

# Bio-carbón de hojas de caña de azúcar para su empleo como combustible y agente reductor en procesos de reducción directa del mineral de hierro

Estela Assureira, Mg.<sup>1</sup>, Marco Assureira, Ing.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Pontificia Universidad Católica del Perú, Perú, eassure@pucp.edu.pe

<sup>2</sup>Pontificia Universidad Católica del Perú, Perú, assureira.ma@pucp.edu.pe

*Abstract- Las hojas de caña de azúcar, residuos de cosecha, pueden ser usadas como una fuente renovable de energía para la generación de calor y como agente reductor en procesos de reducción directa del mineral de hierro. Sin embargo, los altos contenidos de ceniza, azufre y álcalis contribuyen a la ocurrencia de problemas de escorificación, ensuciamiento y corrosión en los equipos de uso; lo que sumado a su bajo poder calorífico y de contenido de carbono fijo, limitan su empleo en este campo.*

*En este trabajo se presentan los resultados de los tratamientos combinados de lavado con agua, tostación y carbonización, aplicados a las hojas de caña para lograr una mejora de sus propiedades como combustible y agente reductor.*

*Las hojas fueron cortadas a un tamaño entre 5 a 20 mm para su lavado que se realizó con agua de caño, a 20°C, en proporción de 15 litros por kilogramo de hojas, con remojo durante 24 horas sin agitación, seguido de media hora con agitación periódica. El tostado de las hojas lavadas se ejecutó por lotes, a presión atmosférica, con limitada presencia de oxígeno, en un reactor cilíndrico horizontal que gira a 60 rpm. La temperatura de tostación fue de 270 °C, con tiempo de residencia de 20 minutos. La carbonización de las hojas tostadas se llevó a cabo en un horno de mufla, a 600 °C por 90 minutos, obteniéndose como producto final un bio-carbón.*

*Las hojas de caña sin tratamiento y las hojas tratadas fueron caracterizadas por análisis inmediato, análisis elemental y poder calorífico. Los resultados indican que el bio-carbón de caña obtenido presenta mejoras significativas respecto al material original. Se aprecia una reducción de la materia volátil a un valor de 18.27%, y un significativo incremento del contenido de carbono fijo registrando un valor de 66.54% lo que resulta ser 7.87 veces más que lo reportado por el residuo sin tratamiento, mientras que el poder calorífico superior alcanzó un valor de 34.33 MJ/kg implicando un incremento de más del doble del valor original asemejándose a un carbón mineral. En lo que respecta al contenido de azufre, si bien se observa que sufre un ligero incremento, su valor aún se mantiene bastante bajo (0.27 %) lo que es adecuado para carbones usados como agentes reductores. Adicionalmente, el bio-carbón obtenido es friable, fácil de moler, y posee características hidrofóbicas y es resistente a la biodegradación.*

*Palabras clave- Hojas de caña de azúcar, Lavado, Torrefacción, Carbonización, Reducción directa hierro.*

Digital Object Identifier (DOI):

<http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2021.1.1.28>

ISBN: 978-958-52071-8-9 ISSN: 2414-6390

# Bio-carbón de hojas de caña de azúcar para su empleo como combustible y agente reductor en procesos de reducción directa del mineral de hierro

Estela Assureira, Mg.<sup>1</sup>, Marco Assureira, Ing.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Pontificia Universidad Católica del Perú, Perú, eassure@pucp.edu.pe  
<sup>2</sup>Pontificia Universidad Católica del Perú, Perú, assureira.ma@pucp.edu.pe

**Abstract-** Las hojas de caña de azúcar, residuos de cosecha, pueden ser usadas como una fuente renovable de energía para la generación de calor y como agente reductor en procesos de reducción directa del mineral de hierro. Sin embargo, los altos contenidos de ceniza, azufre y álcalis contribuyen a la ocurrencia de problemas de escoriación, ensuciamiento y corrosión en los equipos de uso; lo que sumado a su bajo poder calorífico y de contenido de carbono fijo, limitan su empleo en este campo.

En este trabajo se presentan los resultados de los tratamientos combinados de lavado con agua, tostación y carbonización, aplicados a las hojas de caña para lograr una mejora de sus propiedades como combustible y agente reductor.

Las hojas fueron cortadas a un tamaño entre 5 a 20 mm para su lavado que se realizó con agua de caño, a 20°C, en proporción de 15 litros por kilogramo de hojas, con remojo durante 24 horas sin agitación, seguido de media hora con agitación periódica. El tostado de las hojas lavadas se ejecutó por lotes, a presión atmosférica, con limitada presencia de oxígeno, en un reactor cilíndrico horizontal que gira a 60 rpm. La temperatura de tostación fue de 270 °C, con tiempo de residencia de 20 minutos. La carbonización de las hojas tostadas se llevó a cabo en un horno de mufla, a 600 °C por 90 minutos, obteniéndose como producto final un bio-carbón.

Las hojas de caña sin tratamiento y las hojas tratadas fueron caracterizadas por análisis inmediato, análisis elemental y poder calorífico. Los resultados indican que el bio-carbón de caña obtenido presenta mejoras significativas respecto al material original. Se aprecia una reducción de la materia volátil a un valor de 18.27%, y un significativo incremento del contenido de carbono fijo registrando un valor de 66.54% lo que resulta ser 7.87 veces más que lo reportado por el residuo sin tratamiento, mientras que el poder calorífico superior alcanzó un valor de 34.33 MJ/kg implicando un incremento de más del doble del valor original asemejándose a un carbón mineral. En lo que respecta al contenido de azufre, si bien se observa que sufre un ligero incremento, su valor aún se mantiene bastante bajo (0.27 %) lo que es adecuado para carbones usados como agentes reductores. Adicionalmente, el bio-carbón obtenido es friable, fácil de moler, y posee características hidrofóbicas y es resistente a la biodegradación.

