

Integrated assessment of energy potential and operational risks of rice and sugarcane residues via thermochemical characterization and biomass quality indices

Estela Assureira¹; Marco Assureira²

¹Pontificia Universidad Católica del Perú, Perú, eassure@pucp.edu.pe

²Pontificia Universidad Católica del Perú, Perú, assureira.ma@pucp.edu.pe

Abstract– Residual biomass generated during the harvesting and processing stages in the rice and sugar industries represents an attractive and sustainable alternative for energy production, due to its high availability (2260 Mt annually), low cost, and non-competition with food security. However, the variability of its physical and thermochemical properties requires a comprehensive evaluation for its effective utilization. In this study, the energy potential and operational risks in the thermochemical conversion of sugarcane bagasse and leaves (SCB, SCS), and rice straw and husk (RS, RH), were evaluated and compared. These factors were integrated using a global Biomass Quality Index (BQI) based on 8 parameters, alongside combustion and ash-related indicators. The results identified SCB as the most favorable alternative, presenting the lowest BQI (2,82), followed by RH with an index of 5,43. This performance is attributed to a balanced compositional profile, characterized by suitable energy parameters and low penalties for operational issues linked to ash composition (lower presence of Na and K) and low concentrations of N, S, and Cl in the biomass. In contrast, RS and SCS showed high BQI values of 17,36 and 16,40, respectively. The integrated assessment of energy potential and operational risks, combined with pre-treatment strategies, would optimize the efficient, safe, and sustainable energy utilization of these residues.

Keywords–Lignocellulosic residues, Biomass quality index, Thermochemical processes, Energy analysis, Operational issues.

Evaluación integral del potencial energético y de los riesgos operativos de residuos lignocelulósicos arroceros-cañeros mediante caracterización termoquímica e índice de calidad de la biomasa

Estela Assureira¹; Marco Assureira²

¹Pontificia Universidad Católica del Perú, Perú, eassure@pucp.edu.pe

²Pontificia Universidad Católica del Perú, Perú, assureira.ma@pucp.edu.pe

Resumen– Las biomásas residuales generadas durante la cosecha y procesamiento en las industrias arroceras y azucareras se perfilan como una alternativa atractiva y sostenible para la producción de energía, debido a su alta disponibilidad (2260 Mt anuales) y bajo costo además de no competir con la seguridad alimentaria. No obstante, la variabilidad de sus propiedades físicas y termoquímicas demanda una evaluación integral para su empleo. En este trabajo, se evaluó y comparó el potencial energético y los riesgos operativos en la conversión termoquímica del bagazo y hojas de caña de azúcar (SCB, SCS) y, la paja y cascarilla de arroz (RS, RH), que fueron analizados aplicando el índice global de calidad de la biomasa (BQI) y así como indicadores de combustión y de cenizas. Los resultados muestran al SCB como la alternativa más favorable al presentar el menor BQI (2,82) seguido de la RH con un índice de 5,43. Esto se atribuye a un perfil composicional equilibrado, caracterizado por valores adecuados de los parámetros energéticos y bajas penalizaciones a problemas operativos, vinculados a la composición de las cenizas (menor presencia de Na y K) como a los bajos contenidos de N, S y Cl en la biomasa. En contraste, la RS y las SCS presentaron elevados valores de BQI iguales a 17,36 y 16,40 respectivamente. La evaluación integral del potencial energético y riesgos operativos junto con estrategias de pretratamiento, optimizaría el aprovechamiento energético eficiente, seguro y sostenible de los residuos.

Palabras clave– Residuos lignocelulósicos, Índice de calidad, Procesos termoquímicos, Análisis energético, Problemas operativos.

I. INTRODUCCIÓN

El aumento sostenido de la población, junto con la necesidad de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, ha impulsado la transición energética mediante el desarrollo y aprovechamiento de tecnologías sostenibles de base biológica. En este contexto, la bioenergía a partir de biomasa residual se perfila como una alternativa clave para avanzar hacia la neutralidad de carbono.

En 2025, según la Agencia Internacional de la Energía [1], la producción mundial de energía alcanzó aproximadamente 650 EJ, de los cuales cerca del 15 % (≈ 98 EJ) provino de fuentes renovables. Dentro de este grupo, la bioenergía aportó alrededor de 50 EJ, con una contribución particularmente relevante en la generación de calor (≈ 40 EJ), producida casi en su totalidad a partir de combustibles sólidos como leña, residuos agrícolas y forestales, y pellets.

La bioenergía presenta múltiples ventajas, entre las que destacan su carácter renovable, su versatilidad en aplicaciones energéticas y su contribución potencial a la

reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero. No obstante, este beneficio depende de que la biomasa sea producida y gestionada de manera sostenible, de modo que el CO₂ emitido durante la conversión energética sea compensado por la captación de carbono durante el crecimiento vegetal. Asimismo, el aprovechamiento energético de residuos orgánicos contribuye a una gestión más sostenible de estos materiales, reduce las emisiones de metano asociadas a su degradación anaerobia y favorece la seguridad energética y el desarrollo socioeconómico local [2]. Sin embargo, la bioenergía también presenta limitaciones, como la heterogeneidad de la biomasa, la posible emisión de contaminantes atmosféricos y gases de efecto invernadero cuando no se gestiona o convierte de manera eficiente, así como los elevados costos de inversión inicial, operación y mantenimiento, que dificultan su competitividad frente a combustibles fósiles de bajo costo sin el apoyo de políticas e incentivos adecuados [2].

La biomasa lignocelulósica está conformada principalmente por residuos agrícolas y residuos industriales. Los residuos agrícolas incluyen los residuos de campo generados durante las labores de cosecha, como tallos, rastrojos y hojas, así como los residuos de proceso agroindustrial generados en plantas de procesamiento, tales como semillas, raíces, cascarillas y bagazo. Por su parte, los residuos industriales corresponden a los desechos generados durante los procesos de manufactura de alimentos, como las cáscaras de papa y frutas resultantes de la elaboración de chips, dulces y jugos [3]. Por su carácter lignocelulósico, estos residuos constituyen una materia prima prometedora para la producción de biocombustibles y productos químicos, debido a su alta disponibilidad y bajo costo, además de no competir con la seguridad alimentaria, a diferencia de las biomásas de primera generación [4]. No obstante, la elevada variabilidad de sus propiedades físicas, energéticas y termoquímicas hace necesario considerar estos parámetros de manera integral y evaluar los riesgos operativos asociados a su conversión termoquímica, a fin de asegurar un aprovechamiento eficiente y seguro [3].

Tradicionalmente, algunos residuos son aprovechados como alimento para el ganado o fertilizantes, mientras que otros, al no presentar un uso inmediato, son dispuestos en botaderos o quemados para evitar problemas fitosanitarios asociados a su acumulación. Esta práctica, aún frecuente en países en desarrollo, genera impactos ambientales significativos y debe ser erradicada, ya que contribuye

aproximadamente con el 3,5 % de las emisiones globales de CO₂ [5].

Según estimaciones de la Food and Agriculture Organization of the United Nations [6], la producción mundial de cultivos alcanzó en 2024 aproximadamente 9 600 millones de toneladas, de las cuales cerca del 23% correspondieron a la caña de azúcar (2200 Mt) y 8,5% al arroz cáscara (820 Mt). La importancia de estos cultivos ha motivado nuestro interés en plantear la valorización energética integral de la paja y cascarilla de arroz y de las hojas y bagazo de caña de azúcar.

