



Gasificación Autotérmica a Escala Banco a Partir de Biomasa Residual Proveniente de Rastrojo de Sorgo

Bench Scale Autothermal Gasification from Waste Biomass of Sorghum Stubble

Lina Vanesa Garcia Peña

Instituto de Investigaciones en Catálisis y Petroquímica. Argentina.

Grupo de Investigación Ciencia e Ingeniería en Sistemas Ambientales, Universidad del Cauca. Colombia.

linavgarciap@gmail.com

ORCID: 0000-0002-7326-6235

Agostina Quicchi

Grupo de Cálculo, Investigación, Desarrollo y Ensayo de Máquinas Eléctricas. Universidad Tecnológica Nacional de San Francisco. Argentina.

aquicchi@sanfrancisco.utn.edu.ar

ORCID: 0000-0001-6369-1046

Misael Cordoba Arroyo

Instituto de Investigaciones en Catálisis y Petroquímica. Argentina.

Grupo de Catálisis, Universidad Del Cauca. Colombia.

mcordoba@fiq.unl.edu.ar

ORCID: 0000-0003-4003-8778

María Eugenia Taverna

Grupo de Cálculo, Investigación, Desarrollo y Ensayo de Máquinas Eléctricas. Universidad Tecnológica Nacional de San Francisco. Argentina.

Instituto de Desarrollo Tecnológico para la Industria Química. Argentina.

Mariaeugeniataverna@gmail.com

ORCID: 0000-0002-0991-201X

Mariana Busto

Instituto de Investigaciones en Catálisis y Petroquímica. Argentina.



mbusto@fiq.unl.edu.ar

ORCID: 0000-0002-5771-9978

Mariana Bernard

Grupo de Cálculo, Investigación, Desarrollo y Ensayo de Máquinas Eléctricas. Universidad Tecnológica Nacional de San Francisco. Argentina.

Correo electrónico: mbernard@sanfrancisco.utn.edu.ar

ORCID: 0000-0003-2525-9089

Juan Manuel Badano

Instituto de Investigaciones en Catálisis y Petroquímica. Argentina.

jbadano@fiq.unl.edu.ar

ORCID: 0000-0002-8181-4537

Resumen

En este trabajo se estudió la caracterización, acondicionamiento y gasificación del rastrojo de sorgo para la obtención de gas de síntesis (syngas) mediante el uso de un reactor de lecho fluidizado burbujeante a escala banco y autotérmico. En este equipo se gasificó rastrojo de sorgo azucarado (*Sorghum Saccharatum*, var. M81) cuyo acondicionamiento, involucró diferentes etapas previas al proceso de gasificación como picado, secado y tamizado. Se realizaron determinaciones proximales, análisis elemental (CHON), espectroscopia infrarroja (IR) y termogravimetría (TGA) de la materia prima.

La gasificación se desarrolló en un sistema continuo con flujo másico de alimentación de 0,840 kg/h, 400 g de catalizador o sólido inerte, relación equivalente (ER: O₂ alimentado/O₂ estequiométrico) de 0,45 y temperatura de 600 °C. El syngas obtenido fue caracterizado para determinar: contenido de alquitrán, relación H₂:CO y poder calorífico inferior (LHV). Para esto, se sometieron muestras a SPA (Adsorción en Fase Sólida) y SPE (Extracción en Fase Sólida), luego se analizaron mediante cromatografía de gases (GC).

En la gasificación se obtuvieron contenidos de alquitrán de 26 y 15 g/Nm³ con arena y dolomita, respectivamente; demostrando que el uso de catalizador reduce en un 40 % el contenido de alquitrán. Adicionalmente para ambas gasificaciones la relación H₂:CO y el LHV muestran valores similares de ~0,6 y 5,5 kJ/L, respectivamente. Los resultados indican que la gasificación continua, autotérmica y a escala banco de rastrojo de sorgo es una vía



prometedora para la generación de bioenergía siendo atractivo desde el punto de vista ambiental y económico.

Palabras clave

Gasificación; Reactor Fluidizado; Catálisis, Rastrojo de Sorgo; Residuo Biomásico; Gas de Síntesis, Bioenergía.

Abstract

This work studied the characterization, conditioning and gasification of sorghum stubble to obtain syngas through the use of a bubbling fluidized bed reactor at a bench scale and autothermal. In this equipment, *Sorghum Saccharatum* stubble (V.M81) was gasified, whose conditioning involved different stages previously to the gasification process such as chopping, drying and sieving. Proximal determinations, elemental analysis (CHON), infrared spectroscopy (IR) and thermogravimetry (TGA) of the raw material were performed.