**Palabras clave-** Hojas de caña de azúcar, Lavado, Torrefacción, Carbonización, Reducción directa hierro.

## I. INTRODUCCIÓN

La industria del hierro y acero son altamente consumidores de energía para el desarrollo de sus procesos, abarcando cerca del 20% del total anual de energía demandada por el sector industrial. Ese requerimiento es cubierto por el uso intensivo de combustibles fósiles, principalmente carbón de coque, siendo utilizados no sólo como fuente de calor para los procesos sino también como

agente reductor del mineral de hierro, ocasionando grandes emisiones de CO<sub>2</sub> al ambiente teniendo una participación de cerca del 6.7% del total de CO<sub>2</sub> emitido [1].

Hoy en día, el consumo de energía y la contaminación ambiental representan los principales desafíos para la industria siderúrgica, cuyo crecimiento requiere una atención seria respecto al desarrollo de procesos económicamente viables y respetuosos con el medio ambiente [1]. Para cumplir este objetivo se están haciendo esfuerzos en desarrollar tecnologías de producción más eficientes así como tratar de trabajar con materiales menos contaminantes.

El proceso del alto horno sigue siendo el método tradicional y predominante para la producción primaria de hierro abarcando cerca del 70% de la producción mundial de acero [1], [2]. Esta es la ruta denominada BF-BOF (Blast Furnace - Basic Oxygen Furnace) [3] la cual, tiene como desventajas requerir grandes volúmenes de producción para ser rentable y ser un sistema rígido siendo difícil efectuar cambios [4] lo cual, a impulsado el desarrollo de procesos alternativos como el de reducción directa (DR-EAF: Direct Reduction - Electric Arc Furnace) proceso que ha alcanzado un nivel de aplicabilidad comercial y se considera como la ruta alternativa de fabricación de hierro más desarrollada [2], [3], permitiendo sortear muchas de las dificultades del proceso de alto horno al poder emplear otros materiales diferentes al coque y permitir trabajar a menores escalas [4].

La tecnología de reducción directa del mineral de hierro se considera un método de producción prometedor y limpio para la fabricación de hierro. En un típico proceso de reducción directa, el carbón y el gas natural son utilizados como combustibles de reemplazo del coque metalúrgico [5]. El proceso permite obtener hierro metálico por reducción del mineral de hierro, sin que las temperaturas involucradas superen la temperatura de fusión de cualquiera de los componentes. La reducción, se realiza mediante la utilización de gases reductores ricos en hidrógeno (H<sub>2</sub>) y monóxido de carbono (CO). El mineral de hierro, en la forma de pellets o en terrones, se introduce a través de una tolva que alimenta al horno reductor el cual, se calienta mientras que los gases reductores reaccionan con el mineral capturando el oxígeno del hierro, dando lugar a un hierro reducido denominado hierro esponja (Sponge Iron) [6] el cual constituye una excelente materia prima para la fabricación de acero de alta calidad para los hornos de arco eléctrico (EAF) como sustituto de la chatarra [7].

En el proceso convencional de alto horno (BF: blast furnace), los minerales de carbón y de hierro deben coquizarse y sinterizarse respectivamente para alcanzar la

calidad, la resistencia y el diámetro metalúrgico requeridos antes de que puedan cargarse en el horno como materia prima para la fabricación de hierro. Por el contrario, en el proceso de reducción directa en hornos de hogar rotatorio (RHF: rotary hearth furnace), los minerales de carbón y los minerales de hierro se pueden mezclar a través de una reacción de reducción carbotérmica para producir pellets de hierro esponja (DRI) a alta temperatura [8].

La tecnología de reducción directa constituye un avance en la mejora del proceso productivo sin embargo, para responder a la creciente escasez de energía y a los desafíos de reducción de gases de efecto invernadero, se requiere sumar otros esfuerzos adicionales, tales como la incorporación de fuentes de energía renovable, como la biomasa, a los procesos metalúrgicos en reemplazo del coque [5].

La biomasa presenta una interesante posibilidad de mitigar las emisiones de CO<sub>2</sub> en la fabricación de hierro y acero, al ofrecer un agente reductor neutro de dióxido de carbono y renovable, a la mezcla de materias primas de la industria siderúrgica. Durante la etapa de crecimiento, la biomasa absorbe el dióxido de carbono liberado por su combustión a través de la fotosíntesis. El interés en la biomasa ha aumentado durante los años debido a la conciencia social de los gases de efecto invernadero y el cambio climático. También, el aumento del precio del coque y el debilitamiento de la disponibilidad de agentes reductores basados en fósiles, de alta calidad, hace que los productores de acero busquen nuevas soluciones [9]. De los tipos de biomasa existentes sólo los productos madereros y los residuos agrícolas presentan adecuadas posibilidades y características para su empleo en procesos metalúrgicos [10], y dado su ciclo neutro de CO<sub>2</sub> el bio-coque obtenido por la sustitución parcial del coque con carbonizados de biomasa contribuiría a la reducción de emisiones contaminantes [11].

El uso de la biomasa presenta muchos beneficios tanto desde el punto de vista económico como ecológico. Sin embargo, debido a sus características físicas (baja densidad, baja capacidad de molienda, alto contenido de humedad y volátiles) e insuficiente poder calorífico, las biomasa deben ser sometidas a pre-tratamientos de mejora de sus propiedades, como paso previo a su empleo en la producción de hierro, tales como los procesos de carbonización y torrefacción a fin de producir un material carbonoso con propiedades similares a los de un combustible fósil [1], [10].

La pirolisis puede ser definida como un proceso de descomposición térmica del material en una atmósfera libre de oxígeno o en una atmósfera pobre en oxígeno a temperaturas sobre los 300°C. Típicamente la carbonización es producida a temperaturas entre 400°C y 500°C, y ocasionalmente a 600°C. La torrefacción en cambio, es un proceso de pirolisis media con una temperatura de operación máxima entre 300°C y 350°C [12].