En la industria arroceras, la paja de arroz, residuo generado durante la cosecha, se produce en cantidades significativas, con relaciones promedio cercanas a 1,35 veces la masa del grano cosechado, mientras que la cascarilla de arroz, subproducto del proceso de molienda, representa alrededor del 20 % del peso del arroz cáscara [7]. De modo similar, en la industria cañera destacan las hojas de caña generadas en campo, que representan alrededor del 20 % de la biomasa cosechada, y el bagazo, residuo fibroso obtenido tras la extracción del jugo, que corresponde aproximadamente al 25 % de la masa de la caña procesada [8].

La variabilidad en la composición de la biomasa y de las cenizas de biomasa de los residuos considerados en este estudio se debe a su origen, condiciones de crecimiento, preparación del combustible y procesos de combustión, lo que influye directamente en sus propiedades físicas, químicas y termoquímicas [2]. Asimismo, la baja densidad y alta dispersión de los residuos de campo, como las hojas de caña y la paja de arroz, generan elevados costos en las operaciones de recolección y transporte, lo que limita su empleo a gran escala [5]. Aunque la densidad de los residuos de proceso, como el bagazo y la cascarilla de arroz, también es baja, su porcentaje de recuperación es cercano al 100 %, lo que los hace más atractivos para la producción de energía complementaria a nivel industrial [9].

Según la clasificación de residuos presentada en la literatura, los residuos seleccionados pertenecen a la categoría de biomasa lignocelulósica herbácea por sus elevados contenidos de celulosa, hemicelulosa y lignina [10]. Diversos investigadores reportan que este tipo de biomasa posee un mayor contenido de Si, K, Na, Cl, P y S, y un menor contenido de Ca en comparación con la biomasa leñosa, lo que favorece problemas operativos como bajas temperaturas de fusión de cenizas, sinterización, escorificación y corrosión durante la combustión. Estos efectos pueden mitigarse mediante pretratamientos como la lixiviación, pirólisis, la co-combustión con biomasa leñosa o carbón, y el uso de aditivos minerales [11].

En este contexto, resulta insuficiente evaluar la biomasa únicamente a partir de parámetros energéticos aislados, siendo necesario adoptar enfoques que integren simultáneamente la calidad del combustible, el comportamiento en combustión y los riesgos operativos asociados a las cenizas. Por ello, en el presente trabajo se adopta una metodología de evaluación integral basada en un enfoque multinivel, que combina un índice global de calidad del combustible (BQI) con indicadores complementarios de

combustión, energía utilizable y comportamiento de cenizas, permitiendo una comparación técnica más completa entre biomasa agrícolas lignocelulósicas.

El objetivo de este trabajo es evaluar y comparar, mediante un enfoque de evaluación integral, el potencial energético y los riesgos operativos asociados a la conversión termoquímica de residuos lignocelulósicos de las industrias arroceras y cañera (bagazo y hojas de caña, paja y cascarilla de arroz), integrando la caracterización físico-energética y termoquímica mediante el índice BQI y de indicadores complementarios de combustión y comportamiento de cenizas.

II. MATERIALES Y METODOLOGÍA

En esta sección se describen el enfoque metodológico general, los materiales y procedimientos experimentales empleados para la caracterización de las biomasa, así como la metodología de evaluación mediante índices de desempeño energético, de operación y de calidad global de la biomasa (BQI).

2.1. Enfoque metodológico

Para el estudio de las biomasa lignocelulósicas con fines energéticos se diseñó una evaluación integral y multinivel. Se integraron parámetros físico-energéticos y termoquímicos en un índice de calidad global BQI, utilizado como herramienta central de comparación, el que fue complementado con indicadores de combustión, energía utilizable y comportamiento de cenizas. Este enfoque permitió comparar de manera sistemática el desempeño energético y las limitaciones operativas de los residuos agrícolas estudiados, evitando la redundancia y la doble ponderación de parámetros.

2.2. Biomasa estudiada

El estudio se realizó considerando dos residuos de la industria arroceras y dos de la industria azucarera. En el caso de la industria arroceras, se analizaron la paja de arroz (RS) y la cascarilla de arroz (RH), provenientes de campos de cultivo y molinos ubicados en el departamento de La Libertad, provincia de Chepén. Para la industria azucarera, los residuos evaluados fueron las hojas de caña de azúcar (SCS), recolectadas en campos de cultivo, y el bagazo de caña (SCB), obtenido tras el proceso industrial en la planta de la empresa Caña Brava; ambos ubicados del departamento de Piura, provincia de Sullana.

La recolección de los residuos de campo se realizó mediante la toma de muestras en distintos puntos. En el caso de las hojas de caña y de la paja de arroz, debido a su elevada longitud, el material fue previamente cortado en trozos de entre 2 y 5 cm utilizando una guillotina manual.

Posteriormente, cada residuo fue homogeneizado mediante el método de cuarteo, adecuado para materiales lignocelulósicos heterogéneos y con contenido de humedad variable como se muestra en la Figura 1. El cuarteo se realizó hasta obtener aproximadamente 2 kg de muestra, cantidad suficiente de acuerdo a las normas ISO para llevar a cabo los

análisis de caracterización energética de biocombustibles sólidos considerando réplicas y control de calidad [12].

Las muestras obtenidas fueron molidas hasta obtener una granulometría malla M60, empleando un molino de cuchilla marca RETSCH modelo GM200. Finalmente, las muestras preparadas se almacenaron en bolsas Ziploc que se sellaron y codificaron convenientemente para los ensayos de caracterización.

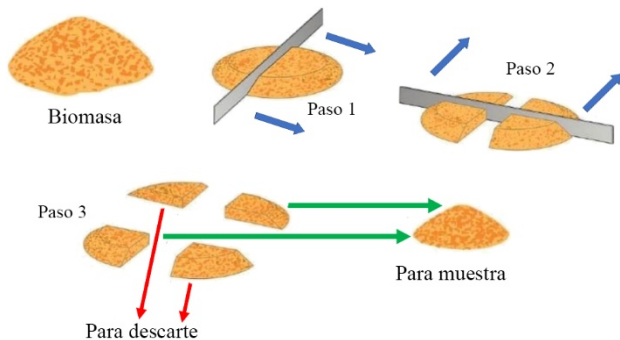


Fig. 1 Obtención de muestra por cuarteo manual

2.3. Caracterización físico-energética y termoquímica

Se procedió a la caracterización de las biomásas estudiadas según se indica a continuación.