Gasification occurred in a continuous system with a feed mass flow of 0,840 kg/h, 400 g of catalyst or inert solid, equivalent ratio (ER: fed O₂/stoichiometric O₂) of 0,45, and a temperature of 600 °C. The syngas obtained was characterized to determine: tar content, H₂:CO ratio and lower heating value (LHV). For this, samples were processed by SPA (Solid Phase Adsorption) and SPE (Solid Phase Extraction), then they were analyzed by gas chromatography (GC).

In the gasification, tar content values of 26 and 15 g/Nm³ were obtained with sand and dolomite, respectively demonstrating that the use of a catalyst reduces the tar content by 40%. For both gasifications, the H₂:CO ratio and the LHV show similar values of ~0,6 and 5,5 kJ/L, respectively. The results indicate that continuous, autothermal and bench scale gasification from sorghum stubble is a promising route for the generation of bioenergy, which is attractive from the environmental and economic point of view.

Keywords

Gasification; Fluidized Reactor; Catalysis, Sorghum Stubble; Waste Biomass; Syngas; Bioenergy.



Introducción

En la actualidad se llevan adelante grandes esfuerzos a nivel mundial para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero a través de la implementación de energías renovables, que están orientadas a disminuir la dependencia a los combustibles fósiles. Lo anterior se ha planteado desde la bioeconomía, que tiene por principio la utilización o reutilización de recursos renovables y/o residuos de otros procesos para generación de bienes y servicios[1]. En este contexto, es evidente que la transición energética es una necesidad y un proceso de transformación de las formas de producción, distribución y consumo de energía para hacer sostenible el sistema energético. Es así, como los residuos biomásicos se pueden considerar como una alternativa energética viable para generar biocombustibles de segunda generación y con estos producir bioenergía[2].

En el 2019 la participación de la bioenergía a nivel mundial fue de 12,5 % de los cuales el 90 % de la materia prima bioenergética fueron materiales lignocelulósicos como la madera y residuos de diferentes cereales como el sorgo, trigo y arroz [3]. En Argentina, si bien, el 59 % de la energía se obtiene a partir de combustibles fósiles, se están llevando a cabo distintas acciones y proyectos con el fin de fomentar la producción de energías renovables, las cuales en la actualidad representan un 12 % de la matriz energética nacional con un 4 % correspondiente a energía a partir de biomasa, principalmente lignocelulósica proveniente de la agroindustria[4]. Es así, como cada vez se aprovechan más los residuos biomásicos generados en las cadenas productivas tanto del sector agroindustrial como agrícola; de acuerdo con lo anterior, en el periodo del 2020-2021 en Argentina se sembró una superficie de aprox. 985.500 ha de sorgo de las cuáles un 15,60 % corresponde a la provincia de Córdoba [5]. Es importante destacar, que el sorgo impacta de manera positiva la calidad del suelo dado que mejora su porosidad debido al aporte de carbono que ayuda a equilibrar el suelo y al mismo tiempo, mejora la eficiencia de aprovechamiento de agua [6]. Hay diferentes variedades de sorgo, como el azucarado (*Sorghum Saccharatum*, V. M81), el cual es sembrado para ser utilizado como cortina forestal por lo que tiene la particularidad de superar dos metros de altura, desarrollando poca panoja, aportando mayor cantidad de



biomasa por hectárea sembrada y tiene la capacidad de adaptarse a diferentes situaciones edafoclimáticas (sequías, salinidad del suelo, etc)[7]. Además, este cultivo no se utiliza con fines alimenticios, ni compite por tierra con otras especies alimenticias. Sin embargo, el rastrojo de sorgo tiene baja densidad y alto contenido de humedad (65-70%)[7]; por lo tanto, es crucial el acondicionamiento de este material. El proceso de acondicionamiento implica diferentes etapas, tanto en el campo de siembra como en planta piloto, donde se lleva a cabo un proceso de secado, picado y tamizado.

Para la transformación de la biomasa en biocombustibles hay diferentes rutas, entre las que se tienen los procesos de termoquímicos de conversión como la pirolisis, combustión y gasificación. Esta última es un proceso termoquímico de combustión incompleta en donde la biomasa y el agente gasificante (aire, oxígeno, vapor de agua) son puestos en contacto para dar paso a procesos como el secado, volatilización, reacciones de oxidación, craqueo y reformado; generando en mayor proporción un gas de síntesis (syngas) compuesto de H_2 , CH_4 , CO , CO_2 e hidrocarburos ligeros o pesados, conocidos como alquitrán (tar). A partir de este gas se pueden generar diferentes productos químicos, energía térmica y eléctrica. Para estas últimas aplicaciones se debe acoplar a un sistema de calderas, motores de combustión interna y/o turbinas de gas [8]. Adicionalmente, en el proceso de gasificación se genera un residuo carbonoso conocido como biochar que puede utilizarse como material filtrante en tratamiento de aguas y como mejorador de las propiedades higroscópicas del suelo [9].