Los contenidos de carbono fijo, materia volátil y el valor del poder calorífico así como la cantidad de material carbonoso obtenido luego del pre-tratamiento, dependerán de las condiciones del proceso de pirolisis aplicado (temperatura y tiempo) así como de las características de la biomasa [1].

Si analizamos a la biomasa en un diagrama de Van Krevelen que ilustra las relaciones O: C y H: C para varios combustibles sólidos, en comparación con los combustibles

fósiles, se puede observar que la biomasa tiene las mayores proporciones O:C y H:C. La mayor proporción de oxígeno e hidrógeno en comparación con el carbono reduce el valor calorífico de los combustibles sólidos debido a que los enlaces C-O y las C-H tienen una energía menor que los enlaces C-C. Basado en esto se considera que la biomasa en estado virgen no puede ser utilizada directamente en muchas aplicaciones sin antes de haber pasado por alguno de los procesos de pre-tratamiento señalados [1].

Las propiedades térmicas de los bio-carbones obtenidos dependen de las características de la materia prima y de la temperatura de carbonización durante la pirolisis. De manera similar, los efectos sobre la materia volátil y el contenido de carbono fijo son más dependientes de la temperatura de pirolisis, mientras que los contenidos de ceniza del bio-carbón son dependientes de la composición del material de alimentación más que la temperatura de pirolisis [13].

El éxito tecnológico del empleo de biomasa en la industria del acero está determinado por sus propiedades químicas, físico-químicas y mecánicas. Los requerimientos de calidad del material dependen también del modo de uso. La transformación de la biomasa en un producto carbonizado o torrefactado le otorga la calidad adecuada para su empleo en procesos metalúrgicos vía inyección en hornos, material de carga, mezclas con carbón, combustible para la sinterización o generación de gas de reducción [12].

El agotamiento de los combustibles fósiles y el problema de emisiones contaminantes que su uso genera, no sólo afecta a la industria del acero sino también a toda la industria en general. En la búsqueda por contar con fuentes alternativas de energía más amigables con el ambiente, como es el caso de la biomasa, la primera mirada estuvo enfocada a un uso intensivo de productos y residuos madereros para la producción de calor, por sus cualidades y disposición. Sin embargo, se avizora limitaciones futuras, por ello la mirada actual de los investigadores está puesta en el uso de la biomasa residual agrícola como sustituto debido a su importante contenido energético (similar al de la madera), escasas aplicaciones, bajo costo, gran abundancia y suministro sostenible [14]. Una ventaja importante del uso de los residuos agrícolas es que no están relacionados directamente al uso del suelo no compitiendo así con la producción de alimentos. Además, tienen un bajo costo ya que son subproductos de las operaciones existentes [15].

Los residuos agrícolas producen cenizas que generalmente tienen altos contenidos de álcalis que causan problemas de escorificación y ensuciamiento en calderas y hornos. Estos problemas ocasionados por las cenizas están relacionados con la presencia de ciertos elementos en el combustible como metales alcalinos y alcalinotérreos, cloruro, sílice y azufre. De los elementos alcalinos, el potasio es el principal constituyente de la biomasa debido a su papel como macronutriente en la nutrición vegetal [16]. El comportamiento de ceniza y las tendencias de deposición se pueden predecir mediante el uso de índices empíricos [17]. Si bien, el pre-tratamiento de torrefacción mejora las propiedades de la biomasa como combustible, así como su fragilidad e hidrofobia [18], desafortunadamente no elimina los elementos inorgánicos en la biomasa y, por lo tanto, no mejora muchas de las biomasa de baja calidad que tienen cenizas, Cl, N o S [18], [19], siendo esto aún un desafío

debido a una gran cantidad de minerales inorgánicos que permanecen en la biomasa torrefactada, especialmente en ciertos residuos agrícolas como la paja de arroz y la cáscara de arroz, que generalmente contienen altos contenidos de metales alcalinos y alcalinotérreos. Por lo tanto, para mejorar la calidad de los productos de pirólisis, un pre-tratamiento aplicado a la biomasa, antes de la pirólisis, es un enfoque alternativo y eficiente [18].

Se vienen desarrollando desde hace varios años diversas investigaciones orientadas a modificar las características adversas que presentan algunas biomásas, principalmente los residuos herbáceos, las mismas que se pueden dividir en procesos mecánicos y químicos a baja y alta temperatura [20]. Los procesos mecánicos consisten en la adición de aditivos como hidróxido de calcio cuyo efecto es modificar la composición de la ceniza. Los procesos químicos a baja temperatura consisten en el uso un medio líquido con la finalidad de extraer los componentes solubles. Algunas investigaciones muestran que lavar biomasa es una técnica que reduce el contenido de los álcalis existentes, lo que permite su uso como combustible [21]. El lavado con agua y ácido generalmente se denotan como lixiviación, un pre-tratamiento que se utiliza para eliminar Cl y metales alcalinos [22]. Se sabe que el lavado con ácido es un método eficiente de pre-tratamiento para eliminar la mayoría de los metales alcalinos y alcalinotérreos de la biomasa [18]. Sin embargo, teniendo en cuenta los impactos negativos, como causar la rotura de la unión de hidrocarburos y la erosión de la estructura de la fibra en la biomasa [23], el alto costo de los ácidos y el riesgo de contaminación para el medio ambiente, el lavado con agua es considerado como un mejor método para eliminar los elementos problemáticos (K, Cl y S) de la biomasa [18]. Dado que la mayoría de los elementos inorgánicos que deben ser removidos de la biomasa con excepción del silicio son solubles en agua, este proceso debe ser realizado de acuerdo a las características propias de la biomasa escogida para lograr los efectos deseados [24].