2.3.1. Caracterización física

Comprendió la medición de la densidad aparente (BD), expresada en kg/m^3 , según la expresión indicada en (1). Esta propiedad es relevante para el manejo, almacenamiento y transporte del combustible y fue determinada siguiendo el procedimiento establecido en la norma ASTM E873-82 [13].

$$BD = \text{masa} / \text{volumen} \quad (1)$$

2.3.2. Caracterización química

Abarcó el análisis elemental del combustible (C, H, N y S), realizado conforme a las normas ASTM D5373 [14] y ASTM D4239 [15]. El contenido de oxígeno (O) se estimó por diferencia, según la expresión indicada en (2), donde todos los componentes están expresados como porcentaje en peso en base seca. Estos resultados proporcionan la base para la evaluación ambiental y energética del combustible.

$$O = 100 - C - H - N - S - \text{Ceniza} \quad (2)$$

Los contenidos de C y H se determinaron empleando un horno Thermo Scientific STF55433C Lindberg/Blue M. El contenido de N se determinó mediante el método Kjeldahl, utilizando un sistema compuesto por un matraz Kjeldahl con mechero Fisher y una unidad de destilación, mientras que el contenido de S se determinó utilizando una bomba calorimétrica isotérmica Parr 1341.

El contenido de cloro (Cl) se determinó empleando la misma bomba calorimétrica isotérmica Parr 1341, de acuerdo con la norma ASTM D2361 [16].

2.3.3. Caracterización termoquímica

La caracterización termoquímica comprendió el análisis inmediato del combustible, incluyendo la determinación del contenido de humedad (M), materia volátil (VM), cenizas y carbono fijo (FC). La humedad se determinó según la norma ASTM E871 [17], la materia volátil conforme a ASTM E872 [18] y el contenido de cenizas de acuerdo con ASTM D1102 [19], mientras que el carbono fijo se calculó por diferencia, según la expresión indicada en (3). Estos parámetros permiten describir el comportamiento térmico del combustible durante los procesos de combustión.

$$FC = 100 - M - VM - \text{Ceniza} \quad (3)$$

La ceniza fue determinada empleando un horno de mufla isotérmico Fisher Scientific serie 650-58; un horno HOSKINS FA120 para hallar el contenido de la materia volátil; y un horno GRIEVE LR271 para la determinación de la humedad.

2.3.4. Caracterización energética

La caracterización energética permite evaluar la capacidad del combustible para suministrar energía útil por unidad de volumen y ha comprendido la determinación del poder calorífico superior del combustible (HHV), mediante el uso de una bomba calorimétrica isotérmica Parr 1341, siguiendo el procedimiento establecido en la norma ASTM D5865 [20]. Los resultados se expresaron en $\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$.

2.3.5. Caracterización de las cenizas

La composición química de las cenizas, expresada en términos de óxidos mayoritarios, se realizó mediante fluorescencia de rayos X (FRX), de acuerdo con las normas ASTM D4326 [21] y ASTM C114 [22]. El análisis de la fracción inorgánica permite evaluar el comportamiento de las cenizas y su influencia en los riesgos operativos asociados a los procesos de conversión termoquímica, tales como escorificación, ensuciamiento y corrosión. Las cenizas fueron obtenidas conforme a la norma ASTM D3174 [23], utilizando una mufla isotérmica Fisher Scientific, modelo 58. Posteriormente, el análisis químico por FRX se realizó empleando un espectrómetro Bruker S4 Pioneer.

2.3.6. Determinación de la temperatura de ignición

La temperatura de ignición (T_{ig}) es la temperatura mínima a partir de la cual la reacción de combustión se inicia y se mantiene de forma autosostenida en presencia de un agente oxidante, sin requerir un aporte externo continuo de energía. Para el registro se utilizó un termómetro portátil modelo HI98704 y una sonda termopar tipo K.

2.4. Índices de evaluación

La interpretación conjunta de los índices predictivos de escorificación y ensuciamiento y de las temperaturas características de fusión de las cenizas permite establecer relaciones directas entre la composición inorgánica de las biomásas y su comportamiento termoquímico durante la combustión.

2.4.1. Índices relacionados con el desempeño energético

Evalúan la capacidad del residuo para aportar energía útil, considerando su poder calorífico y las características de combustión.

2.4.1.1. Densidad energética (ED)

Indica cuánta energía útil contiene un combustible por unidad de volumen. Su valor se calcula a partir del poder calorífico inferior (LHV) en base seca y la densidad aparente, según [24] e indicada en (4).

$$ED = (LHV) \cdot (BD) \quad (4)$$

2.4.1.2. Fuel ratio (Fr)

Este índice vincula los aspectos de estabilidad y duración de la combustión y, la generación de llamas. Como señala [24] se determina como se indica en (5).

$$Fr = FC/VM \quad (5)$$

2.4.1.3. Índice de inflamabilidad (Ii)

Es un indicador de la facilidad con la cual se enciende un combustible, su valor se determina según (6), donde HHV es el poder calorífico expresado en kcal·kg⁻¹ y la materia volátil en base recibida [25].

$$Ii = (HHV - 81FC)/(VM + M) \quad (6)$$

2.4.1.4. Índice de oxidación del carbono (CHO)

Se utiliza para calificar el estado de oxidación en el cual se halla el carbono en las muestras a analizar, para estimar su valor se utiliza (7) de acuerdo a [26].

$$CHO = (2O - H)/C \quad (7)$$

2.4.1.5. Ratios atómicos H/C y O/C

Estas relaciones son utilizadas para la caracterización de las biomásas en estudio como combustible en el diagrama Van Krevelen, siendo calculados según (8) y (9).

$$(H/C)_{atr} = H_a/C_a \quad (8)$$

$$(O/C)_{atr} = O_a/C_a \quad (9)$$

donde H_a, O_a y C_a representan el número de moles de átomos por cada 100 g de biomasa, calculados a partir de los contenidos de C, H y O, expresados como porcentaje en peso en base seca, y divididos entre sus correspondientes pesos atómicos [27].

2.4.2. Índices relacionados con limitaciones operativas

Están relacionados con los problemas de operación de los equipos térmicos asociados a la deposición de cenizas y corrosión.

2.4.2.1. Predicción de problemas asociados a las cenizas

Cuantifica la propensión de la biomasa a generar problemas operativos durante la conversión termoquímica, tales como escorificación, ensuciamiento y aglomeración de cenizas. La predicción de estos fenómenos se basa en la

composición química de las cenizas de las biomásas estudiadas y se realizó mediante la aplicación de diversos índices empíricos propuestos en la literatura, los cuales se presentan en la Tabla 1.

TABLA I ÍNDICES DE PREDICCIÓN DE ESCORIFICACIÓN Y ENSUCIAMIENTO			
Índice	Expresión	Ref.	Ec.
Relación base-ácido	$\frac{B}{A} = \frac{F_2O_3 + CaO + MgO + K_2O + Na_2O}{SiO_2 + TiO_2 + Al_2O_3}$	[28], [29]	(10)
Índice de aglomeración del lecho	$BAI = \frac{Fe_2O_3}{Na_2O + K_2O}$	[28]	(11)
Índice de ensuciamiento	$Fu = (B/A) \cdot (K_2O + Na_2O)$	[28], [29]	(12)
Contenido de cloro	Cl	[29]	(13)
Índice de álcali (kg/GJ)	$Ai = \frac{(K_2O + Na_2O) \cdot A}{PCS}$	[28], [29]	(14)
Índice de escorificación	$Rs = (B/A) \cdot (S)$	[29]	(15)
Índice de viscosidad de la escoria	$G = \frac{100 \cdot SiO_2}{SiO_2 + F_2O_3 + CaO + MgO}$	[28], [29]	(16)

2.4.2.2. Índice de oxidación activa (IOA)

Se complementará este análisis al considerar la disponibilidad de azufre y cloro reactivos, vinculados a la formación de compuestos alcalinos volátiles que intensifican la deposición y consolidación de escorias mediante el índice de oxidación activa (IOA) [30].