La eficiencia energética de la tecnología de gasificación puede alcanzar valores superiores al 50%, dependiendo de la calidad de la biomasa, agente gasificante y tipo de reactor [10]. Hay diferentes tipos de reactores como los de lecho fijo, arrastre y fluidizado; este último permite un buen control de temperatura y presión, una alta capacidad de procesamiento, genera un syngas con contenido de alquitrán medio-bajo y la posibilidad de ser aplicado a diferentes escalas para generación de energía eléctrica en plantas de entre 10-100 kW [11]. Diversos autores centran sus esfuerzos en el estudio de combustibles biomásicos y aunque los procesos de gasificación han sido más abordados para el procesamiento de biomasas a partir de la industria maderera, se reconoce que otros materiales de tipo lignocelulósicos



pueden también ser ampliamente utilizados. Publicaciones recientes como las de Pienihäkkinen et al. (2022), estudiaron la pirólisis rápida de diversas biomasas como el rastrojo de sorgo [12]. Afshin Amani y Faranak Akhlaghian (2022), orientaron su estudio hacia la cogasificación de sorgo con lignito para la producción de hidrógeno [13] mientras que Olivera S. Stamenković et al. (2020), profundizaron en el estudio del ciclo de vida y la generación de subproductos obtenidos a partir del grano de sorgo [14].

En este trabajo se estudió la caracterización, acondicionamiento y gasificación del rastrojo de sorgo azucarado (*Sorghum Saccharatum*, V. M81), dada la baja cantidad de estudios relacionados con la gasificación de esta biomasa, además de las mejoras que este cultivo confiere al suelo. Para la gasificación se utilizó un sistema a escala banco con reactor de lecho fluidizado burbujeante y autotérmico; en el cual se utilizó un catalizador natural de dolomita (Dol) y arena (blanco) para determinar el contenido de alquitrán, relación $H_2:CO$ y poder calorífico inferior (LHV) del syngas con el propósito de evaluar la tecnología de gasificación de residuos biomásicos como el rastrojo de sorgo para la generación de un syngas con potencial bioenergético.

Materiales y métodos

Acondicionamiento y caracterización del catalizador

Durante las pruebas de gasificación catalítica se utilizó como catalizador la dolomita (Dol), la cual fue provista por José Luis Calvo-Explotación Minera. Previo a su uso, fue calcinada en aire a 700 °C por 24 h. El catalizador y material inerte (arena) usados en el reactor lecho fluidizado fueron tamizados en un tamaño de partículas de 0.25 -0.50 mm. Se utilizaron técnicas de caracterización para conocer algunas propiedades de Dol como la espectroscopia acoplada a plasma inductivo (ICP-OES) en un equipo Perkin Elmer OPTIMA 2120 para determinar el contenido metálico y la técnica de fisorción de N_2 en un Micromeritics ASAP 2020 para conocer sus parámetros texturales como el área superficial.

Acondicionamiento y caracterización del rastrojo de sorgo



La biomasa utilizada fue el rastrojo de sorgo azucarado (*Sorghum Saccharatum*, variedad M81), provisto por INTA (Instituto Nacional de Tecnología agropecuaria, Argentina) (**Figura 1a**). Previo a la gasificación, se sometió al proceso de acondicionamiento para obtener el tamaño de partícula adecuado para el reactor de gasificación.

La biomasa tras ser cosechada, se picó en campo utilizando una picadora autopropulsada con la cual se llevó a un tamaño de partícula de 18-40 mm. El material se almacenó a granel para su proceso de secado en un secador piloto de lecho fluido en el que se logró disminuir la humedad de 60% a valores menores al 10% con un tiempo de secado de 2 h a 120 °C. Una vez seco el material se prosiguió a la reducción de tamaño con un molinillo de hélice que opera a un rango de molienda de 30-300 mesh, velocidad de rotación de 28.000 rpm y tiempo de molienda de 5 min. Finalmente se tamizó manualmente con lo que se obtuvo un material de 0,50-0,84 mm; tal como se requiere en el gasificador a utilizar (**Figura 1b**).

