y necesita una gran superficie para ser dispuesta. Además, el coste logístico que supone el transporte del material y las dificultades que conlleva la recogida del material en el campo. De tal manera, que dificultan su uso efectivo en otras aplicaciones.

A pesar de que existen regulaciones gubernamentales para limitar la quema de rastrojos de arroz, los agricultores de la India en las zonas rurales continúan con esta práctica debido a las limitaciones financieras y a la falta de otras opciones e incentivos sostenibles y rentables, es así que en Nicaragua también se replican estas malas prácticas agrícolas (Reddy y Vinu, 2018). La porción de sílice en la CA crea un importante daño medioambiental en los cuerpos de agua debido a la baja biodegradabilidad de la sílice.

Actualmente, la CA se utiliza en la fabricación de tableros de fibra, en la producción de papel, como combustible para las calderas de generación de vapor y en la fertilización del suelo (Zhang et al., 2018). No obstante, la CA tiene un potencial de uso para producir productos sostenibles a partir de procesos termoquímicos.

La conversión de CA en bioenergía y productos de valor añadido ha sido atraída globalmente debido a los beneficios clave como las operaciones ambientalmente benignas y la utilización de recursos de biomasa. Entre las técnicas de conversión de la biomasa, la pirólisis acelerado atrajo mucha más atención debido a la producción de altos rendimientos de bioaceite. El bioaceite puede mejorarse en presencia de catalizadores para que cumplan las propiedades del combustible diésel (Shukla et al., 2022). Se ha revisado un gran número de artículos sobre la conversión de la biomasa en productos de valor añadido. Sin embargo, se dedican principalmente a una variedad de fuentes de biomasa.

Por lo tanto, Shukla et al., (2022) resume los principales resultados obtenidos para CA:

Akhter et al. (2012) revisó las aplicaciones de las cenizas de CA en el sector de la construcción y de las energías renovables. Los autores destacan la ceniza de cáscara de arroz (CCA) como aglutinante y aditivo en la estabilización del concreto y del suelo.

Trabold y Babbitt (2018) revisaron las aplicaciones de la CCA para el tratamiento de aguas residuales y descubrieron que la CCA puede sustituir al costoso carbón activado. La CCA tiene un alto contenido en sílice. Los autores también señalaron que la sílice del CCA tiene un mercado estable para las industrias del acero y la construcción.

Materazzi y Foscolo (2019) presentaron la extracción de sílice a partir de técnicas químicas y de combustión. Los autores señalaron que la sílice amorfa de la CCA tiene un enorme potencial para desarrollar diversos materiales cerámicos como refractarios, vidrio, cerámica de óxido y no óxido, aerogel de sílice y compuestos de SiO₂/C.

Otro estudio realizado por Materazzi (2017) revisó las ventajas y los retos técnicos de la elaboración de coproductos a partir de CA. El autor presentó las aplicaciones de los coproductos del arroz en la construcción, la producción de biocombustibles y los sectores de la alimentación animal y los fertilizantes. También discuten las aplicaciones del CCA en la adsorción, la producción de carbón y los materiales basados en sílice. Hasta donde se sabe, no existen revisiones sistemáticas, en particular sobre la valorización del CCA para la producción de productos de valor añadido mediante técnicas catalíticas y no catalíticas.

De acuerdo con Shukla et al. (2022) a principios de la década de 1970, Pitt (1981) ya había utilizado equipos especializados para la combustión de material orgánico como la cáscara de arroz para la obtención de cenizas. Fue una de las exploraciones más primitivas en la preparación de material silíceo, seguida de una gran cantidad de investigaciones que se centraron en la optimización de la CCA mediante diversas técnicas. La técnica del lecho fluido es una de ellas que utiliza la velocidad de fluidificación específica, el rango de granulometría (Rozainee et al., 2008), el tiempo de combustión (Nair et al., 2008) y la temperatura

(Chen et al., 2015) para que la muestra sea favorable para su uso como aditivo de cemento puzolánico. Sin embargo, los principales estudios existentes sobre técnicas de combustión han mostrado todos unos procesos de combustión bastante complicado, así como, una alta temperatura de combustión, que puede afectar negativamente a la estructura amorfa del SiO₂ dentro del CCA, así como, a las propiedades de cementación del CCA (Sasui et al., 2018). Se demanda urgentemente una técnica más práctica con baja temperatura de combustión para la preparación de CCA.

Conversión termoquímica de la cascarilla de arroz

Las conversiones termoquímicas se llevan a cabo a altas temperaturas (normalmente de 300 a 1100 °C) para valorizar la biomasa en biocombustibles, Biochar, gas de síntesis, entre otros (Trabold y Babbit 2018). Las técnicas termoquímicas son robustas y más flexibles a la hora de escalar que los procesos biológicos (Materazzi y Foscolo 2019; Materazzi 2017).

La gasificación y la pirólisis son las dos principales técnicas de conversión termoquímica, siendo otras la licuefacción y la combustión directa. Estas técnicas se llevan a cabo con y sin catalizadores para mejorar el rendimiento de los productos. Las condiciones de funcionamiento, como la temperatura, la velocidad de alimentación y el caudal de gasificación, también se ajustan para maximizar el rendimiento de los productos.

Combustión de la cascarilla de arroz

El análisis de proximidad muestra que la CA contiene un 75% de combustibles y un 15% de cenizas, considerándose una materia prima valiosa para generar bioenergía. Se puede quemar en cámaras de combustión de vórtice de ciclón y de lecho fluidizado.

El lecho fluidizado es una opción habitual en la combustión de biomasa. La CA, al ser no granular, escamoso y de forma cilíndrica, es un reto para ser fluidizado. Por lo general, la CA se fluidiza con la ayuda de partículas sólidas como la sílice y el carbón. Varios grupos de investigación han estado trabajando para mejorar la eficiencia de la combustión de la biomasa junto con las bajas emisiones.

Armesto et al. (2002) estudiaron el comportamiento de la combustión de CA en una cámara de combustión de lecho fluidizado burbujeante mezclado con arena, obteniendo una eficiencia del 97-98.4% para todas las ejecuciones. La eficiencia de la combustión aumenta con el incremento de la temperatura y disminuye con la velocidad de fluidización. El aumento de la temperatura conduce a una mejor combustión, ya que se trata de un proceso endotérmico, y un aumento de la velocidad de fluidización conduce a un aumento de la cantidad de partículas con contenido no quemado que salen de la cámara de combustión.

Del mismo modo, Fang et al. (2004) estudiaron la combustión de CA en un gasificador de lecho fluidizado circulante y lograron una eficiencia de combustión superior al 97%. La CA se ha utilizado para satisfacer las necesidades energéticas de los molinos de arroz y se ha empleado para proporcionar electricidad en zonas rurales. La combustión de la CA también produce cenizas de bajo contenido en carbono que contienen más del 90 % en peso de sílice.

El estudio de Rozainee et al. (2008) realizó la combustión de CA en un condensador de lecho fluidizado a escala de banco e informó de un 2.88% de carbono residual a una temperatura de 650 °C con una velocidad de fluidización mínima de 3.3 m/s.