Este índice indica la tendencia a la formación de aerosoles, depósitos y corrosión, Su valor se calcula según considerando los valores molares de S y Cl aplicando la expresión (17).

$$IOA = 2S/Cl \quad (17)$$

2.4.2.3 Temperaturas características de las cenizas

Dado que los índices presentados no proporcionan información directa sobre los umbrales térmicos de deformación y fusión, siguiendo el enfoque propuesto por [31] el análisis se complementó con la estimación de las temperaturas características de deformación (DT) y hemisférica (HT) a partir de diagramas ternarios basados en la composición química de las cenizas, permitiendo relacionar la tendencia a la formación de fases fundidas con las temperaturas a las que estas se desarrollan efectivamente.

2.4.3. Índices de calidad de la biomasa

Se emplearon los índices de calidad de parámetro (PQI) y de calidad global de la biomasa (BQI) para evaluar y comparar el desempeño energético de las biomásas estudiadas. Para determinar su valor por parámetro se aplican (18) y (19) según sugiere [32].

$$PQI_i = \frac{(x_2 - x_1)}{(x_3 - x_1)} \quad (18)$$

donde:

PQI_i = índice de calidad del parámetro “i” evaluado

x_i = valor óptimo del parámetro evaluado,

x_2 = valor medido del parámetro, y
 x_3 = valor máximo o mínimo del rango de trabajo.

$$BQI = \sum_{i=1}^8 POI_i \quad (19)$$

Los valores óptimos se definieron de acuerdo con normas y referencias orientadas a garantizar una calidad óptima del biocombustible. Siguiendo estas mismas referencias, se seleccionaron valores máximos y mínimos para cada parámetro con el fin de establecer los límites superior e inferior [32], [33].

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Características físico-químicas y propiedades energéticas de las biomásas

En la Tabla 2 se presentan los resultados de los análisis aplicados a las biomásas estudiadas.

TABLA II
PROPIEDADES FSICOQUÍMICAS Y ENERGÉTICAS

Muestras	SCS	SCB	RH	RS
Análisis elemental (% peso, b.s.)				
C	43,9	44,63	39,7	37,98
H	5,52	5,42	4,98	4,91
O	40,9	44,62	35,22	34,71
N	0,33	0,42	0,44	0,83
S	0,28	0,049	0,06	0,22
Cl	0,69	0,016	0,03	0,63
Análisis inmediato (% peso, b.s.)				
Cenizas	9,1	4,86	19,56	20,73
Materia volátil	75,1	79,08	64,51	63,65
Carbono fijo	15,8	16,07	15,93	15,62
Poder calorífico (MJ·kg ⁻¹)				
HHV (b.s.)	17,37	21,30	15,80	14,87
Densidad aparente (kg·m ⁻³)				
BD (kg·m ⁻³)	60,0	105,00	137,00	155,00
Humedad (% peso, base recibida)				
Mar (b.r.)	13,3	12,01	10,44	14,33
Análisis de ceniza (%)				
Si O ₂	49,90	70,10	89,94	70,25
Al ₂ O ₃	6,65	9,90	0,00	0,54
Fe ₂ O ₃	3,02	4,43	0,29	0,46
CaO	10,10	4,00	0,90	4,26
MgO	4,08	2,00	0,46	1,76
SO ₃	8,68	1,14	4,02	3,06
Na ₂ O	2,25	0,85	0,04	2,24
K ₂ O	12,16	4,29	2,90	11,02
TiO ₂	0,04	0,50	0,01	0,04
P ₂ O ₅	1,47	1,30	0,56	1,11
Mn ₂ O ₃	0,09	0,1	0,09	0,20
SrO	0,05	0,00	0,01	0,02
Cr ₂ O ₃	0,00	0,00	0,02	0,01
Pérdida al fuego	1,00	1,40	1,28	5,00

La caracterización termoquímica de las muestras locales muestra una sólida convergencia con la literatura técnica internacional. Para el caso de la paja (RS) y la cascarilla de arroz (RH), los resultados presentan una estrecha concordancia con los hallazgos publicados por Moraes et al. (2014) [7] y Chaloupková et al. (2021) [11]. De igual modo, los parámetros de SCS y SCB se sitúan dentro de los límites reportados en el extenso compendio de revisión de Najafi et al. (2023) [34], el cual integra datos de diversos autores

globales. Esta convergencia con estudios de revisión y experimentales valida la representatividad de estas biomásas y sugiere que los hallazgos podrían ser directamente extrapolables a otras regiones donde se generan estos residuos bajo condiciones similares.

Como se observa, el SCB presenta el mayor poder calorífico superior (21,30 MJ·kg⁻¹) entre las biomásas evaluadas, lo cual se atribuye principalmente a su menor contenido de cenizas (4,86%) y a su mayor proporción de carbono e hidrógeno, elementos directamente responsables del aporte energético del combustible.

En contraste, los residuos de la industria arrocera (RH y RS) muestran valores del HHV significativamente menores (15,8 y 14,87 MJ·kg⁻¹ respectivamente), equivalentes aproximadamente al 70–75% del HHV del SCB. Esta reducción se explica por su elevado contenido de cenizas (≈ 20%), así como por un menor contenido de C e H, lo que limita su potencial energético y su eficiencia en procesos de conversión térmica.

Respecto al contenido de Cl, elemento asociado a fenómenos de corrosión y deposición durante la conversión termoquímica, se observa que SCB y RH presentan concentraciones inferiores a 0,2% en base seca, lo que implica un riesgo operativo bajo. Por el contrario, SCS y RS presentan valores elevados de Cl (≈ 0,6–0,7%), los cuales superan los límites recomendados para aplicaciones térmicas, siendo necesaria la implementación de pretratamientos, como el lavado con agua, para reducir su contenido a niveles admisibles [5].

En cuanto al nitrógeno, SCS, SCB y RH presentan valores cercanos al 0,4%, comparables a los reportados para biomásas leñosas, lo que representa una ventaja ambiental al contribuir a la reducción potencial de emisiones de NO_x y NH₃, compuestos asociados a la lluvia ácida y al smog fotoquímico. En contraste, RS exhibe un contenido de N superior al 0,8%, lo que podría incrementar dichas emisiones durante la combustión [2].

Finalmente, el contenido de azufre (S) en los residuos generados durante el procesamiento industrial (SCB y RH) se mantiene por debajo del límite recomendado de 0,2%, lo cual es favorable desde el punto de vista ambiental y operativo, al minimizar la formación de SO₂ y problemas de corrosión asociados [33].

Estos resultados, basados en la composición elemental y el contenido de cenizas, se complementan con el análisis inmediato, el cual permite evaluar el comportamiento de las biomásas durante las etapas iniciales de los procesos termoquímicos, particularmente la ignición y la liberación de volátiles. En este sentido, el análisis inmediato indica que todas las biomásas estudiadas presentan un contenido de humedad inferior al 30% en base recibida, condición favorable para su empleo directo en procesos termoquímicos, al no requerir la implementación de etapas adicionales de secado previo, de acuerdo con lo reportado en la literatura [35].