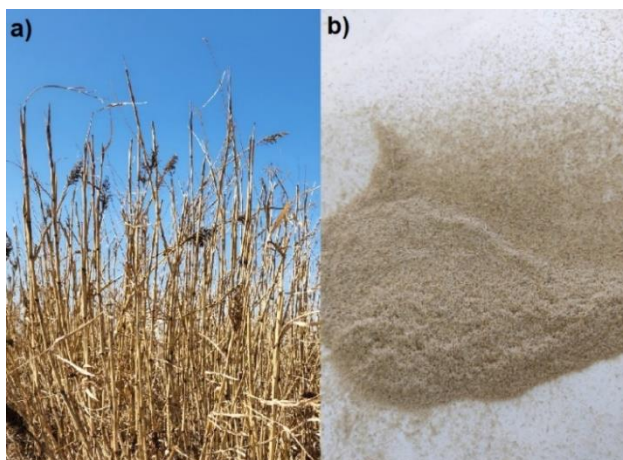


Figura 1. (a) *Sorghum Saccharatum*, V. M81 previo a la cosecha. (b) Rastrojo de sorgo acondicionado para gasificación.

La caracterización del rastrojo de sorgo involucró la determinación del análisis elemental mediante la técnica de análisis elemental (CHON) en un equipo CHN628 and Sulfur Add-On Module and TruSpec Micro Oxygen Add-On Module Elemental Determinators, marca: LECO®. El análisis próximo donde se determina el contenido de humedad (ASTM D 3173-03), material volátil (ASTM E 872-82), cenizas (ASTM D 1102 – 84) y carbono fijo por diferencia. Además, de determinar su comportamiento térmico con flujo oxidante;



mediante el análisis de termogravimetría (TGA) en un equipo Mettler Toledo STARe con módulo TGA/SDTA851 y se identificaron los grupos funcionales a través del análisis de espectroscopia infrarroja con reflectancia difusa (DRIFT) en un equipo Shimadzu Affinity 1S.

Pruebas de gasificación

Se estudió la gasificación del rastrojo de sorgo en un sistema a escala banco, continuo y autotérmico de lecho fluidizado (**Figura 2**). Está compuesto por la unidad de alimentación de la biomasa (1 y 2) y de los agentes gasificantes (4 y 5), pasando por el reactor de gasificación de lecho fluidizado autotérmico (6), seguido de la unidad de retención de partículas (8 y 9), el acondicionamiento de gases (10) y la medida volumétrica del gas (11).

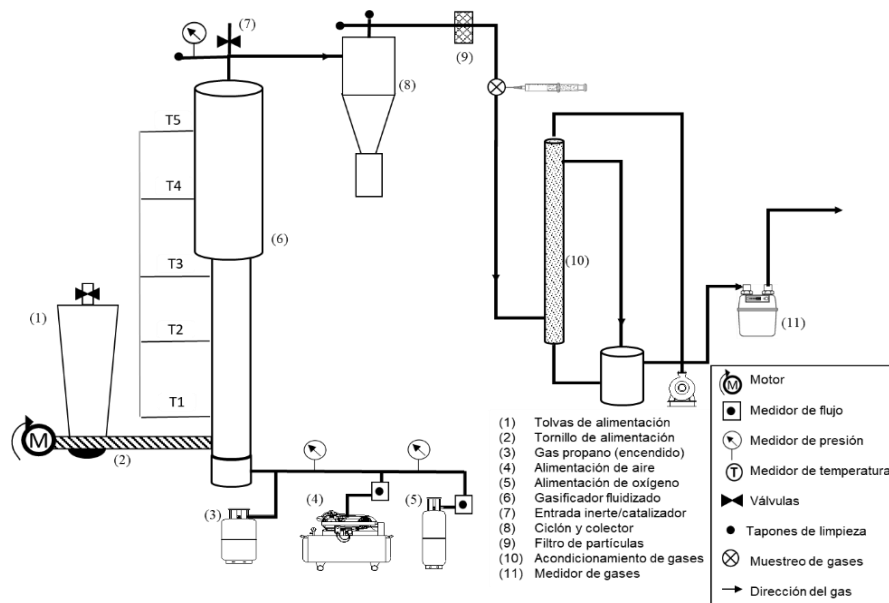


Figura 2. Esquema del sistema de gasificación a escala banco.

Las pruebas se realizaron con un flujo de alimentación de 0,840 kg/h, 400 g de catalizador/inerte y una relación equivalente (ER: relación entre el oxígeno alimentado y el requerido estequiométricamente para una combustión completa) de 0,45 con temperatura de equilibrio de 600°C. En la **Figura 3**, se muestra el diagrama de flujo con los pasos que conforman la prueba de gasificación.