En otro estudio realizado por Fernández et al. (2016) se caracterizó la ceniza de CA (CCA) producida a partir de tres técnicas de combustión, a saber, horno de parrilla móvil (CCA-HPM), lecho fluidizado (CCA-LF) y combustión en suspensión/entrada (CCA-S). La mayor superficie específica de las cenizas, de 39.27 m²/g, se obtuvo en el CCA-HPM, lo que implica su aplicación como adsorbente. El CCA-LF contenía el mayor porcentaje de SiO₂, un 96.71%, y la menor pérdida de peso en TGA, un 3.09%. Los estudios implican que el CCA-LF puede utilizarse como relleno en compuestos poliméricos y sintetizar compuestos cerámicos.

Gasificación de la Cascarilla de Arroz

La gasificación es un proceso termoquímico que convierte la biomasa en componentes gaseosos (Zhang et al., 2015). Los gasificadores se clasifican en lecho fijo, lecho fluidizado y lecho arrastrado. Los gasificadores de lecho fijo incluyen los de tiro descendente, tiro ascendente, tiro horizontal, entre otros.

Los gasificadores de lecho fluidizado incluyen el lecho fluidizado circular, lecho fluidizado de doble circulación, lecho fluidizado burbujeante, entre otros. En este proceso, la biomasa se somete a altas temperaturas en presencia de un agente de gasificación, normalmente aire o aire con vapor, para producir altos rendimientos de hidrógeno y un rico gas de síntesis. En la gasificación intervienen tres procesos principales, a saber, la pirólisis, la oxidación y la reducción.

En cuanto la biomasa entra en el gasificador, se somete a pirólisis. Los volátiles generados por la pirólisis y el carbón vegetal sufren reacciones de oxidación en presencia de oxígeno. El alquitrán, los hidrocarburos y el carbón vegetal son gasificados por el dióxido de carbono y el vapor de agua en la zona de reducción para producir gas combustible (Mathieu y Dubuisson, 2012; Gabra et al., 2001; Zhang et al., 2015).

La gasificación de la CA produce una mezcla compleja y volátil de aromáticos que van de mono a cíclicos pesados y aromáticos que contienen oxígeno, junto con un alto contenido de CO y H₂ que rara vez contiene hidrocarburos como el metano, el etileno (Lozano y Lozano, 2018). El mayor poder calorífico es uno de los parámetros más críticos que indican el mayor contenido energético de la biomasa. Los valores caloríficos más altos de la gasificación de CA varían entre 14,508 y 15,728 MJ/kg (Shen et al., 2012).

El bajo valor calorífico del gas disminuye con una alta relación de equivalencia (RE) debido a las bajas cantidades de H₂ y CO con un alto contenido de CO₂. La relación de equivalencia (RE) es un parámetro importante para mejorar el rendimiento del gas en la gasificación del aire. Se define como la relación aire - combustible, con respecto a la relación teórico aire - combustible. Una menor RE indica que se requiere un mínimo de aire para soportar las reacciones endotérmicas y mantener la temperatura del lecho del reactor que se necesita.

Los valores caloríficos del gas productor aumentan en la gasificación por vapor debido al alto contenido de H₂. La gasificación por vapor de CA es un proceso económico que da lugar a corrientes ricas en H₂ con altos valores caloríficos (Makwana et al., 2015; Chen 2015). La gasificación de CA también se lleva a cabo a varias presiones de 1- 4 bar y se ha encontrado que el rendimiento de gas y la eficiencia de conversión de carbono aumentan con el aumento de la temperatura, sin embargo, es menos significativo en el rendimiento de H₂ (Mahapatro & Mahanta 2020). Los aceites gaseosos condensables tienen una alta viscosidad y un bajo poder calorífico.

El uso de estos aceites provoca una grave obstrucción de las tuberías, de los motores y la desactivación del catalizador. La tabla 1 muestra las distintas configuraciones de gasificadores que se exploraron para la gasificación de CA.

Tabla 1. Gasificación CA y rendimiento de los productos

Tipo de reactor	Agente de gasificación	Temperatura (°C)	Condiciones de operación	Rendimientos	Referencias
Gasificador de lecho fijo de tiro descendente	Aire	600 – 850 °C	Velocidad de alimentación: 40–45 kg/h Muestra: CA y pellets Caudal de aire: 50–75 m ³ /h	CA: H ₂ 13,6%, CO 14,9%, CO ₂ 12,9% y CH ₄ 29%, Para los pellets: H ₂ 18,6%, CO 20,2%, CO ₂ 8,1% y CH ₄ 1,5%	Yoon et al. (2012)
Gasificador de lecho fijo a contracorriente y gasificador de lecho fluidizado	Aire	Lecho fijo: 600 °C Lecho fluidizado: 540–770 °C	Velocidad de alimentación: 10–25 kg/h Caudal de aire: 14–25 m ³ /h RE 0,12	Gasificador de lecho fijo: H ₂ 7,4%, CO 14,2%, CO ₂ 16,9%, CH ₄ 2,5%, O ₂ 0,4% y N ₂ 56% Lecho fluidizado: H ₂ 3,3%, CO 13,2%, CO ₂ 14,3%, 3,9% CH ₄ , O ₂ 1,63%, N ₂	Jiang et al., 2003
Gasificador autotérmico de lecho fluido burbujeante	Aire	600–800 °C	Velocidad de alimentación: 50 kg/h RE: 0,25–0,45	H ₂ 16,09%, CO 23,32%, CH ₄ 0,82%, CO ₂ 13,95%, N ₂ 46,23% a 750 °C	Karmakar et al., 2013
Gasificador de lecho fluidizado circulante	Aire	730–830 °C	Aire 730–830 °C Velocidad de alimentación 1500 kg /h Caudal de gas 1,2 m ³ /kg	H ₂ 7,7%, CO ₂ 15,3%, CO 16,1%, CH ₄ 4,1%, CnHm 1,2%, N ₂ 53,9% y O ₂ 1,6% a 830 °C	Yin et al., 2002
Gasificador de flujo arrastrado	Aire	800–1000 °C	Velocidad de alimentación 10 g/min Caudal de aire 0,042 – 0,072 m ³ /h	A 1000 °C, H ₂ 8,05%, CO 12,45%, CH ₄ 0,84, y CO ₂ 9,58, N ₂ 33,5, C ₂ H ₄ 0,12 (mol/kg de combustible)	Zhang et al., 2015
Gasificador de lecho fluidizado a escala piloto	Aire	720–855 °C	Velocidad de alimentación 30–32 kg/h Caudal de aire 43 m ³ /h	H ₂ 14%, CO 7%, CH ₄ 2,5%, CO ₂ 2%, O ₂ 0,916% a 790 °C	Makwana et al., 2019
Lecho fluidizado circulante a escala de laboratorio	Aire	484–640 °C	Presión: 1–4 bar	A una presión de 3 bar, H ₂ 6,54%, CO 15,19%, CH ₄ 2,98% y CO ₂ 13,63%	Mahapatro & Mahanta, 2020
Gasificador de lecho fluidizado	Aire + Vapor	600–900 °C	S/B= 0.1–1.5	H ₂ 48,8%, CO 27,5%, CO ₂ 19,5%, CH ₄ 4,2% a 750 °C	Loha et al., 2011
Reactor de tubo de gota	Nitrógeno + vapor	700–950 °C	Tiempo de mantenimiento: 12 min Caudal de vapor: 2,64 g/min	H ₂ 46,9%, CO 26,8%, CH ₄ 2,2% y CO ₂ 6,5% a 950 °C	Zhai et al., 2015
Gasificador de lecho fijo de dos etapas de tiro descendente	Primera etapa: N ₂ Segunda etapa: N ₂ + N ₂ + aire y N ₂ + oxígeno	Etapas I: 500 °C Etapas II: 700–900 °C	Tiempo de permanencia de la primera etapa: 900 s; Tiempo de permanencia de la segunda etapa tiempo de permanencia de la segunda etapa: 12–48 s Relación de transporte: 1:1	H ₂ 25,01%, CO 38,64%, CO ₂ 21,11%, CH ₄ 14,21%, y alquitrán 1,03%	Khonde & Chaurasia 2016