Asimismo, las biomásas provenientes de la industria azucarera (SCS y SCB) presentan un mayor contenido de materia volátil en comparación con los residuos de la industria arrocera (RH y RS). Este comportamiento es

consistente con sus mayores valores de HHV y se asocia con una mayor reactividad del combustible, una ignición más temprana y una mayor generación de gases combustibles durante procesos termoquímicos como la combustión, gasificación y pirólisis, aspectos clave para su aprovechamiento energético [2].

Las hojas de caña de azúcar (SCS) presentan la menor densidad aparente, asociada a su estructura laminar; el bagazo de caña de azúcar (SCB) muestra una densidad intermedia, atribuible a su estructura fibrosa más compacta; mientras que los residuos de la industria arrocera (RH y RS) exhiben los mayores valores de densidad aparente, debido a su mayor rigidez estructural y geometría particulada más estable. Estas diferencias estructurales influyen directamente en el comportamiento de las biomásas durante el almacenamiento y la alimentación de sistemas termoquímicos, evidenciándose una amplia variabilidad de la densidad aparente ($60\text{--}155\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$), que condiciona su desempeño logístico y operativo [36].

3.2 Análisis del desempeño energético

La Tabla 3 presenta los principales indicadores de desempeño energético de las biomásas estudiadas, incluyendo la densidad energética (ED), el fuel ratio (Fr) y el índice de inflamabilidad (Ii). Adicionalmente, el estado de oxidación del carbono (CHO) y las relaciones H/C y O/C que permiten evaluar el grado de oxidación y la estructura química del combustible, relevantes para su comportamiento termoquímico.

TABLA III
ÍNDICES DE DESEMPEÑO ENERGÉTICO

Índice	SCS	SCB	RH	RS
ED ($\text{MJ}\cdot\text{m}^{-3}$)	969,6	2111,55	2015,27	2137,45
Fr	0,210	0,203	0,247	0,245
Ii	31,801	33,725	34,161	61,153
CHO	-0,111	0,042	-0,175	-0,180
H/C	1,51	1,46	1,51	1,55
O/C	0,70	0,75	0,67	0,69

La densidad energética volumétrica (ED) mostró una variación significativa entre las biomásas evaluadas, con valores comprendidos entre $970\text{ y }2140\text{ MJ}\cdot\text{m}^{-3}$. Aunque el SCB presenta el mayor poder calorífico inferior en base seca ($20,11\text{ MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$), los residuos de la industria arrocera (RH y RS) alcanzan valores de densidad energética comparables o superiores debido a su mayor densidad aparente. En particular, la RS exhibe la mayor densidad energética ($21,37\text{ MJ}\cdot\text{m}^{-3}$), a pesar de su menor poder calorífico, lo que evidencia que la densidad energética no depende únicamente de la calidad energética intrínseca del combustible, sino también de su estructura física y compactibilidad, con implicancias directas en el almacenamiento, transporte y alimentación de equipos. Asimismo, la literatura reporta que procesos de pretratamiento termoquímico, como la torrefacción, pueden incrementar significativamente la densidad energética al favorecer simultáneamente el aumento del poder calorífico y la densificación del material [24]. Se observa además que las muestras SCS, SCB y RH presentan valores del índice de ignitabilidad inferiores a 35, lo que indica que estos combustibles podrían presentar dificultades

para ser utilizados eficientemente en calderas, asociadas a una ignición deficiente y a una combustión inestable [37].

Los bajos valores de fuel ratio ($\text{Fr} = 0,20 - 0,25$) evidencian biomásas altamente reactivas y ricas en volátiles, lo que favorece una ignición rápida; no obstante, los índices de inflamabilidad inferiores a 35 observados en SCS, SCB y RH sugieren posibles limitaciones en la estabilidad de la combustión en calderas convencionales, a diferencia de RS, que presenta un comportamiento de ignición más favorable.

El estado de oxidación del carbono (CHO), junto con las relaciones H/C y O/C, confirma el carácter lignocelulósico de las biomásas y un carbono relativamente oxidado, coherente con su alta reactividad y menor poder calorífico frente a combustibles fósiles, lo que indica que la aplicación de pretratamientos termoquímicos, como la torrefacción, podría mejorar la estabilidad de combustión y el desempeño energético global.

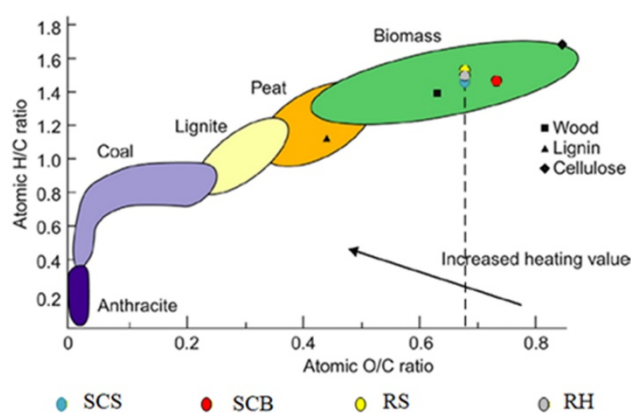


Fig. 2 Diagrama Van Krevelen [27]

Así mismo, los resultados presentados correspondiente a las muestras analizadas presentan valores de C–H–O superiores a $-0,5$ lo que se asocia con una estructura lignocelulósica rica en celulosa y hemicelulosa. En el diagrama de Van Krevelen [27] (Figura 2), esta característica se refleja en relaciones O/C relativamente elevadas, indicativas de un estado de oxidación más alto del carbono, debido a la abundancia de enlaces C–O y C–OH propios de estas fracciones polisacáridicas. En contraste con biomásas más ricas en lignina y con combustibles fósiles ($\text{C–H–O} < -2$), este mayor grado de oxidación del carbono explica parcialmente los menores valores de poder calorífico observados.

3.3 Análisis de las limitaciones en el desempeño operativo

La evaluación en el desempeño operativo comprendió la predicción de que se presenten problemas de escorificación y ensuciamiento en los equipos térmicos.

3.3.1 Índices predictivos de escorificación y ensuciamiento

Los índices de escorificación y ensuciamiento (B/A, Fu, G, AI, Rs y Cl) para las biomásas estudiadas (ver Tabla 4), fueron interpretados a partir de los rangos reportados en la

literatura [28], [29], lo que permitió identificar condiciones de bajo riesgo, riesgo probable y alto riesgo de formación de escorias y depósitos durante la combustión. Con el fin de

facilitar la comparación entre biomásas, los resultados se representaron mediante un código de colores tipo semáforo, donde el color verde indica ausencia de problemas operativos,