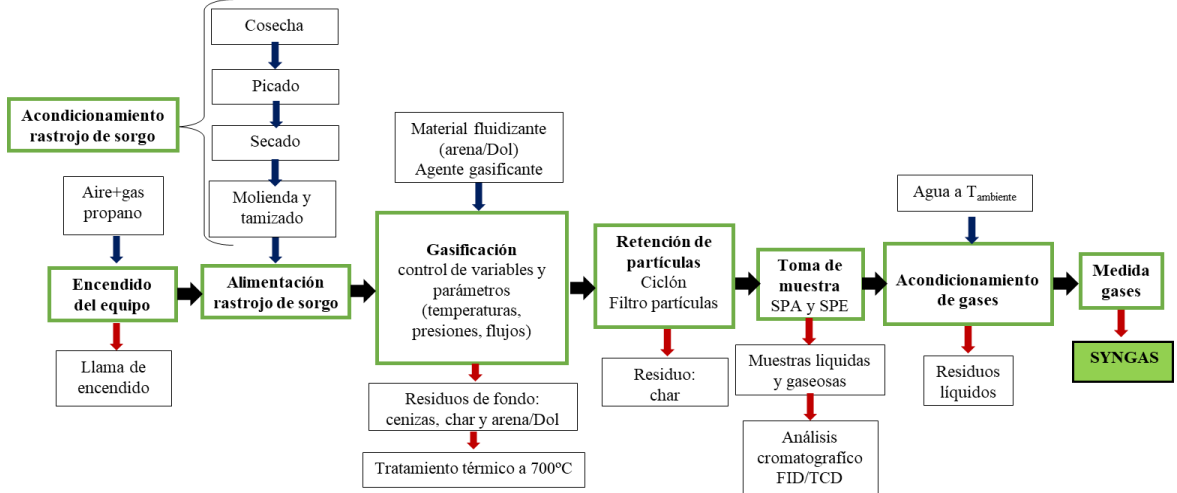


Figura 3. Diagrama de flujo de prueba de gasificación.

Durante la gasificación se toman y procesan las muestras por la técnica de SPA (Adsorción en Fase Sólida) y SPE (Extracción en Fase Sólida), seguido de un análisis por cromatografía de gases con detector FID/TCD Shimadzu 2014. Los datos obtenidos permiten determinar contenido de alquitrán, composición de gas, relación $H_2:CO$ y poder calorífico inferior (LHV) a través de las siguientes ecuaciones:

$$\text{Composición gas (\%)} = [N_i/N_t] * 100 \quad (1)$$

$$\text{Relación } H_2:CO = \text{moles } H_2 \text{ generado/moles } CO \text{ generado} \quad (2)$$

$$LHV \left(\frac{MJ}{Nm^3} \right) = \sum X_i * LHV_i \quad (3)$$

Donde:

N_i : Flujo molar i en el producto gaseoso (mol/h).

N_t : Flujo molar total de gases generados (mol/h).

LHV: poder calorífico inferior (MJ/Nm³: kJ/L).

X_i : Fracción molar i en el producto gaseoso.

LHV_i : poder calorífico inferior (MJ/Nm³: kJ/L)

Resultados

Caracterización del catalizador y rastrojo de sorgo

El **Cuadro 1** [15] presenta el contenido metálico y propiedades texturales para Dol, se observa que los resultados son conformes a la naturaleza química del mineral, con



componentes principales como el CaCO_3 , MgCO_3 , MgO y CaO . Dol presenta baja área BET y tamaño de poro muy bajos.

Cuadro 1. Resultados ICP y parámetros texturales del catalizador (Dol).

ICP: Elemento (%)		Propiedades Texturales		
Ca	Mg	Vol _{poro} (cm ³ /g)	Vol _{poro} (cm ³ /g)	d _{poro} (nm)
21,4	12	5,7	0,006	4,5

Fuente: [15]

En el **Cuadro 2**, se presentan algunas características del rastrojo de sorgo usado como alimentación. Estos resultados de caracterización se emplearon para comprender la naturaleza de la biomasa y establecer pautas operativas en el proceso de gasificación.

Cuadro 2. Caracterización del rastrojo de sorgo.