Fuente: Elaboración propia con base en datos de Shukla et al (2022)

Agentes de gasificación

Se utilizaron aire, nitrógeno, vapor, CO₂ o una mezcla de ellos como agentes gasificantes para la gasificación de CA se ha trabajado a 484 -1100 °C. Generalmente, la mayoría de los gasificadores funcionan con aire como agente oxidante debido a su fácil disponibilidad y a que el proceso es autosuficiente. Sin embargo, el gas tiene un bajo valor calorífico debido al alto contenido de N₂.

La selectividad de las reacciones de gasificación viene determinada por el agente gasificante empleado; también afecta a la composición del producto y al valor calorífico. Por ejemplo, la gasificación de la CA en presencia de aire, genera una composición de los productos gaseosos en un rango de 6.54 - 13.6% para el H₂, 7 - 23.75% para el CO, 12.9 - 21.11% para el CO₂, y 1.5-10.8% para el CH₄ (Sun et al., 2009; Ma et al., 2009; Zhang et al., 2015; Mahapatro y Mahanta 2020; Karmakar et al., 2013; Yin et al., 2002; Makwana et al., 2019; Loha et al., 2011; Ahmaruzzaman & Sharma 2005; Yoon et al., 2012; Zhao et al., 2009).

De la tabla 2 se desprende que la gasificación de CA produce altas cantidades de CO₂ debido a que las reacciones de oxidación fueron potenciadas por el exceso de aire. Sin embargo, el mayor contenido de CO₂ reduce el mayor poder calorífico. En los gasificadores de lecho fluidizado se observan mayores rendimientos de gas y menores rendimientos de cenizas y alquitrán debido al craqueo de los líquidos y a la mejora de las reacciones de carbonización a altas temperaturas (Ghani et al., 2012).

El uso de vapor da lugar a altos rendimientos de H₂ y a un mayor valor calorífico, lo que se traduce en un alto contenido de alquitrán. Al utilizar aire u oxígeno como medio de gasificación, las reacciones de oxidación parcial y las reacciones de combustión exotérmica generan la mayor parte del calor necesario para impulsar las reacciones. Pero con el aire como agente de gasificación, los valores caloríficos del gas son relativamente bajos debido a la dilución del nitrógeno (Yang y Chen 2015). Cuando se utiliza vapor con aire, éste actúa como moderador térmico y reactivo en la gasificación. El valor calorífico del gas producto aumenta en presencia de vapor (Bauen, 20004).

Por ejemplo, la mezcla de aire y vapor se utiliza como agente de gasificación en un lecho fluidizado y produce una corriente rica en hidrógeno a 800 °C (Loha et al.,2011). La presencia de vapor, las especies combustibles como CO, H₂, CH₄, y C₂H₆. Mientras que el contenido de H₂ aumenta con el vapor debido a la reacción de desplazamiento de gas de agua, el contenido de CO es máximo en una mezcla óptima de aire y vapor. El rango óptimo es un equilibrio entre las reacciones que producen CO. El uso de N₂ con vapor como agente de gasificación produce altos rendimientos de H₂ con H₂/CO es 1.75, y bajos rendimientos de CO₂.

Tabla 2. Configuración del reactor, catalizador y condiciones para la gasificación de CA

Tipo de gasificador	Catalizado	Temperatura	Condiciones	Productos sin catalizador	Productos con catalizador
Gasificador de lecho fijo de dos etapas.	Nano-NiO/ γ - Al ₂ O ₃	Primer lecho: 800 °C, Lecho catalítico: 750-900 °C	Agente de gasificación: Aire, S/ B = 1,33	Rendimiento de alquitrán: 32,5 g/Nm ³ Rendimiento de gas: 1,82 m ³ /kg; H ₂ 38,2%, CO 28,6%, CH ₄ 10,4%, CO ₂ 20,5% C ₂ - HCs- 2,1%	A 800 °C. Rendimiento de alquitrán: 0,14 g/Nm ³ Rendimiento de gas: 2,35 m ³ /kg Composición del gas: H ₂ 48,7%, CO 25,2%, CH ₄ 4,2%, CO ₂ 21,4%, y C ₂ - HCs- 0,3%
Gasificador de lecho fluidizado burbujeante	Dolomita	750-850 °C	Agente de gasificación: Aire Caudal de aire: 37 m ³ /h Velocidad de alimentación de la biomasa: 25-31,3 kg/h ER: 0,3-0,38	Rendimiento de gas: 2,13 m ³ /kg HHV del gas de producción: 952,8 kcal/m ³ a ER es 0,3	Rendimiento de gas: 2,18 m ³ /kg HHV del gas de producción: 990,3 kcal/m ³ a ER es 0,3
Reactor de flujo continuo de lecho fijo	Fe ₂ O ₃ , ZnO, CoO, NiO, CuO cargados en γ-Al ₂ O ₃	Gasificador: 500-800 °C	Alimentación: CA mezclado con un catalizador en una mezcla 1:2 p/p. Agente de gasificación: CO ₂	H ₂ 0,1892%, CO 5,6977%, CH ₄ 0,0589%	Para ZnO a 650 °C. H ₂ 1,0845%, CO 9,2746%, CH ₄ 0,1663%
Reactor de cuarzo de lecho fijo	Partículas de Nix Ca _{1-x} O x = 0-1	600 °C	Alimentación 3 g Catalizador: 0,3 g	Rendimiento de gas: 13,604%, Rendimiento del producto en H ₂ 0,00068, CO ₂ 0,00129, CH ₄ 0,00075, CO 0,00216 (mol/g CA)	Rendimiento de gas: 26,8%, H ₂ 0,00332, CO: 0,00306, CO ₂ 0,00285, CH ₄ 0,00076 (mol/ (g CA))
Gasificador de lecho fijo de tiro descendente	Ni en CA (NiCA)	800 °C	Agente de gasificación: Aire, Alimentación: 10 g Catalizador: 1-10 g	Rendimiento de gas: 30,08 % en peso Rendimiento individual (L/g)- CO 1,111, H ₂ 0,608, H ₂ 0,801, CO ₂ 0,293, CO ₂ 0,324, CH ₄ 0,125, C ₂ - HCs 0,075	Rendimiento de gas: 49,22 wt%, Rendimiento individual (L/g)- CO 1,111, H ₂ 0,801, CO ₂ 0,16, CH ₄ 0,094, C ₂ - HCs: 0,05
Gasificador de gota	Ni, Fe sobre carbón RH y cenizas	800 °C	Agente gasificador N ₂ 1 L/min, Alimentación de biomasa 10 g Masa del catalizador 5 g	Rendimiento de gas (L/g): 1,375 Rendimiento individual - H ₂ 0,303, CO 0,601, CO ₂ 0,332, CH ₄ 0,105, C ₂ HCs 0,034 (L/g)	Rendimiento de gas 2,12, H ₂ 0,49, CO 1,159, CO ₂ 0,24, CH ₄ 0,173, C ₂ HCs 0,058 (L/g) en Ni-Fe/ CCA
Gasificador de lecho fluido burbujeante	dolomita	850-950 °C	Biomasa 4 g/min, velocidad de alimentación del catalizador 0,8 g/min, ER) 0,1-0,18	Rendimiento de gas: 77,1 wt%, Composición del gas: H ₂ 31,1%, CO 33,3%, CO ₂ 35,4%, CH ₄ 5,5%, C ₂ H ₄ 3,7% a ER 0,14	Rendimiento de gas: 82,8 % en peso Composición del gas: H ₂ 35,7%, CO 37%, CO ₂ 23,1%, CH ₄ : 2,8%, C ₂ H ₄ : 1,4% (en peso) a ER 0,14 y 850 °C