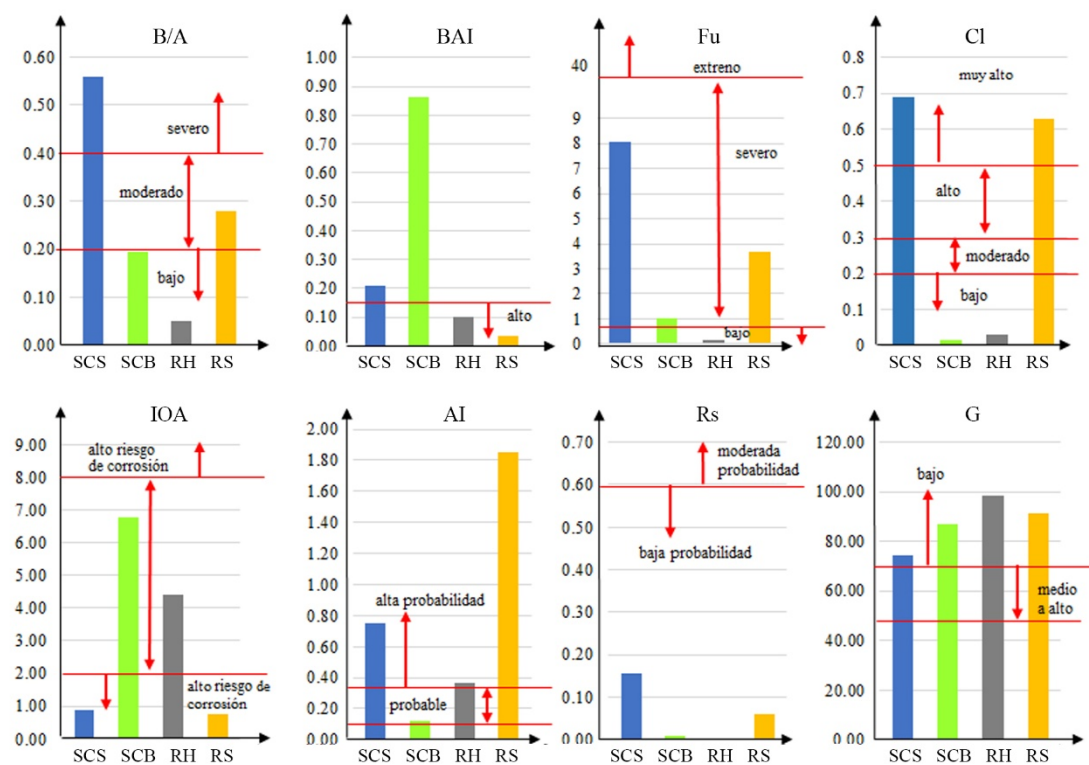


Fig. 3 Índices de desempeño operativo de las biomásas estudiadas

el color amarillo representa una condición intermedia o de riesgo potencial, y el color rojo señala una alta probabilidad de problemas de escorificación o ensuciamiento. La Figura 3 presenta los valores obtenidos y los límites establecidos.

TABLA IV ÍNDICES DE PREDICCIÓN DE ESCORIFICACIÓN Y ENSUCIAMIENTO								
Muestra	B/A	BAI	Fu	G	AI	Rs	Cl	IOA
SCS	0,56	0,21	8,05	74,37	0,75	0,16	0,69	0,897
SCB	0,19	0,86	0,99	87,05	0,12	0,01	0,016	6,77
RH	0,05	0,1	0,15	98,20	0,36	0,003	0,03	4,42
RS	0,28	0,03	3,70	92,55	1,85	0,06	0,63	0,72

El análisis conjunto de los índices de escorificación, ensuciamiento y oxidación activa muestra que RH y SCB presentan el comportamiento más favorable, mientras que SCS y RS exhiben una elevada propensión a problemas operativos, dominados por la presencia de álcalis y cloro reactivo. La coherencia entre los índices clásicos (B/A, Fu, G, AI) y el IOA confirma que la evaluación del riesgo en biomásas no debe basarse en un único indicador, sino en un enfoque integrado que considere tanto la fusión de cenizas como los mecanismos de volatilización alcalina. Es importante señalar que para los índices B/A, Fu, G, AI, Rs y el contenido de Cl, los límites empleados corresponden a

valores ampliamente utilizados en estudios previos sobre combustión de biomasa y comportamiento de cenizas.

En el caso del índice de aglomeración (BAI) y del índice de oxidación activa (IOA), cuya estandarización no presenta umbrales universalmente definidos, la interpretación se realizó de manera comparativa entre las biomásas evaluadas. En este contexto, valores relativamente más elevados de BAI e IOA fueron asociados a una mayor tendencia a la aglomeración de partículas y a una mayor disponibilidad de especies alcalinas reactivas (principalmente Cl y S), respectivamente, que favorecen los mecanismos de deposición y consolidación de escorias.

3.3.2. Tipo de ceniza y temperatura fusión

De acuerdo con los criterios de clasificación y diagramas ternarios propuestos por Vassilev [2] basados en asociaciones dominantes de óxidos, para las cenizas de las biomásas evaluadas, se procedió a identificar el tipo de ceniza (Tipo K, Tipo CK, Tipo C y Tipo S) así como el grado de acidez y se proyectó las temperaturas de deformación (DT) y hemisferio (HT). La Tabla 5 muestra el valor de las asociaciones de óxidos en base a las cuales se ha trabajado en los diagramas ternarios, ver Figuras 4 y 5.

TABLA V
TIPO DE CENIZA SEGÚN ASOCIACIÓN DE ÓXIDOS (%)

	SCS	SCB	RH	RS
Grupo A (%)	62,8	87,0	91,0	77,4
Grupo B (%)	22,7	6,8	7,5	16,0
Grupo C (%)	14,5	6,2	1,5	6,5
Total (%)	100,0	100,0	100,0	100,0
Tipo de ceniza	S	S	S	S
Acidez	Media	Alta	Alta	Alta
DT (°C)	< 1100	> 1300	> 1300	< 1100
HT (°C)	< 1200	> 1400	> 1400	1200-1400

Como se puede observar, las muestras de RH, SCB y RH presenta una ceniza de tipo S, de alta acidez y dominada por SiO₂; mientras que las SCS se asocia a una ceniza de tipo S y acidez media. Así mismo se que biomasa que biomasa rica en “A” muestran alto valores de DT y HT así como sin “C” presenta un valor elevado los valores de DT y HT serán bajos.

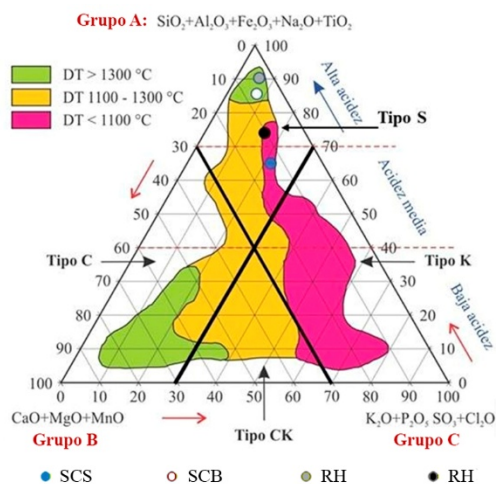


Fig. 4 Temperatura de deformación de las cenizas (DT)

3.4 Análisis de la calidad de la biomasa

El índice global de calidad de la biomasa (BQI) se determinó siguiendo el enfoque propuesto en la literatura [32], considerando los parámetros de calidad más relevantes para la conversión termoquímica de biomasa sólida: contenido de carbono (C), nitrógeno (N), azufre (S), cloro (Cl), cenizas, poder calorífico superior (HHV) en base seca, humedad en base recibida (M_{ar}) y densidad aparente (BD).