Material volátil (%)	Carbón fijo (%)	Humedad (%)	Ceniza (%)	Densidad (g/ml)	Análisis Elemental (%)				Poder calorífico (kJ/kg)	
					C	H	O	N	HHV	LHV
83,97	2,20	3,19	10,64	0,19	43,5	5,6	50	0,7	16390	15229

En la **Figura 4**, se muestran las curvas TGA y DTG del sorgo en aire. Se observa una primera región de 30-150°C, que corresponde a la etapa de secado. Seguido, hay dos regiones de descomposición; una correspondiente a la hemicelulosa, celulosa y lignina que esta entre 200-350°C y que en la curva DTG corresponde al segundo pico el cual tiene su máximo valor ~290°C. La segunda región corresponde a la descomposición del char que se degrada 350-500°C con un máximo en ~430°C [16]. Este análisis nos permite determinar que la temperatura de autoignición del sorgo es ~ 290°C, lo cual es determinante para el sistema de encendido del reactor autotérmico.

En la **Figura 5** se observa el espectro DRIFT del rastrojo de sorgo. Se evidencia una banda débil y solapada entre 3300 a 3100 cm⁻¹ correspondiente al estiramiento del grupo hidroxilo O-H. Además, se observan vibraciones características entre 2900-2700 cm⁻¹ de los enlaces C-H de cadenas alifáticas, estas bandas pueden ser atribuidas a la presencia de carbohidratos y proteínas. Los picos alrededor de 1700-1600 cm⁻¹ son atribuidos a la lignina



con vibración correspondiente al estiramiento C-O conjugado del anillo aromático y las bandas entre 1200 a 900 cm^{-1} son correspondientes a vibraciones de enlaces C-O, C-O-H, C-C las cuales se atribuyen a la presencia de celulosa y hemicelulosa del rastrojo de sorgo [17].

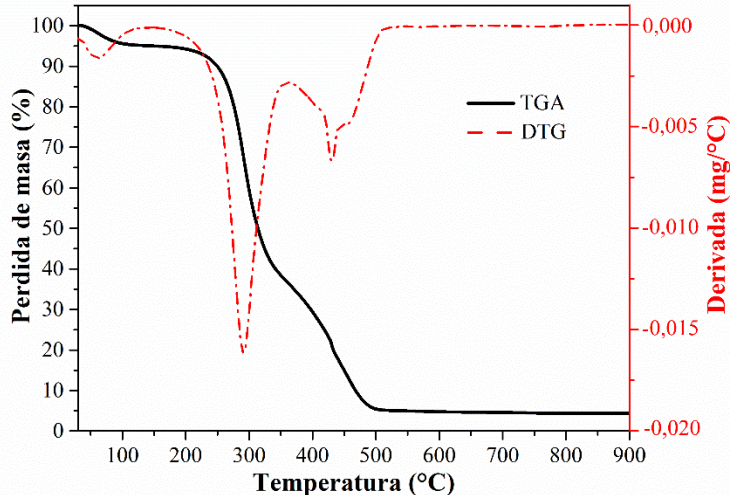


Figura 4. TGA rastrojo de sorgo en flujo de aire.

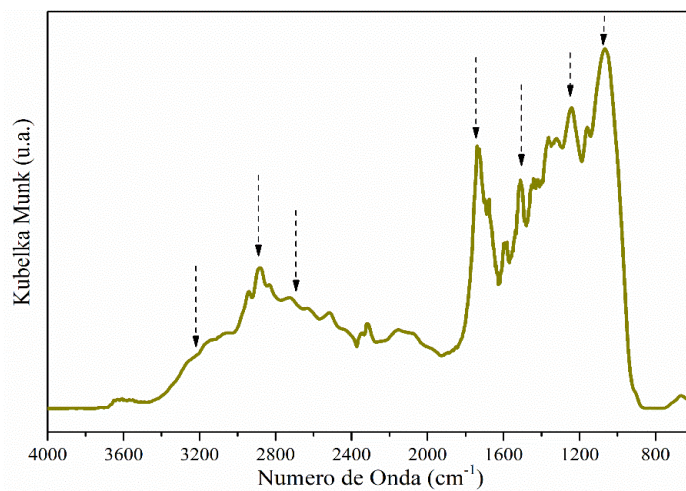


Figura 5. Espectro DRIFT del rastrojo de sorgo.