Fuente: Shukla et al., 2022

Biochar

Se han elaborado diferentes métodos para mejorar el rendimiento del biochar, que es un producto valioso que se produce durante la pirólisis rápido de CA, y su rendimiento disminuye al aumentar la temperatura. Sin embargo, el carbón producido a bajas temperaturas tiene un alto contenido en carbono. A medida que la temperatura aumenta, los diferentes componentes de la CA comienzan a descomponerse, y el rendimiento del carbón vegetal disminuye. El carbón con bajo contenido en carbono se ve favorecido a temperaturas superiores a 500 °C.

Gautam et al. (2022) encontró que el rendimiento del carbón disminuye continuamente con la temperatura, desde el 45.72% a 450 °C hasta el 37.43% a 650 °C. A temperaturas más altas, la descomposición secundaria del carbón aumentó, lo que condujo a un menor rendimiento. Se ha informado de altos rendimientos de carbón para tamaños de partícula más pequeños debido a las bajas resistencias de transferencia de calor y masa. Por ejemplo, el rendimiento del biochar disminuyó significativamente del 55.94% al 44.48%, con el tamaño de las partículas de 0.50 mm a 0.125 mm.

Biochar para la recuperación de suelos

El biochar puede mejorar el carbono orgánico, que ayuda a retener la humedad y los nutrientes y a disminuir la densidad aparente del suelo y a aumentar su pH (Reichenaur et al., 2009; Ghorbani et al., 2019; Feng et al., 2017). El Biochar contiene aproximadamente un 20% de sílice que también ayuda al crecimiento del césped. La calidad del suelo ha mostrado una mayor conductividad eléctrica que el suelo normal después del tsunami que azotó el Océano Índico en 2004. La remediación del suelo afectado por el tsunami se trató con biochar CA y se encontró una mejora en el rendimiento del grano en comparación con el suelo no tratado.

En Indonesia, el suelo sulfatado ácido fue tratado con carbón vegetal y se encontró que el aumento de la adsorción de cationes dio como resultado una mejora en el crecimiento del arroz en cuanto a la altura de la planta, el número de tallos y el peso seco.

Otro estudio realizado por Ghorbani et al. (2019) utilizó el Biochar CA como remediación del suelo y encontró una mejora en la agregación del suelo y una reducción en la lixiviación de nitratos. Eduah et al. (2020) produjeron el biochar a varias temperaturas de pirólisis y encontraron que el carbón producido a 300 - 450 °C tenía una baja sorción de fósforo y aumentaba la biodisponibilidad del fósforo para los suelos ácidos y daba lugar a un gran contenido de carbono orgánico.

El Biochar como material adsorbente

La aplicación más común del Biochar obtenido a partir de CA o de cualquier biomasa, es como adsorbente para la eliminación de una variedad de impurezas metálicas y compuestos orgánicos.

El Biochar de CA se explora para la adsorción de cationes y tintes aniónicos, cromo, litio, arsénico y metales de plomo de las corrientes de agua residual (Khalil et al., 2020; Saravanan et al., 2021; Islam et al., 2021; Kamran et al., 2020; Liu et al., 2021).

Un estudio reciente de Zhuang et al. (2022) exploró la adsorción de compuestos orgánicos volátiles como la acetona y el tolueno en el Biochar de CA y mostró una mayor capacidad de adsorción.

El Biochar CA también se ha explorado para la adsorción de dióxido de carbono (Jia et al., 2020; Freire 2020). Por ejemplo, Freire et al. (2020) prepararon los geopolímeros con CA para capturar el CO₂ y encontraron que el carbón CA activado con NaOH tenía más capacidad de adsorción de CO₂.

Un estudio reciente muestra que las cenizas de CA pueden ser utilizadas para preparar una plantilla de ZSM-5 libre para la adsorción de CO₂ y encontró que la plantilla de ZSM-5 libre de CA tenía la mayor capacidad de adsorción de CO₂ a 273 K y 15 bar.

Otro estudio realizado por Ahmad et al. (2020) produjo Biochar de CA mediante la técnica de pirólisis lenta y estudió sus propiedades de adsorción contra una solución de colorante azul de metileno en un reactor continuo de lecho empacado (PBCR). La capacidad de adsorción del Biochar se encontró en el rango de 71.0 - 99 %. Ahmaruzzaman et al. (2005) llevaron a cabo estudios por lotes para eliminar el fenol de las aguas

residuales utilizando carbón vegetal como adsorbente y encontraron que la constante de Langmuir de 7,9 mg/g de fenol.

Se han llevado a cabo trabajos similares para eliminar múltiples impurezas utilizando Biochar de CA como adsorbente (Shen & Fu, 2018; Liu et al., 2011; Zhai et al., 2016; Li & Xiao 2019; Fu et al., 2019; Shen & Zhang 2019).

Aparte de las aplicaciones de adsorción, también se explora la gasificación del Biochar para la producción de hidrógeno. Los minerales inorgánicos actúan como catalizadores durante el reformado con vapor del Biochar. También se utiliza como material de soporte del catalizador para diversas aplicaciones (Dong et al., 2020; Shen et al., 2014).