Los valores óptimos, así como los límites máximos y mínimos empleados, se establecieron con base en lo reportado por Rocha [32] y en las especificaciones de la norma ISO 17225-7 [38] para biomasa herbácea.

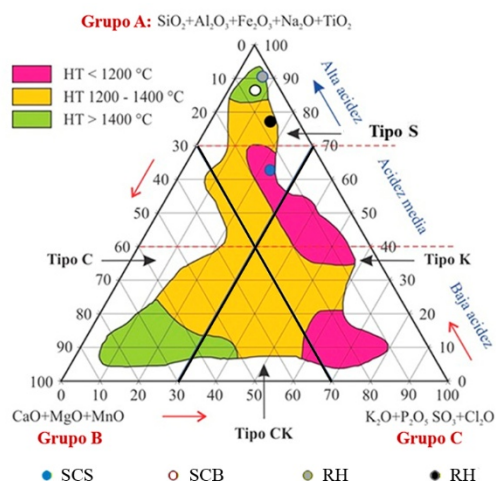


Fig. 5 Temperatura hemisférica de las cenizas (HT)

El índice de calidad de parámetro (PQI) se definió como la desviación relativa entre el valor medido y el valor óptimo del parámetro, normalizada por el rango de trabajo establecido entre el valor óptimo y el valor límite. El signo del PQI se mantuvo para reflejar la dirección de la desviación respecto al valor óptimo. Para los parámetros en los cuales el PQI presenta valores más bajos indican una mejor calidad del combustible.

El índice global BQI se obtuvo como la suma de los PQI individuales, representando una evaluación integrada del desempeño energético y del posible impacto operativo y ambiental del combustible. De acuerdo con esta metodología, valores más bajos de BQI indican una biomasa de mayor calidad, ya que reflejan un mejor balance entre el desempeño energético y la reducción de penalizaciones operativas y ambientales. Los resultados obtenidos para las biomasa evaluadas se presentan en la Tabla 6 y Figura 6.

TABLA VI
ÍNDICES DE CALIDAD PQI Y BQI DE LAS BIOMASAS EVALUADAS

Parámetro	SCS	SCB	RH	RS
C	0,54	0,51	0,68	0,73
N	0,46	0,64	0,68	1,46
S	4,00	0,15	0,33	3,00
Cl	8,38	-0,05	0,13	7,63
Cenizas	0,88	0,30	2,31	2,47
HHV (b.s.)	0,73	0,35	0,88	0,96
Humedad (b.r.)	0,66	0,40	0,09	0,87
BD (kg·m ⁻³)	0,76	0,52	0,34	0,24
BQI	16,40	2,82	5,43	17,36

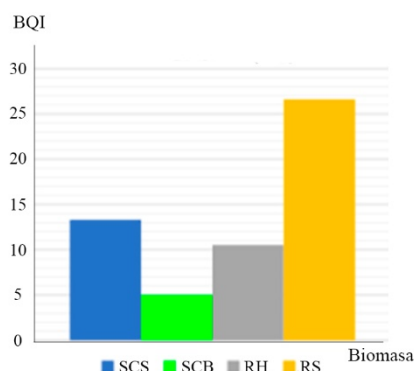


Fig. 6 Índice global de calidad de biomasa (BQI)

De acuerdo con los valores de BQI obtenidos, la biomasa SCB presentó el menor índice global (BQI = 2,82), posicionándose como la alternativa de mayor calidad entre las biomásas evaluadas, seguida muy de cerca por el RH cuyo índice BQI fue de 5,43. Estos resultados se atribuyen a un perfil composicional equilibrado, caracterizado por valores adecuados de los parámetros energéticos y bajas penalizaciones asociadas a elementos problemáticos como N, S, Cl y cenizas. En contraste, las biomásas RS y SCS presentaron valores de BQI elevados iguales a 17,36 y 16,40 respectivamente, lo que evidencia que las penalizaciones derivadas de su composición química superan los beneficios energéticos. Estos resultados indican que, aunque RS puede presentar ventajas energéticas puntuales como su mayor densidad energética, su composición química genera penalizaciones que limitan su aplicabilidad directa como biocombustible sólido.

IV CONCLUSIONES

1. El índice global de calidad de la biomasa (BQI) demostró ser una herramienta eficaz para la evaluación integral del potencial energético y de los riesgos operativos y ambientales de las biomásas estudiadas, al integrar de manera simultánea los aspectos físico-energéticos, termoquímicos y operativos. En este marco, el bagazo de caña de azúcar (SCB) y la cascarilla de arroz (RH) se posicionaron como los residuos más prometedores para procesos de conversión termoquímica, al presentar los menores valores de BQI iguales a 2,82 y 5,43 respectivamente.
2. La paja de arroz (RS) y las hojas de caña presentaron los mayores índices BQI con valores de 17,36 y 16,40 respectivamente lo que refleja una mayor penalización asociada a problemas operativos y ambientales.
3. Las biomásas SCS y SCB presentaron un mayor contenido de materia volátil en comparación con RH y RS, comportamiento consistente con sus mayores valores de poder calorífico superior (HHV). Esta característica se asocia con una mayor reactividad del combustible, una ignición más temprana y una mayor generación de gases combustibles, favoreciendo su desempeño energético durante la conversión termoquímica.
4. El análisis conjunto de los índices de escorificación, ensuciamiento y oxidación activa, evidenció que las

biomásas RH y SCB presentan el comportamiento operativo más favorable, mientras que SCS y RS exhiben una mayor propensión a problemas operativos, dominados por la presencia de álcalis y cloro reactivo. En este contexto, estrategias de pretratamiento, como el lavado con agua, permitirían reducir significativamente los contenidos de Na, K, Cl y S, mitigando los riesgos de deposición y corrosión, mientras que la densificación y la torrefacción se perfilan como alternativas efectivas para incrementar la densidad energética, mejorando simultáneamente el desempeño energético y operativo de las biomásas en procesos de conversión termoquímica.