Experiencias demuestran que se puede lograr un porcentaje de remoción importante al sumergir por un periodo de tiempo a la biomasa en agua caliente y con agitación. El periodo de inmersión y la proporción biomasa / agua o concentración son dos variables íntimamente ligadas a la efectividad del proceso de remoción [25].

La agroindustria y la industria forestal en el Perú generan anualmente más de 10 millones de toneladas de materiales de desecho de forma sostenida que podrían convertirse en energía y bio-materiales. En este contexto, la industria de la caña de azúcar genera alrededor de 2 millones de toneladas de hojas de caña de azúcar que no tienen ningún uso y se queman en los campos para reducir el daño al suelo y los problemas fitosanitarios causados por su acumulación y debido a su uso limitado [26]. Sin embargo, la quema abierta después de la cosecha produce emisiones que tienen un efecto perjudicial sobre la calidad del aire y la salud humana.

El desarrollo de un proceso tecnológico que utilice este residuo para la reducción del hierro y producción de acero, le otorga un valor contribuyendo no sólo a la reducción del uso del carbón de coque y de los gases de efecto invernadero generados en los procesos de combustión y reducción, sino

también, permite disminuir la contaminación y los problemas que ocasiona la quema del residuo en los campos de cultivo.

En este estudio se investigó los efectos logrados por la combinación de los pre-tratamientos de lavado, tostado y carbonización aplicados a las hojas de caña para mejorar sus propiedades térmicas, características como combustible y agente reductor por su transformación en un bio-carbón. La reducción en el contenido de ceniza, S así como el incremento en el poder calorífico y en el contenido de carbono fijo son reportados.

## II. METODOLOGÍA

El trabajo de investigación desarrollado permite la valorización del residuo hojas de caña de azúcar mediante su transformación en un bio-carbón para su empleo como combustible para la generación de calor y, al mismo tiempo, como agente reductor en procesos de reducción directa del mineral de hierro para la obtención de pellets de hierro esponja, materia prima para la producción de acero.

La investigación se realizó según las siguientes etapas: caracterización físico-química de las hojas de caña; picado, tamizado y lavado; secado; tostado y, carbonizado de las hojas tal como se muestra en la Fig.1.

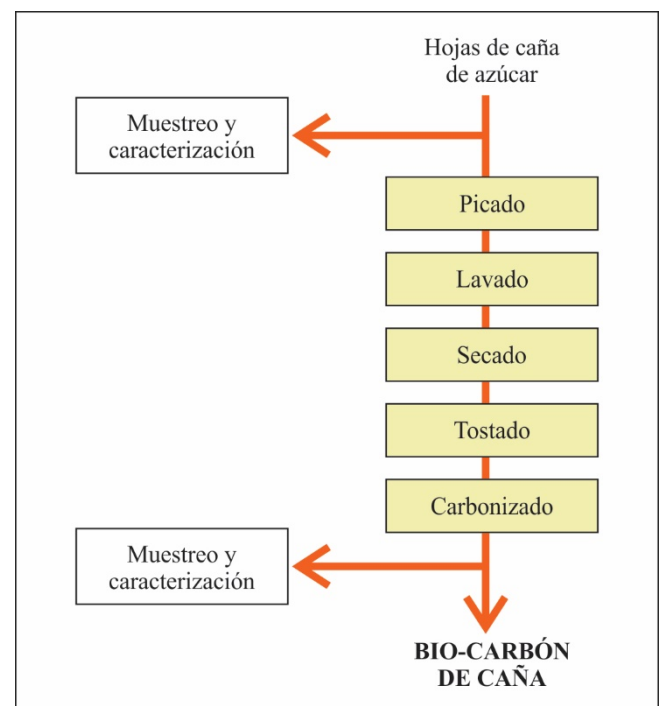


Fig. 1 Proceso para la obtención del bio-carbón de hojas caña

Las hojas de caña de azúcar (ver Fig. 2), fueron recolectadas y muestreadas luego, se caracterizaron mediante las siguientes pruebas: análisis inmediato (ASTM D7582), análisis elemental (ASTM D5373), contenido de azufre (ASTM D4239), poder calorífico (ASTM D5865), análisis de cenizas por el método de fluorescencia de rayos X (FRX), pérdida al fuego (ASTM C25-17) y densidad (UNE - EN 15103). Los resultados obtenidos evidenciaron serias limitaciones del residuo para su uso energético y como agente reductor lo que determinó el diseño, desarrollo y aplicación de los tratamientos de lavado, tostación y carbonización para

mejorar sus propiedades y características transformando a las hojas de caña en un bio-carbón adecuado para su uso como combustible y agente reductor en procesos de reducción directa del mineral de hierro.



Fig. 2 Hojas de caña de azúcar sin tratamiento

El proceso se inicia con la adecuación de las hojas de caña para el lavado, lo que consistió en la reducción del tamaño de las hojas a dimensiones comprendidas entre 5 mm a 20 mm. Esto favorece la remoción, durante el lavado, de ciertos elementos perjudiciales para su empleo como combustible y agente reductor. Adicionalmente, facilita el manejo y almacenamiento del residuo dadas las mayores dimensiones de las hojas de caña recolectadas y su baja densidad.

El lavado de las hojas de caña, cuyo objetivo fue lograr la disminución de los contenidos de ceniza, álcalis ( $K_2O$  y  $Na_2O$ ) y S presentes, se realizó con agua a diferentes condiciones de operación, eligiéndose este medio de lavado por la posibilidad de reutilizar la solución obtenida como fertilizante para los suelos. Se ensayaron 16 condiciones de lavado teniendo como variables el tipo de agua utilizada (agua corriente, agua destilada), la concentración (3.33%, 6.67%) que es el ratio sólido / agua, la temperatura del agua (20°C, 80°C), el tiempo de permanencia de las hojas en el agua (30 minutos, 24 horas) y el periodo de agitación tal como se puede apreciar en la Tabla I.