Elaboración de concreto

De acuerdo con Shukla et al (2022) la ceniza de cáscara de arroz también se utiliza ampliamente como material cementante alternativo en el concreto. La ceniza de arroz se ha clasificado como un material puzolánico altamente reactivo. Contribuye a mejorar la resistencia a la compresión del concreto mediante dos mecanismos: la reacción puzolánica y el efecto de relleno (Siddika et al., 2021).

Las propiedades esenciales de los materiales cementantes suplementarios (MCS) son tener una capacidad de adherencia compatible con los áridos (comparable a la del cemento) y mostrar un buen comportamiento puzolánico (Shukla et al., 2022; Al-Kutti et al., 2019).

La actividad de la CCA comienza cuando se mezcla con el agua y el cemento y, posteriormente, altera el comportamiento de hidratación y fraguado. El tiempo de fraguado del cemento mezclado con CCA aumenta con el contenido de CCA debido a la alta dilución. El tiempo de fraguado final del cemento portland ordinario (CPO) es de 300 min, mientras que se requieren 232 min para el CPO con 30% de CCA.

La reducción lineal del tiempo de fraguado final podría deberse a la aceleración de la reacción de hidratación y el endurecimiento de la pasta debido a la presencia de CCA. La hidratación de la pasta de cemento mezclada con CCA. Por lo que, de acuerdo con Nguyen (2011) explicó que el primer pico de evolución del calor del CPO mezclado con CCA y del CPO puro es probable que sea al mismo tiempo. Sin embargo, el periodo de inducción es más corto en el aglomerante mezclado con CCA debido a la nucleación heterogénea (Vieira et al., 2020).

La ceniza de cáscara de arroz (CCA) ha atraído una atención significativa hacia el uso de MCS sostenibles y respetuosos con el medio ambiente en el concreto (El-Sayed y El-Samni, 2006, Meddah et al., 2020). La CCA contiene alrededor del 90% de sílice y muestra excelentes propiedades puzolánicas debido a su alta área superficial, su naturaleza altamente amorfa y su compatibilidad con el cemento-concreto (Al-Kutti et al., 2019, Rodríguez de Sensale, 2010, Sandhu y Siddique, 2017, Sujivorakul et al., 2011).

La CCA contiene sílice no cristalina y CaO, por lo que puede utilizarse eficazmente como MCS en el concreto (Gomaa et al., 2017, Siddika et al., 2019). La utilización de CCA en el concreto proporciona una mejora de las propiedades de resistencia y durabilidad, una reducción del coste de los materiales debido al ahorro de cemento y beneficios ambientales relacionados con la eliminación de los materiales de desecho (Karthik et al., 2017). En investigaciones recientes, la CCA se ha utilizado en la mezcla de concreto como reemplazo de hasta el 100% del CPO. El rendimiento del concreto con CCA depende del nivel de sustitución del CPO, del tamaño de las partículas del CCA, de las propiedades químicas del CCA independientemente del árido y de la relación agua/cemento de la mezcla de concreto. Sin embargo, para el desarrollo exitoso de la resistencia, se recomienda alrededor del 10-25% de sustitución de CPO (Sandhu y Siddique, 2017, Siddika et al., 2018).

Resistencia a la compresión

La resistencia a la compresión del concreto es proporcional a su densidad (Wille et al., 2012, Yang et al., 2010). Además, depende de la proporción de la mezcla, de las propiedades de los áridos y del cemento, la relación agua-cemento, duración del curado y del nivel de sustitución de la CCA. Independientemente de los otros factores, tanto la finura como el contenido de CCA son los principales parámetros que influyen en

el desarrollo de la resistencia en el concreto, ya que estos tienen influencia en la reactividad puzolánica y la hidratación del ligante.

La granulometría media recomendada de la CCA para su uso en concretos de altas prestaciones oscila entre 3.6 y 9 μm , que debe mezclarse con el cemento Portland (Mosaberpanah y Umar, 2019, Nguyen, 2011). Con el aumento de la finura y el contenido de CCA, hay un aumento típico en la resistencia a la compresión del concreto, y esto se produce por el efecto de relleno físico, que es más que la reactividad puzolánica en la edad temprana de curado (<14 días) (Khan et al., 2012, Rodríguez de Sensale, 2006, Van Tuan et al., 2011). En la etapa posterior del curado, la puzolanicidad aumenta significativamente con el aumento de la cantidad de productos de hidratos de calcio (HC) disponibles en el concreto. El refinamiento del tamaño de los poros también se produce en el concreto debido a la puzolanicidad y al efecto de relleno de la CCA. Al mismo tiempo, la resistencia a la compresión aumenta a medida que el tamaño de los poros se reduce (Yin et al., 2006).

El contenido óptimo de CCA varía en función de las características de la CCA y de los tipos de ligantes. Normalmente, se considera que el nivel óptimo de sustitución del cemento está en torno al 20-30% para la CCA (El-Dakroury y Gasser, 2008, Jamil et al., 2013, Muthadhi y Kothandaraman, 2013). Se observaron incrementos en la resistencia de aproximadamente 25%, 33% y 36% (para 7, 28 y 56 días respectivamente) con los incrementos en el contenido de CCA (hasta el 15% de sustitución de cemento), en comparación con la mezcla de control. Además, el concreto con un 50-60% de CCA fino (para la sustitución del cemento) mostró una resistencia comparable a la del concreto simple.

Al aumentar el periodo de curado, se formaron más productos de hidratación y aumentó la resistencia. Sin embargo, cuando la reacción puzolánica y la finalización de la hidratación se reducen (debido a cualquier causa aleatoria), el desarrollo de la resistencia en el concreto también disminuye (Chopra et al., 2015). La variación de la resistencia depende de la edad de curado y, por lo tanto, puede ser mayor a una edad más tardía, es decir, 10% de CCA a 3 días, 15% de CCA a 7 días y 10-20% de CCA a 28 días (Le et al., 2014). No obstante, más allá del nivel óptimo de sustitución, la resistencia del concreto comenzó a disminuir con la cantidad de CCA. Una variación típica de la resistencia a la compresión del concreto con CCA puede verse en la Tabla 3. Obsérvese que la proporción de la mezcla y otros parámetros fueron diferentes para cada experimento. Por ejemplo, utilizando diferentes niveles de sustitución de áridos clasificados en valores porcentuales de 5-10-14-18 en lugar de áridos convencionales, la resistencia en el concreto mezclado con CCA puede incrementarse entre un 4 y un 14% (Rumman et al., 2020).