Pruebas de gasificación catalítica

Las pruebas de gasificación se realizaron con un flujo másico de rastrojo de sorgo de 0,840 kg/h, usando 400 g de material inerte o catalizador (Dol) en el lecho fluidizado, con un ER: 0,45 para una temperatura de gasificación de 600 °C. Como se observa en el **Cuadro 3**, el contenido de alquitrán es de 26 y 15,3 g/Nm^3 para Dol y arena, respectivamente; lo que



evidencia que el catalizador Dol presenta una mejor actividad durante la gasificación en comparación con el blanco (arena). Lo anterior, podría estar atribuido a las características encontradas en el catalizador de dolomita (**Cuadro 1**) donde se aprecia la presencia de calcio y magnesio que podrían estar en forma de carbonatos u óxidos, favoreciendo el craqueo catalítico de diferentes moléculas de alquitrán por la naturaleza básica del catalizador[18]. También se observa menos generación de biochar durante la gasificación catalítica con Dol en comparación con la arena, que puede deberse a reacciones favorecidas en presencia de Dol como la reacción de Boudouard ($C + CO_2 \rightarrow 2CO$) y la de gasificación de char ($C + H_2O \rightarrow H_2 + CO$); lo que a su vez incrementan los rendimientos del syngas.

Cuadro 3. Resultados de las pruebas de gasificación del rastrojo de sorgo

Prueba	Arena	Dol
<i>Alimentación (Kg/h)</i>	0,84	0,84
<i>T equilibrio (°C)</i>	600	600
<i>ER</i>	0,45	0,45
<i>Contenido de alquitrán (g/Kg biomasa)</i>	35,4	22,9
<i>Contenido de alquitrán (g/Nm³)</i>	26,0	15,3
<i>Rendimiento gas total(Nm³/Kg biomasa)</i>	1,36	1,50
<i>Rendimiento de syngas (Nm³/Kg biomasa)</i>	0,91	1,05
<i>H₂ (%)</i>	11	13
<i>CO (%)</i>	21	22
<i>CH₄ (%)</i>	4	3
<i>CO₂ (%)</i>	18	15
<i>H₂:CO</i>	0,52	0,59
<i>LHV (kJ/L)</i>	5,6	5,5
<i>biochar %</i>	11	8

En cuanto a la composición porcentual de los gases (H₂, CO, CO₂ y CH₄), la relación H₂:CO y el poder calorífico inferior (LHV) son muy similares entre la gasificación catalítica con Dol y la de referencia en modo no catalítico (arena). Destacando que el LHV es de ~5.5 kJ/L, siendo este un valor aceptable para la gasificación de residuos biomásicos como el rastrojo de sorgo utilizando como agente gasificante una mezcla de aire con oxígeno. Los resultados evidencian el potencial en aplicaciones bioenergéticas que puede tener el syngas generado a partir de la gasificación de este tipo de residuo biomásico.



Conclusiones

Se caracterizó y estableció el procedimiento para acondicionamiento del rastrojo *Sorghum Saccharatum* V.M81; involucrando picado en campo, secado en planta piloto, una segunda etapa de picado y tamizado para obtener el tamaño de partícula para la gasificación.

La prueba de gasificación del rastrojo de sorgo en modo catalítico con Dol mostro una disminución del 40% en el alquitrán del syngas comparado con el obtenido en modo no catalítico (arena); lo anterior puede ser atribuido a la naturaleza básica del catalizador Dol que favorece algunas reacciones, además se reconoce el bajo costo de este mineral y que no requiere procesos de síntesis catalítica, contribuyendo a la sostenibilidad del proceso.

Se estudió la gasificación del rastrojo de sorgo en un sistema a escala banco, continuo y autotérmico, utilizando como agente gasificante una mezcla de aire y oxígeno con lo que se obtuvo un syngas con un LVH de 5,5 kJ/L; evidenciando la posibilidad de usar esta tecnología para la gasificación del rastrojo de sorgo. Además, se destaca el uso de un cultivo que aporta gran cantidad de biomasa por ha, que puede ser sembrado en tierras agrestes y que no compite por el uso de tierra con cultivos alimenticios, sino que complementa los esquemas de siembra realizando protección contra la erosión, aporte de nutrientes al suelo y una posibilidad concreta de generación de energía, contribuyendo a la independencia energética de poblaciones aisladas e impulsando la transición energética.

Agradecimientos

A CONICET, Universidad Nacional del Litoral y ANCyT Santa Fe-Argentina por el apoyo financiero (PICT 2019-02065, CAI+D 50620190100103LI y IO-2018-00154). A Diego Sologuren por su apoyo técnico en la construcción del equipo. A la empresa Jose Luis Calvo-Explotación Minera por la dolomita. Al Ing. Diego Mathier, Ing. Diego Ortiz e Ing. Marcos Bragachini de INTA, estación experimental Manfredi por la siembra y provisión de la materia prima. A UTN, FRSFco, por el financiamiento mediante el proyecto PID ENPPBSF0008448.