La efectividad en la remoción de álcalis y S se determinó de manera indirecta por la cantidad de sólidos disueltos presentes en el agua de lavado para lo cual, se midió el valor de la conductividad eléctrica del agua empleando un conductímetro marca HANNA, modelo HI 99301. Los ensayos se replicaron 3 veces para cada condición de lavado considerando el valor promedio como medida final. Luego, se seleccionó la condición de lavado en función al valor de conductividad eléctrica registrada, a mayor valor mayor es la efectividad en la remoción. Otro aspecto que se consideró para la selección fue que el proceso de lavado a aplicar pueda también ser replicable con facilidad y a bajo costo.

Luego del lavado, bajo la condición seleccionada, se procedió al secado de las hojas en horno eléctrico a 105 °C por 3 horas.

TABLA I  
CARACTERÍSTICAS DE LAS CONDICIONES DE LAVADO  
DE LAS HOJAS DE CAÑA DE AZÚCAR ENSAYADAS

Muestra	Líquido	CW (%)	T (°C)	Tiempo	Agitación
HC-AD1	AD	3.33	20	24 hr	No
HC-AD2	AD	3.33	20	24 hr	Sí
HC-AD3	AD	3.33	20	30 min	Sí
HC-AD4	AD	3.33	80	30 min	Sí
HC-AC5	AC	3.33	20	24 hr	No
HC-AC6	AC	3.33	20	24 hr	Sí
HC-AC7	AC	3.33	20	30 min	Sí
HC-AC8	AC	3.33	80	30 min	Sí
HC-AD9	AD	6.67	20	24 hr	No
HC-AD10	AD	6.67	20	24 hr	Sí
HC-AD11	AD	6.67	20	30 min	Sí
HC-AD12	AD	6.67	80	30 min	Sí
HC-AC13	AC	6.67	20	24 hr	No
HC-AC14	AC	6.67	20	24 hr	Sí
HC-AC15	AC	6.67	20	30 min	Sí
HC-AC16	AC	6.67	80	30 min	Sí

HC (Hoja de caña sin tratamiento); AD (Agua destilada); AC (Agua de caño)

La etapa de tostación, cuyo objetivo fue aumentar la grindabilidad, mejorar las características hidrofóbicas e incrementar el poder calorífico de las hojas de caña, se realizó en una tostadora de café adaptada para el proceso. Las hojas de caña fueron introducidas a la cámara interna del reactor en cantidad de 70 gramos por lote. La cámara interna, donde ocurre el proceso, tiene forma cilíndrica, está en posición horizontal y gira a una velocidad 60 rpm; posee pequeños orificios en la parte posterior para permitir el escape de los gases, vapores y particulado fino, generados durante el proceso, hacia el sistema de evacuación compuesto por un ciclón y chimenea. El ciclón facilita la extracción y separación del particulado mientras que los gases y vapores salen por la chimenea. La Fig. 3 muestra un esquema de la instalación.

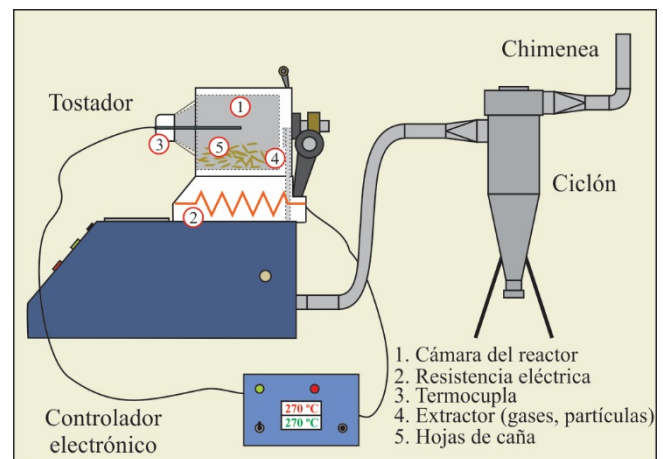


Fig. 3 Equipo de tostación y sistema de evacuación de gases



La cámara es calentada externamente por una resistencia eléctrica controlada por un dispositivo electrónico que regula el voltaje suministrado así como, su encendido y apagado en función de la temperatura sensada al interior de la cámara vs la temperatura de tostación establecida para el proceso en el controlador electrónico.

El proceso de tostación se realizó a presión atmosférica y con limitada presencia de oxígeno. La velocidad de calentamiento, hasta alcanzar la temperatura de tostación, fue en promedio de 18°C/min. La temperatura de tostación se encuentra en el rango de 250 a 300°C, siendo el valor fijado para el proceso de 270°C. Esta temperatura se mantuvo constante por un tiempo de 20 minutos (tiempo de residencia) luego de lo cual, se dejaron enfriar las hojas al interior del reactor, para evitar auto-combustión, por un tiempo de 15 minutos para finalmente, proceder a su descarga, pesaje, almacenamiento y caracterización.

La caracterización de las hojas tostadas se realizó a través del análisis inmediato, análisis elemental y determinación del poder calorífico, siguiendo para ello los procedimientos establecidos por las normas ASTM D7582, ASTM D5373 - ASTM D4239 y ASTM D5865 respectivamente.

En lo que respecta al proceso de carbonización de las hojas tostadas este se realizó en un horno de mufla marca RELES, modelo M 1/d CH, con capacidad de 2.6 litros y cuya temperatura máxima de operación es de 1150 °C.

La carbonización se realizó por lotes, procesando de 30 a 36 gramos de material tostado por vez, para lo cual se colocaron las hojas tostadas en recipientes de aluminio sellados. La velocidad de calentamiento del horno fue de 15 a 20°C/min hasta alcanzar una temperatura de carbonización fijada en 600°C, siendo el tiempo de permanencia a esta temperatura de 90 minutos luego de lo cual, con ayuda de una pinza, se extrajo el recipiente con las hojas carbonizadas y sin abrirlo, se dejó enfriar de forma natural para finalmente, vaciar y almacenar el material carbonizado producido.