Tabla 3. Resistencia a la compresión del concreto con distintos contenidos de CCA a diferentes edades

Edad de curado (días)	Resistencia a la compresión (N/mm ²)							Referencias
	Nivel de sustitución del cemento por CCA (% en peso de cemento)							
	0%	5%	10%	15%	20%	25%	30%	
7-200	9.4-22	8.5-40	7.2-27.2	1.2-24.2	-	-	-	Umasabor and Okovido, 2018
28	54	55.4	62.3	60.3	60.2	-	-	Le et al., 2014
7-28	27.22 -	31.32 -	30.45 -	31.52 -	31.64 -	33.09 -	33.53 -	Saraswathy and Song, 2007
	36.45	36.49	37.43	37.38	37.71	39.55	37.80	

CONCLUSIONES

La literatura mostró que la valorización de la cascarilla de arroz tiene un enorme potencial en Nicaragua para producir productos químicos de valor añadido como hidrógeno, gas de síntesis, biochar, producción de concreto, así como, combustibles para el transporte y aromáticos. Los productos de valor añadido y sus propiedades dependen de los métodos de conversión que sean adoptados y de sus parámetros de control que se establezcan.

La gasificación de la cáscara de arroz produce hidrógeno o syngas y altos rendimientos de H₂ cuando se utiliza vapor como agente gasificador. El rendimiento de gas aumenta con la temperatura de gasificación debido a las altas velocidades de reacción se han estudiado varios catalizadores, como el Ni, Fe, Co y Zn, para aumentar el rendimiento del hidrógeno o del gas de síntesis. La gasificación seguida del reformado catalítico se lleva a cabo en un reactor de dos etapas.

El pretratamiento de la cáscara de arroz con ácidos mejora los rendimientos de los productos deseados, como el bioaceite, Biochar, gas pirólítico o incluso una combinación. El catalizador desempeña un papel esencial en la mejora de los vapores generados por la pirólisis de la cáscara de arroz. Para la pirólisis catalítica, los catalizadores más utilizados son el níquel, el cobre, el cobalto, el manganeso, el hierro, sobre soportes altamente porosos como el SiO₂, Al₂O₃ y las zeolitas. La pirólisis rápida de la cáscara de arroz es uno de los procesos sostenibles para convertirla en bioaceite. Sin embargo, la calidad del bioaceite es muy inferior a la de los combustibles convencionales debido a su inestabilidad térmica, su naturaleza ácida y su bajo poder calorífico. El bioaceite puede mejorarse para convertirlo en combustible para el transporte en catalizadores basados en zeolitas, y el H-ZSM-5 se explora ampliamente para mejorar el aceite pirólítico.

El Biochar producido a partir de la pirólisis rápida de la cáscara de arroz, rico en minerales inorgánicos y en contenido de carbono, ayuda a retener la humedad y los nutrientes, disminuye la densidad aparente del suelo y aumenta el pH del mismo, lo que mejora su recuperación.

El Biochar de cáscara de arroz también se explora para los carbones de adsorción de volátiles y para eliminar los compuestos metálicos de las corrientes de aguas residuales.

La ceniza de cascarilla de arroz también encuentra una amplia aplicación en el sector de la construcción. El concreto de cemento mezclado con ceniza de arroz tiene una mayor resistencia a la compresión que el concreto de cemento convencional. Además, la incorporación de ceniza de cáscara de arroz mejora la durabilidad del concreto a base de cáscara de arroz. Además, la temperatura de calcinación influye notablemente en el rendimiento de la pasta de cemento mezclada con CCA.

Por último, la conversión de la cascarilla de arroz en bioenergía y productos de valor añadido tiene un enorme potencial de atracción a nivel mundial debido a los beneficios clave, como las operaciones benignas para el medio ambiente y la utilización de la abundante cascarilla de arroz, por lo que se debería de hacer un análisis de aplicabilidad de estas tecnologías en Nicaragua.

Los productos derivados de la valorización de la cascarilla de arroz también podrían mejorar la economía rural y la generación de empleo, al tiempo que reducirían la dependencia del país de los combustibles fósiles importados. Además, en el estudio se presenta un marco para la utilización sostenible de la cascarilla de arroz en los sectores químico y del cemento de Nicaragua.

REFERENCIAS

- A.D. and E.O.A. Madeleine, M. Bergqvist, K. Samuel Wardh (2008). A techno-economic assessment of rice husk-based power generation in the Mekong River Delta of Vietnam Madeleine. *Int. J. ENERGY Res*, 32(12) <https://doi.org/1136-1150>, 10.1002/er
- Abu Bakar M.S., Titiloye J.O. (2013). Catalytic pyrolysis of rice husk for bio-oil production. *Anal. Appl. Pyrolysis*, (103), pp. 362-368, <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2012.09.005>

- Ang T.N., Ngoh G.C., Chua A.S.M., Lee M.G. (2012). Elucidation of the effect of ionic liquid pretreatment on rice husk via structural analyses *Biotechnol. Biofuels*, (5), 1-10, <https://doi.org/10.1186/1754-6834-5-67>
- Armesto L., Bahillo A., Veijonen K., Cabanillas A., Otero J. (2002). Combustion behaviour of rice husk in a bubbling fluidised bed. *Biomass Bioenergy*, (23), 171-179, [https://doi.org/10.1016/S0961-9534\(02\)00046-6](https://doi.org/10.1016/S0961-9534(02)00046-6)
- Bauen, A. (2004). Biomass Gasification. *Encycl. Energy, Elsevier*, 213-221, <https://doi.org/10.1016/B0-12-176480-X/00356-9>.
- Chen Z.M., Zhang L. (2015). Catalyst and process parameters for the gasification of rice husk with pure CO₂ to produce CO. *Fuel Process. Technol.*, (133), 227-231, <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2015.01.027>
- Chungsangunsit T., Gheewala S.H., Patumsawad S. (2009). Emiss. Assess. Rice Husk Combust. *Power Prod.*, 3, 625-630
- Dong Fan X., Jian Wu Y., Tu R., Sun Y., Chen Jiang E., Wei Xu X. (2020). Hydrodeoxygenation of guaiacol via rice husk char supported Ni based catalysts: The influence of char supports. *Renew. Energy*, (157), 1035-1045, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.05.045>
- Efomah A.N., Gbabo A. (2015). The physical, proximate and ultimate analysis of rice husk briquettes produced from a vibratory block mould briquetting machine. *Int. J. Innov. Sci. Eng. Technol.* (2), 814-822.
- Feng Y., Meng J., Xiang Q., Ming Zhang W., Yi Cheng X., Fu W. (2017). Effects of straw and biochar addition on soil nitrogen, carbon, and super rice yield in cold waterlogged paddy soils of North China. *J. Integr. Agric.*, (16), pp. 1064-1074, [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(16\)61578-2](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(16)61578-2)
- Fernandes I.J., Calheiro D., Kieling A.G., Moraes C.A.M., Rocha T.L.A.C., Brehm F.A. (2016). Characterization of rice husk ash produced using different biomass combustion techniques for energy. *Fuel*, (165), 351-359, <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.10.086>
- Freire A.L., Moura-Nickel, Scaratti G., De Rossi A., Araújo M.H., De Noni Júnior A. (2020). Geopolymers produced with fly ash and rice husk ash applied to CO₂ capture. *J. Clean. Prod.* (273), 10.1016/j.jclepro.2020.122917
- Gabra M., Pettersson E., Backman R., Kjellström B. (2001). Evaluation of cyclone gasifier performance for gasification of sugar cane residue - Part 1: Gasification of bagasse *Biomass. Bioenergy*, (21), 351-369, [https://doi.org/10.1016/S0961-9534\(01\)00043-5](https://doi.org/10.1016/S0961-9534(01)00043-5)
- Gasification and power generation characteristics of rice husk and rice husk pellet using a downdraft fixed-bed gasifier (2017). *Renew. Energy*, (42), 163-167. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.08.028>
- Gasification of Waste Derived Fuels in Fluidized Beds (2017): Fundamental Aspects and Industrial Challenges, *Springer, Cham*, 19-63, https://doi.org/10.1007/978-3-319-46870-9_2.
- Gautam N., Chaurasia A. (2020). Study on kinetics and bio-oil production from rice husk, rice straw, bamboo, sugarcane bagasse and neem bark in a fixed-bed pyrolysis process, *Energy*, (190), 116434, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116434>
- Ghani A.T.W.A.W.K., Moghadam R.A., Salleh M.A.M. (2012). Gasification performance of rice husk in fluidized bed reactor: a hydrogen-rich production. *J. Energy Environ.* (4), 7-11.
- Ghorbani M., Asadi H., Abrishamkesh S. (2019). Effects of rice husk biochar on selected soil properties and nitrate leaching in loamy sand and clay soil. *Int. Soil Water Conserv. Res.*, (7), 258-265, <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2019.05.005>
- Guo X., Wang S., Wang Q., Guo Z. (2011). Luo. Properties of bio-oil from fast pyrolysis of rice husk *Chin. J. Chem. Eng.*, (19), 116-121, [https://doi.org/10.1016/S1004-9541\(09\)60186-5](https://doi.org/10.1016/S1004-9541(09)60186-5)
- H.S. Heo, H.J. Park, J.I. Dong, S.H. Park, S. Kim, D.J. Suh, (2010). Fast pyrolysis of rice husk under different reaction conditions. *J. Ind. Eng. Chem.*, (16), 27-31, <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2010.01.026>
- Jia H., Du T., Fang X., Gong H., Qiu Z., Li Y., et al. Synthesis of Template-Free ZSM-5 from Rice Husk Ash at Low Temperatures and Its CO₂ Adsorption Performance (2021). *ACS Omega*, (6), <https://doi.org/10.1021/acsomega.0c05842>
- Jiang H., Zhu X., Guo Q., Zhu Q. (2003). Gasification of rice husk in a fluidized-bed gasifier without inert additives. *Ind. Eng. Chem. Res.*, (42), 5745-5750, <https://doi.org/10.1021/ic0304659>.