REFERENCIAS

- [1] International Energy Agency, "Global Energy Review 2025," IEA, Paris, France, 2025.
- [2] S. V. Vassilev, C. G. Vassileva, and V. S. Vassilev, "Advantages and disadvantages of composition and properties of biomass in comparison with coal: An overview," *Fuel*, vol. 158, pp. 330–350, 2015.
- [3] I. Bukhari, F. Haq, M. Kiran, T. Aziz, S. Mehmood, and M. Haroon, "Lignocellulosic biomass as a renewable resource: Driving second-generation biofuel innovation from agricultural waste," *Biomass and Bioenergy*, vol. 201, art. no. 108133, 2025.
- [4] L. Nhleko and P. T. Sekoai, "Sugarcane bagasse: A sustainable feedstock for biorefinery portfolios in South Africa," *Fermentation*, vol. 11, no. 9, art. no. 489, 2025.
- [5] E. Assureira and M. Assureira, "Rice straw and sugarcane straw agrowaste for energy production: Physico-chemical characteristics and prediction of their thermal behaviour," in Proc. 22nd LACCEI Int. Multi-Conf. Eng., Educ. Technol. (LACCEI), San José, Costa Rica, Jul. 17–19, 2024, pp. 1–9.
- [6] Food and Agriculture Organization of the United Nations, "Agricultural production statistics 2010–2024," FAOSTAT Analytical Brief 121, Rome, Italy, 2025.
- [7] C. A. M. Moraes, I. J. Fernandes, D. Calheiro, A. G. Kieling, F. A. Brehm, M. R. Rigon, J. A. Berwanger Filho, I. A. H. Schneider, and E. Osorio, "Review of the rice production cycle: By-products and the main applications focusing on rice husk combustion and ash recycling," *Waste Management & Research*, vol. 32, no. 11, pp. 1034–1048, 2014.
- [8] R. Sindhu, E. Gnansounou, P. Binod, and A. Pandey, "Bioconversion of sugarcane crop residue for value added products: An overview," *Renewable Energy*, vol. 98, pp. 203–215, 2016.
- [9] Md. K. Islam, M. S. Khatun, Md. A. Arefin, M. R. Islam, and M. Hassan, "Waste to energy: An experimental study of utilizing the agricultural residue, MSW, and e-waste available in Bangladesh for pyrolysis conversion," *Heliyon*, vol. 7, Art. no. e08530, 2021.
- [10] S. V. Vassilev, D. Baxter, L. K. Andersen, and C. G. Vassileva, "An overview of the composition and application of biomass ash. Part 1: Phase-mineral and chemical composition and classification," *Fuel*, vol. 105, pp. 40–76, 2013.
- [11] V. Chaloupková, T. Ivanova, P. Hutla, and M. Špunarová, "Ash melting behavior of rice straw and calcium additives," *Agriculture*, vol. 11, no. 12, art. no. 1282, 2021.
- [12] E. Alakangas, "Quality guidelines of wood fuels in Finland," VTT Technical Research Centre of Finland, Espoo, Finland, Rep. VTT-M-04712-15, 2015.
- [13] *Standard Test Method for Bulk Density of Densified Particulate Biomass Fuels*, ASTM E873-82(2019), 2019.
- [14] *Standard Test Methods for Instrumental Determination of Carbon, Hydrogen, and Nitrogen in Laboratory Samples of Coal and Coke*, ASTM D5373-16, 2016.
- [15] *Standard Test Methods for Sulfur in the Analysis Sample of Coal and Coke Using High-Temperature Tube Furnace Combustion*, ASTM D4239-18, 2018.
- [16] *Standard Test Method for Chlorine in Coal*, ASTM D2361-17, 2017.
- [17] *Standard Test Method for Moisture Analysis of Particulate Wood Fuels*, ASTM E871-82(2019), 2019.

- [18] *Standard Test Method for Volatile Matter in the Analysis of Particulate Wood Fuels*, ASTM E872-82(2019), 2019.
- [19] *Standard Test Method for Ash in Wood*, ASTM D1102-84(2013), 2013.
- [20] *Standard Test Method for Gross Calorific Value of Coal and Coke*, ASTM D5865/D5865M-19, 2019.
- [21] *Standard Test Method for Major and Minor Elements in Coal and Coke Ash by X-Ray Fluorescence*, ASTM D4326-17, 2017.
- [22] *Standard Test Methods for Chemical Analysis of Hydraulic Cement*, ASTM C114-18, 2018.
- [23] *Standard Test Method for Ash in the Analysis Sample of Coal and Coke from Coal*, ASTM D3174-12(2018), 2018.
- [24] B. Gajera, A. Datta, N. Gakkhar, and A. K. Sarma, "Torrefied mustard straw as a potential solid biofuel: A study with physicochemical characterization and thermogravimetric and emission analysis," *BioEnergy Research*, vol. 16, pp. 2371–2385, 2023.
- [25] S. A. Vásquez Llanos, F. M. Carbajal Gamarra, J. T. Medina Collana, S. Huangal Scheineder, J. C. Mesia Chuquizuta, P. Córdova Mendoza, and A. P. Barturen Quispe, "Estimation of emission factors and ignitability index from the physicochemical characterization of *Ficus benjamina* for energy purposes," *Chemical Engineering Transactions*, vol. 103, pp. 931–936, 2023.
- [26] G. Toscano, G. Riva, E. F. Pedretti, and D. Duca, "Effect of the carbon oxidation state of biomass compounds on the relationship between GCV and carbon content," *Biomass and Bioenergy*, vol. 48, pp. 231–238, 2013.
- [27] G. Toscano, C. De Francesco, T. Gasperini, S. Fabrizi, D. Duca, and A. Ilari, "Quality assessment and classification of feedstock for bioenergy applications considering ISO 17225 standard on solid biofuels," *Resources*, vol. 12, art. no. 69, 2023.
- [28] J. Lachman, M. Baláš, M. Lisý, H. Lisá, P. Milčák, and P. Elbl, "An overview of slagging and fouling indicators and their applicability to biomass fuels," *Fuel Processing Technology*, vol. 217, art. no. 106804, 2021.
- [29] Y. Zhu, Y. Niu, H. Tan, and X. Wang, "Short review on the origin and countermeasure of biomass slagging in grate furnace," *Frontiers in Energy Research*, vol. 2, art. no. 7, 2014.
- [30] P. Sommersacher, T. Brunner, and I. Obernberger, "Fuel indexes: A novel method for the evaluation of relevant combustion properties of new biomass fuels," *Energy & Fuels*, vol. 26, no. 1, pp. 380–390, 2012.
- [31] S. V. Vassilev, D. Baxter, and C. G. Vassileva, "An overview of the behaviour of biomass during combustion: Part II. Ash fusion and ash formation mechanisms of biomass types," *Fuel*, vol. 117, pp. 152–183, 2014.
- [32] S. Rocha, O. Candia, F. Valdebenito, J. F. Espinoza-Monje, and L. Azócar, "Biomass quality index: Searching for suitable biomass as an energy source in Chile," *Fuel*, vol. 264, art. no. 116820, 2020.
- [33] I. Obernberger, T. Brunner, and G. Bärthaler, "Chemical properties of solid biofuels—significance and impact," *Biomass and Bioenergy*, vol. 30, no. 11, pp. 973–982, 2006.
- [34] H. Najafi, A. G. Sani, and M. A. Sobati, "A comparative evaluation on the physicochemical properties of sugarcane residues for thermal conversion processes," *Industrial Crops and Products*, vol. 202, art. no. 117112, Nov. 2023, doi: 10.1016/j.indcrop.2023.117112.
- [35] A. I. de Lucas Herguedas, C. del Peso Taranco, and E. Rodríguez García, *Biomasa, biocombustibles y sostenibilidad*. Palencia, Spain: ITAGRA.CT, 2012.
- [36] P. McKendry, "Energy production from biomass (part 1): Overview of biomass," *Bioresource Technology*, vol. 83, pp. 37–46, 2002.
- [37] A. A. Adeleke, J. K. Odusote, P. P. Ikubanni, O. A. Lasode, M. Malathi, and D. Paswan, "The ignitability, fuel ratio and ash fusion temperatures of torrefied woody biomass," *Heliyon*, vol. 6, Art. no. e03582, 2020.
- [38] *Solid biofuels — Fuel specifications and classes — Part 7: Graded non-woody briquettes*, ISO 17225-7:2021, 2021.