Referencias

- [1] A. Akbarian, A. Andooz, E. Kowsari, S. Ramakrishna, S. Asgari, y Z. A. Cheshmeh, “Challenges and opportunities of lignocellulosic biomass gasification in the path of circular bioeconomy”, *Bioresour Technol*, vol. 362, pp. 127774, 2022. doi: 10.1016/j.biortech.2022.127774.
- [2] A. Molino, V. Larocca, S. Chianese, y D. Musmarra, “Biofuels production by biomass gasification: A review”, *Energies*, vol. 11, n. 4, 2018. doi: 10.3390/en11040811.
- [3] J. Bandara *et al.* “Air gasification of wood chips, wood pellets and grass pellets in a bubbling fluidized bed reactor”, *Energy*, vol. 233, 2021. doi: 10.1016/j.energy.2021.121149.
- [4] M. Eléctrico Mayorista, «Informe Anual 2021», 2022.
- [5] MAGyP, Presidencia de la Nación Argentina «Estimaciones agrícolas», 2021.
Recuperado de:
<http://datosestimaciones.magyp.gob.ar/reportes.php?reporte=Estimaciones>
- [6] S. K. Truong *et al.* “Bioenergy sorghum crop model predicts VPD-limited transpiration traits enhance biomass yield in water-limited environments”, *Front Plant Sci*, vol. 8, 2017. doi: 10.3389/fpls.2017.00335.
- [7] L. Giorda y J. Colazo, “Biomasa Energética de Sorgo en Ubajay (Entre Ríos). INTA Manfredi y el Sorgo: Nuevos Desarrollos”.
- [8] M. Rahman, “Test and performance optimization of nozzle inclination angle and swirl combustor in a low-tar biomass gasifier: a biomass power generation system perspective”, *Carbon Resources Conversion*, vol. 5, n. 2, pp. 139-149, 2022. doi: 10.1016/j.crcon.2022.01.002.
- [9] F. R. Oliveira *et al.* “Environmental application of biochar: Current status and perspectives”, *Bioresour Technol*, vol. 246, pp. 110-122, 2017, doi: 10.1016/j.biortech.2017.08.122.



- [10] Z. Yao *et al.* "Biomass gasification for syngas and biochar co-production: Energy application and economic evaluation", *Appl Energy*, vol. 209, pp. 43-55, 2018, doi: 10.1016/j.apenergy.2017.10.077.
- [11] T. Phong Mai y D. Quan Nguyen, "Gasification of Biomass", en *Biotechnological Applications of Biomass*, IntechOpen, 2021. doi: 10.5772/intechopen.93954.
- [12] E. Pienihäkkinen *et al.*, "Valorization of Eucalyptus, Giant Reed Arundo, Fiber Sorghum, and Sugarcane Bagasse via Fast Pyrolysis and Subsequent Bio-Oil Gasification", *Energy & Fuels*, 2022, doi: 10.1021/acs.energyfuels.2c01968.
- [13] A. Amani y F. Akhlaghian, "Hydrogen production from co-gasification of lignite and sorghum biomass in a fixed-bed gasifier: CFD modeling", *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, vol. 13, n. 1, pp. 295-304, 2022, doi: 10.1007/s40095-021-00423-y.
- [14] O. S. Stamenković *et al.* "Production of biofuels from sorghum", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 124, pp. 109769, 2020, doi: 10.1016/j.rser.2020.109769.
- [15] L. Garcia *et al.* "Catalytic Steam Reforming of Biomass Tar Model Compounds with Low-Cost Catalysts: Effect of Operation Conditions", *Top Catal*, vol. 65, pp. 1382-1393, 2022. doi: 10.1007/s11244-022-01659-6.
- [16] N. R. Galina *et al.* "Comparative study on combustion and oxy-fuel combustion environments using mixtures of coal with sugarcane bagasse and biomass sorghum bagasse by the thermogravimetric analysis", *Journal of the Energy Institute*, vol. 92, n. 3, pp. 741-754, 2019, doi: 10.1016/j.joei.2018.02.008.
- [17] D. Kotaiah Naik *et al.* "Pyrolysis of sorghum bagasse biomass into bio-char and bio-oil products", *J Therm Anal Calorim*, vol. 127, n.2, pp. 1277-1289, 2017, doi: 10.1007/s10973-016-6061-y.
- [18] M. Islam, "A review of dolomite catalyst for biomass gasification tar removal", *Fuel*, vol. 267, pp. 117095, 2020, doi: 10.1016/j.fuel.2020.117095.