- Kamran U., Park S.J. (2020). MnO₂-decorated biochar composites of coconut shell and rice husk: An efficient lithium ions adsorption-desorption performance in aqueous media. *Chemosphere*, (260), 127500, <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127500>
- Karmakar M.K., Mandal J., Haldar S., Chatterjee P.K. (2013). Investigation of fuel gas generation in a pilot scale fluidized bed autothermal gasifier using rice husk. *Fuel*, (111), 584-591, <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.03.045>
- Khalil U., Bilal Shakoor M., Ali S., Rizwan S., Nasser Alyemeni S., Wijaya L. (2020). Adsorption-reduction performance of tea waste and rice husk biochars for Cr(VI) elimination from wastewater. *J. Saudi Chem. Soc.*, 24, pp. 799-810, <https://doi.org/10.1016/j.jscs.2020.07.001>
- Khonde R., Chaurasia A. (2016). Rice husk gasification in a two-stage fixed-bed gasifier: production of hydrogen rich syngas and kinetics. *Int. J. Hydrog. Energy*, (41), 8793-8802, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.03.138>
- Li J., Liu J., Liao S., Yan R. (2010). Hydrogen-rich gas production by air-steam gasification of rice husk using supported nano-NiO/γ-Al₂O₃ catalyst. *Int. J. Hydrog. Energy*, (35), 7399-7404, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.04.108>
- Li M., Xiao R. (2019). Preparation of a dual pore structure activated carbon from rice husk char as an adsorbent for CO₂ capture. *Fuel Process. Technol.*, (186), 35-39, <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2018.12.015>
- Liu L., Huang Y., Cao J., Hu H., Dong L., Zha J. (2021). Qualitative and relative distribution of Pb²⁺ adsorption mechanisms by biochars produced from a fluidized bed pyrolysis system under mild air oxidation conditions. *J. Mol. Liq.*, (323), <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2020.114600>
- Loha C., Chattopadhyay H., Chatterjee P.K. (2011). Thermodynamic analysis of hydrogen rich synthetic gas generation from fluidized bed gasification of rice husk. *Energy*, (36), 4063-4071. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.04.042>
- Lozano F.J., Lozano R. (2015). Assessing the potential sustainability benefits of agricultural residues: Biomass conversion to syngas for energy generation or to chemicals production. *Fuel*, 158, 42-(49), <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.05.019>
- M. Ahmaruzzaman, D.K. Sharma (2005). Adsorption of phenols from wastewater. *J. Colloid Interface Sci.*, (287), 14-24, <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2005.01.075>
- Madhiyanon T., Sathitruangsak P., Soponronnarit S. (2010). Combustion characteristics of rice-husk in a short-combustion-chamber fluidized-bed combustor (SFBC). *Appl. Therm. Eng.*, (30), 347-353, <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2009.09.014>
- Mahapatro, A. Mahanta, P. (2020). Gasification studies of low-grade Indian coal and biomass in a lab-scale pressurized circulating fluidized bed. *Renew. Energy*, (150), 1151-1159, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.10.038>
- Makwana J.P., Joshi A.K., Athawale G., Singh D., Mohanty P. (2015). Air gasification of rice husk in bubbling fluidized bed reactor with bed heating by conventional charcoal. *Bioresour. Technol.*, (178), 45-52, <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.09.111>
- Makwana J.P., Pandey J., Mishra G. (2019). Improving the properties of producer gas using high temperature gasification of rice husk in a pilot scale fluidized bed gasifier (FBG). *Renew. Energy*, (130), 943-951, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.07.011>
- Materazzi M. (2017). Gasification of Waste Derived Fuels in Fluidized Beds: Fundamental Aspects and Industrial Challenges, *Springer Cham* (250), 19-63, https://doi.org/10.1007/978-3-319-46870-9_2.
- Materazzi M., Foscolo P.U. (2019). The role of waste and renewable gas to decarbonize the energy sector. *Substit. Nat. Gas from Waste Tech. Assess. Ind. Appl. Biochem. Thermochem. Process* (280), (1-19), <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815554-7.00001-5>
- Mathieu P., Dubuisson R. (2002). Performance analysis of a biomass gasifier. *Energy Convers. Manag.*, 1291-1299.
- Rajasekhar Reddy B., Vinu R. (2018). Microwave-assisted co-pyrolysis of high ash Indian coal and rice husk: Product characterization and evidence of interactions. *Fuel Processing Technology*, (178), 41-52. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2018.04.018>.