La caracterización de las hojas lavadas, tostadas y carbonizadas se realizó a través del análisis inmediato, análisis elemental y determinación del poder calorífico, siguiendo para ello los procedimientos establecidos por las normas ASTM D7582, ASTM D5373 - ASTM D4239 y ASTM D5865 respectivamente. Adicionalmente, se determinó las relaciones atómicas de oxígeno e hidrógeno vs carbono (O/C y H/C) y utilizó el diagrama Van Krevelen para su comparación con otros combustibles sólidos según el grado de carbonización alcanzado.

### III.RESULTADOS

#### A. Caracterización de la hoja de caña

Se trabajó con hoja de caña de azúcar, que es un residuo biomásico agro-industrial resultante de un proceso de cosecha mecanizado (corte en verde), para su transformación en un bio-carbón a ser usado como combustible y agente reductor en procesos siderúrgicos. En la Tabla II se reportan las propiedades de la muestra de hoja de caña de azúcar analizada codificada como HC, los resultados de los análisis inmediato y elemental aplicados al residuo están expresados como porcentaje en peso en base seca, mientras que el poder calorífico se da en MJ/kg.

TABLA II  
RESULTADOS DEL ANÁLISIS INMEDIATO, ELEMENTAL Y DE PODER CALORÍFICO DE LAS HOJAS DE CAÑA ANTES Y LUEGO DE LOS TRATAMIENTOS TERMOQUÍMICOS APLICADOS

Parámetro	HC	HC-LT	HC-LTC
Ceniza	7.33	7.94	15.18
Materia Volátil	84.21	56.79	18.27
Carbono fijo	8.46	35.26	66.54
C	42.06	59.01	72.77
H	6.16	4.94	3.02
S	0.43	0.18	0.27
N	0.35	0.65	0.78
O	43.67	27.28	7.98
PCS (MJ/kg)	16.07	28.59	34.33
PCI (MJ/kg)	14.06	27.20	32.78

HC (Hoja sin tratamiento); HC-LT (Hoja lavada y tostada); HC-LTC (Hoja lavada, tostada y carbonizada).

Valores expresados en % en peso – base seca.

La caracterización físico-química del residuo reporta una humedad de 12.5% (medida como % peso, base recibida), además presenta un bajo contenido de carbono fijo, con valor de 8.46%, lo que es negativo para su empleo como agente reductor; el azufre está alrededor de 0.43% lo que es perjudicial desde el punto de vista de emisiones y corrosión de los equipos; posee un alto contenido de materia volátil, con valor de 84.21%, el contenido de cenizas es de 7.33% y su composición presenta un alto porcentaje de álcalis ( $K_2O = 12.6\%$ ,  $Na_2O = 2.0\%$ ) lo cual, evidenciaría la probabilidad de ocurrencia de problemas de alcalinidad y ensuciamiento en los equipos donde se utilice el residuo como combustible. El poder calorífico superior es de 16.07 MJ/kg valor común en biomásas herbáceas pero bajo respecto a carbones empleados en procesos de reducción. Adicionalmente, el residuo presenta una baja densidad, con valor de 17 kg/m<sup>3</sup>, lo que dificulta su manipulación y almacenamiento.

#### B. Selección de la condición de lavado y sus efectos

La efectividad en la remoción de álcalis y S se determinó por la cantidad de sólidos disueltos presentes en el agua de lavado lo que se estimó, de manera indirecta, midiendo el valor de la conductividad eléctrica del agua luego del lavado (CE) expresada en mS/cm.

Los ensayos se replicaron 3 veces para cada una de las 16 condiciones de lavado establecidas considerando el valor promedio como medida final, los resultados obtenidos se presentan en la Tabla III. Se observa que los valores más altos de conductividad eléctrica se dan para concentraciones de 6.67% tanto para el caso de trabajar con agua destilada (AD) o con agua de caño (AC). La Fig. 4 presenta algunas muestras del agua de lavado obtenida. La selección del proceso de lavado más conveniente a aplicar consideró no sólo la efectividad del proceso sino también la posibilidad de su facilidad de replicación a bajo costo.

En base a lo anterior, el proceso de lavado seleccionado fue el codificado como HC-AC14 el cual, se realiza con agua

de caña en una proporción de 15 litros por kilogramo de hojas, a 20°C, por remojo durante 24 horas sin agitación, seguido de media hora adicional con agitación periódica. La conductividad eléctrica del agua registrada fue en promedio de 2.57 mS/cm, que es un indicador del buen nivel de remoción logrado y que resultó incluso bastante cercano a los reportados con agua destilada.



Fig. 4 Muestras del agua de lavado obtenida para diferentes ensayos

Debido al proceso de lavado aplicado se reduce significativamente el nivel de azufre, en 60.47%, así como el contenido de cenizas en un 13.92% y de álcalis, minimizando así la probabilidad de ocurrencia de escorificación, ensuciamiento, corrosión y erosión en los equipos donde se empleen como combustible y agente reductor además de los beneficios ambientales como reducción de emisiones contaminantes como son las de SO<sub>x</sub>.