- Reddy B.R., Vinu R. (2018). Microwave-assisted co-pyrolysis of high ash Indian coal and rice husk: product characterization and evidence of interactions. *Fuel Process. Technol.* (178), 41-52. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2018.04.018>
- Reichenauer T.G., Panamulla S., Subasinghe S., Wimmer B. (2009). Soil amendments and cultivar selection can improve rice yield in salt-influenced (tsunami-affected) paddy fields in Sri Lanka. *Environ. Geochem. Health*, (31), 573-579, <https://doi.org/10.1007/s10653-009-9253-6>.
- Rozainee M., Ngo S.P., Salema A.A., Tan K.G., Ariffin M., Zainura Z.N. (2008). Effect of fluidising velocity on the combustion of rice husk in a bench-scale fluidised bed combustor for the production of amorphous rice husk ash. *Bioresour. Technol.*, (99), 703-713, <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.01.049>
- S. Zhang, T. Chen, Y. Xiong (2018). Effect of washing pretreatment with aqueous fraction of bio-oil on pyrolysis characteristic of rice husk and preparation of amorphous silica. *Waste Biomass Valoriz.*, (9), 861-869, <https://doi.org/10.1007/s12649-017-9845-9>
- Saravanan P., Josephraj J., Thillainayagam B.P., Ravindiran G. (2021). Evaluation of the adsorptive removal of cationic dyes by greening biochar derived from agricultural bio-waste of rice husk. *Biomass Convers. Biorefinery*, <https://doi.org/10.1007/s13399-021-01415-y>
- Shen J., Zhu S., Liu X., Zhang H., Tan J. (2012). Measurement of heating value of rice husk by using oxygen bomb calorimeter with benzoic acid as combustion adjuvant. *Energy Procedia*, (17), pp. 208-213, <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2012.02.085>
- Shen Y., Fu Y. (2018). KOH-activated rice husk char via CO₂ pyrolysis for phenol adsorption, *Mater. Today Energy*, (9), 397-405, <https://doi.org/10.1016/j.mtener.2018.07.005>
- Shen Y., Zhang N. (2019). Facile synthesis of porous carbons from silica-rich rice husk char for volatile organic compounds (VOCs) sorption. *Bioresour. Technol.*, (282), 294-300, <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.03.025>.
- Shen Y., Zhao P., Shao Q., Ma D., Takahashi F., Yoshikawa K. (2014). In-situ catalytic conversion of tar using rice husk char-supported nickel-iron catalysts for biomass pyrolysis/gasification. *Appl. Catal. B Environ.*, 140-151, <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2014.01.032>
- Shen Y., Zhao P., Shao Q., Ma D., Takahashi F., Yoshikawa K. (2014). In-situ catalytic conversion of tar using rice husk char-supported nickel-iron catalysts for biomass pyrolysis/gasification. *Appl. Catal. B Environ.*, 140-151, <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2014.01.032>
- Suryaprakash Shailendrakumar Shukla, Ramakrishna Chava, Srinivas Appari, Bahurudeen A, Bhanu Vardhan Reddy Kuncharam, Sustainable use of rice husk for the cleaner production of value-added products, *Environmental Chemical Engineering*, (10), 241-252 <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.106899>.
- T. Islam, C. Peng, I. Ali, J. Li, Z.M. Khan, M. Sultan (2021). Synthesis of Rice Husk-Derived Magnetic Biochar through Liquefaction to Adsorb Anionic and Cationic Dyes from Aqueous Solutions, *Arab. J. Sci. Eng.*, (46), 233-246, <https://doi.org/10.1007/s13369-020-04537-z>
- Trabold T.A., Babbitt C.W. (2018). Sustainable food waste-to-energy systems. *Elsevier*, <https://doi.org/10.1016/C2016-0-00715-5>
- Tsai W.T., Lee M.K., Chang Y.M. (2007). Fast pyrolysis of rice husk: product yields and compositions. *Bioresour. Technol.*, (98), pp. 22-28, <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2005.12.005>
- W.J. Liu, F.X. Zeng, H. Jiang, X.S. Zhang (2011). Preparation of high adsorption capacity bio-chars from waste biomass. *Bioresour. Technol.*, (102), 8247-8252, <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.06.014>
- Williams P.T., Nugranad N. (2000). Comparison of products from the pyrolysis and catalytic pyrolysis of rice husks, *Energy*, (25), 493-513, [https://doi.org/10.1016/S0360-5442\(00\)00009-8](https://doi.org/10.1016/S0360-5442(00)00009-8)
- Xia Z., Song X., Wang W. (2020). Reduction mechanism study on sorption enhanced chemical looping gasification of biomass waste rice husk for H₂ production over multi-functional Ni_xCa_{1-x}O particles. *Fuel Process. Technol.*, 209, Article 106524, <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2020.106524>

- Y. Fu, Y. Shen, Z. Zhang, X. Ge, M. Chen (2019). Activated bio-chars derived from rice husk via one- and two-step KOH-catalyzed pyrolysis for phenol adsorption. *Sci. Total Environ.*, (646), 1567-1577, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.07.423>
- Y. Shen, K. Yoshikawa (2014). Tar conversion and vapor upgrading via in situ catalysis using silica-based nickel nanoparticles embedded in rice husk char for biomass pyrolysis/gasification. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 53, pp. 10929-10942, <https://doi.org/10.1021/ie501843y>
- Yang H., Chen H. (2015). Biomass gasification for synthetic liquid fuel production. *Gasif. Synth. Fuel Prod. Fundam. Process. Appl., Elsevier Ltd*, 241-275, <https://doi.org/10.1016/B978-0-85709-802-3.00011-4>
- Yin X.L., Wu C.Z., Zheng S.P., Chen Y. (2002). Design and operation of a CFB gasification and power generation system for rice husk. *Biomass Bioenergy*, (23), 181-187, [https://doi.org/10.1016/S0961-9534\(02\)00042-9](https://doi.org/10.1016/S0961-9534(02)00042-9)
- Yin X.L., Wu C.Z., Zheng S.P., Chen Y. (2002). Design and operation of a CFB gasification and power generation system for rice husk. *Biomass Bioenergy*, (23), 181-187, [https://doi.org/10.1016/S0961-9534\(02\)00042-9](https://doi.org/10.1016/S0961-9534(02)00042-9)
- Zhai M., Xu Y., Guo L., Zhang Y., Dong P., Huang Y. (2016). Characteristics of pore structure of rice husk char during high-temperature steam gasification. *Fuel*, (185), 622-629, <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.08.028>.
- Zhai M., Zhang Y., Dong P., Liu P. (2015). Characteristics of rice husk char gasification with steam. *Fuel*, 158, pp. 42-49, <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.05.019>
- Zhang G., Liu H., Wang J, Wu. B. (2018). Catalytic gasification characteristics of rice husk with calcined dolomite. *Energy*, (165), pp. 1173-1177, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.10.030>
- Zhang Y., Zhao Y., Gao X., Li B., Huang J. (2015). Energy and exergy analyses of syngas produced from rice husk gasification in an entrained flow reactor. *J. Clean. Prod.*, (95), 273-280, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.02.053>

Semblanza de los Autores