TABLA III  
CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA (CE) DEL AGUA DE LAVADO

Muestra	CE -1 (mS/cm)	CE -2 (mS/cm)	CE -3 (mS/cm)	Promedio (mS/cm)
HC-AD1	1.46	1.47	1.47	1.47
HC-AD2	1.52	1.53	1.53	1.53
HC-AD3	1.07	1.07	1.07	1.07
HC-AD4	1.70	1.70	1.70	1.70
HC-AC5	1.30	1.31	1.31	1.31
HC-AC6	1.35	1.35	1.35	1.35
HC-AC7	0.87	0.86	0.87	0.87
HC-AC8	1.59	1.59	1.59	1.59
HC-AD9	2.62	2.60	2.60	2.61
HC-AD10	2.73	2.73	2.73	2.73
HC-AD11	1.83	2.02	2.01	1.95
HC-AD12	2.73	2.74	2.94	2.80
HC-AC13	2.39	2.41	2.43	2.41
HC-AC14	2.57	2.58	2.57	2.57
HC-AC15	1.81	1.80	1.81	1.81
HC-AC16	2.45	2.45	2.45	2.45

Valores obtenidos descontando la CE del agua de lavado  
CE: agua destilada = 0.05mS/cm; agua caña = 0.51 mS/cm

### C. Efecto del proceso de tostado en las hojas de caña

Las muestras de hoja de caña de azúcar a ser tostadas, luego del proceso de lavado, fueron codificadas como HC-LT y caracterizadas por análisis inmediato, elemental y poder calorífico. Debido al proceso de tostado la humedad del material reporta un valor de 4.86% (medida como % peso en base recibida) lo que significa una reducción de 61.12% respecto del valor de las hojas sin tratamiento. También, como se aprecia en la Tabla II la materia volátil se redujo en 32.56%, las cenizas aumentaron ligeramente en cerca de 8%, y el carbono fijo aumentó considerablemente en más de 4.1 veces su valor original pasando de un valor de 8.46% a 32.26%. Adicionalmente, el contenido de azufre disminuyó en 58.14% registrando un valor de 0.18%. Los poderes caloríficos superior e inferior de las hojas tostadas, medidos en base seca, fueron de 28.59 MJ/kg y 27.20 MJ/kg respectivamente, evidenciando una significativa mejora respecto de los valores originales que tenía el residuo en estado virgen. Estos resultados concuerdan con el rango de 20 a 24 Mg/kg señalado por Tumuluru para biomásas torrefactadas [27]. Además, demuestran que el pre-tratamiento de tostación aplicado ocasiona un proceso de transformación termoquímica que mejora la calidad de las hojas para su empleo como combustible y agente reductor en procesos de reducción del mineral de hierro.

Otro aspecto importante a señalar es el hecho de que la hoja de caña sin tratamiento es fibrosa y tenaz por naturaleza lo que dificulta su molienda. Se observa que esta característica no varía luego del proceso de lavado. Sin embargo, el proceso de tostado logra modificar esta característica del residuo aumentando su friabilidad lo que facilita su molienda y pulverización siendo esto, un aspecto muy importante para el desarrollo de aglomerados, utilizados en los procesos de reducción directa del mineral de hierro para la formación de pellets auto-reductores, pues se reduce el tiempo y la energía requeridos en los procesos de reducción granulométrica del residuo.

Estos resultados están de acuerdo a lo señalado por Tumuluru quien indica que durante la torrefacción la biomasa pierde su naturaleza tenaz, lo cual está principalmente asociado a la descomposición de la matriz de hemicelulosa y a la depolimerización de la celulosa, lo que da como resultado una disminución en la longitud de las fibras. Durante la torrefacción la biomasa tiende a encogerse, se vuelve liviana, escamosa y frágil y pierde su resistencia mecánica, haciendo que sea más fácil de moler y pulverizar [27]. Esto coincide también con los resultados reportados por Stelt respecto a la mejora de las propiedades de molienda de las biomásas torrefactadas [28].

Adicionalmente, la reducción de humedad durante el proceso de tostado le otorga características hidrofóbicas a la hoja de caña haciéndola más resistente a la biodegradación lo que resulta ser una gran ventaja para su almacenamiento y transporte. Se observa también una disminución del peso de las hojas y que éstas sufrieron un cambio de color adquiriendo una tonalidad marrón oscuro a negro. Además, se tornaron más porosas, friables y fáciles de moler. La Fig. 5 muestra las hojas de caña de azúcar obtenidas luego del proceso de tostado aplicado al residuo.



Fig. 5 Hojas de caña de azúcar luego del proceso de tostado

#### D. Efecto del proceso de carbonizado en las hojas de caña

Luego del proceso de tostado se procedió al carbonizado de las hojas de caña en un horno de mufla. La Fig. 6 presenta el equipo utilizado, la Fig. 7 el producto final obtenido y la Tabla II los resultados del análisis inmediato, elemental y del poder calorífico aplicados al material lavado, tostado y carbonizado. Se aprecia una reducción de la materia volátil a un valor de 18.27%, y un significativo incremento del contenido de carbono fijo registrando un valor de 66.54% es decir 7.87 veces más que lo reportado por el residuo sin tratamiento. En lo que respecta al contenido de azufre si bien se observa que sufre un ligero incremento, su valor aún se mantiene bastante bajo, reportando un valor de 0.27 % lo que es adecuado para carbones usados como agentes reductores.

Los poderes caloríficos superior e inferior de las hojas carbonizadas, medidos en base seca, fueron de 34.33 MJ/kg y 32.78 MJ/kg respectivamente, evidenciando una significativa mejora respecto de los valores originales que tenía el residuo en estado virgen, asemejándose al poder calorífico de un carbón mineral.



Fig. 6 Horno de mufla utilizado para la carbonización

La Fig. 8 presenta el diagrama de Van Krevelen en el cual se puede observar la variación de las relaciones atómicas de oxígeno e hidrógeno vs carbono (O/C y H/C) de las hojas de caña debido a los pre-tratamientos termoquímicos aplicados.

En el caso de las hojas de caña de azúcar sin tratamiento el valor de estos ratios de O/C y H/C fue de 0.78 y 1.76 respectivamente; mientras que luego de los procesos de

lavado, tostado y carbonizado aplicados al residuo estos ratios disminuyeron a valores de 0.08 y 0.49 respectivamente con cual, el bio-carbón obtenido se acerca a la región del carbón mineral tipo antracita.



Fig. 7 Hojas de caña luego del proceso de lavado, tostado y carbonizado

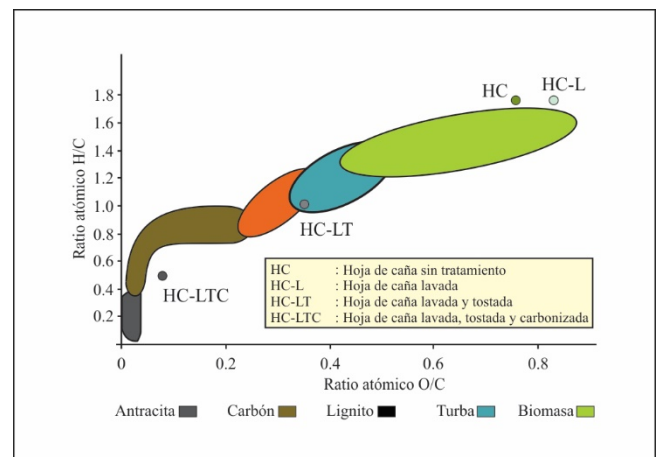


Fig. 8 Diagrama Van Krevelen aplicado a la hoja de caña y a los productos obtenidos de los pre-tratamientos aplicados al residuo

Los resultados obtenidos demuestran una mejora importante en las propiedades y características de la hoja de caña de azúcar mediante su transformación en un bio-carbón de alta calidad posibilitando su empleo como combustible y agente reductor en procesos de reducción directa de mineral de hierro.

#### IV. CONCLUSIONES

1. El proceso de lavado aplicado a las hojas de caña que se realizó con agua de caña, en una proporción de 15 litros por kilogramo de hojas, a 20°C, por remojo durante 24 horas sin agitación, seguido de media hora adicional con agitación periódica, demostró tener una alta efectividad en la eliminación de elementos perjudiciales para el uso de la hoja de caña como combustible y agente reductor, lográndose reducir significativamente el nivel de azufre, en 60.47%, así como el contenido de cenizas en un 13.92% y de álcalis. Adicionalmente, la conductividad eléctrica del agua fue 2.57 mS/cm, que es un indicador del buen nivel de remoción logrado con un proceso simple y de fácil replicabilidad y, que resultó bastante



cercano a lo reportado en este estudio trabajando con agua destilada a temperatura de 80°C, con la misma concentración, caso que alcanzó una conductividad eléctrica de 2.80 mS/cm.

2. Los tratamientos térmicos combinados de tostación y carbonización aplicados a las hojas de caña lavadas liberan los volátiles e incrementan la fracción de carbón. También, ocasionan que las relaciones atómicas de O/C y H/C disminuyan pasando de valores de 0.78 y 1.76, para la hoja sin tratamiento, a valores de 0.08 y 0.49 respectivamente, para las hojas transformadas en un bio-carbón, lo que demuestra una mejora importante en las propiedades del residuo haciendo que se asemeje a un carbón mineral abriendo así la posibilidad de su empleo como combustible y agente reductor en procesos de reducción directa de mineral de hierro.
3. El bio-carbón obtenido luego de someter a las hojas de caña de azúcar a los tratamientos combinados de lavado, tostado y carbonizado muestra un significativo incremento del contenido de carbono fijo registrando un valor de 66.54% es decir, 7.87 veces más que lo reportado por el residuo sin tratamiento. También, su poder calorífico superior alcanza un valor de 34.33 MJ/kg lo que implica un incremento de más del doble del valor original asemejándose a un carbón mineral. Esto es un indicador de su idoneidad para su uso como fuente de energía y agente reductor en los procesos de reducción directa del mineral de hierro.
4. Los procesos de tostado y carbonizado aplicados las hojas de caña ocasionan cambios en su estructura interna dando como resultado un bio-carbón caracterizado por ser un producto más poroso y frágil, comparado con el residuo original, lo que facilita su molienda además, presenta características hidrofóbicas.
5. Se requiere realizar mayores investigaciones centradas en optimizar los tratamientos de lavado, tostado y carbonizado aplicados a las hojas de caña como la concentración o ratio sólido/líquido en el lavado y las temperaturas y tiempos de residencia en los procesos de tostado y carbonizado, a fin de obtener un bio-carbón de caña de mejor calidad para su empleo como combustible y agente reductor.

#### REFERENCIAS

- [1] E. Mousa, C. Wang, J. Riesbeck, and M. Larsson, "Biomass applications in iron and steel industry : An overview of challenges and opportunities," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 65, pp. 1247–1266, 2016.
- [2] P. Rashmi Ranjan and M. Vinay, "REDUCTION BEHAVIOUR OF IRON ORE PELLETS," Rourkela India, 2008.
- [3] R. Wei, L. Zhang, D. Cang, J. Li, X. Li, and C. C. Xu, "Current status and potential of biomass utilization in ferrous metallurgical industry crossmark," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 68, no. February, pp. 511–524, 2017.
- [4] I. Nikai, "THE USE OF IRON ORE FINES IN COLD-BONDED SELF- REDUCING COMPOSITE PELLETS," University of Pretoria, 2015.
- [5] Z. Hu, "Kinetics and mechanisms of direct reduction of iron ore-biomass composite pellets with hydrogen gas ScienceDirect," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 40, no. 14, pp. 4733–4740, 2015.
- [6] S. Diaz, A. Forero, and J. Ortiz Duran, "PROCESO DE REDUCCIÓN DIRECTA DE MINERALES DE HIERRO EN HORNO ROTATORIO Sandra," *Revista Colombiana de Materiales N. 5*, Medellín Colombia, pp. 111–116, 2014.
- [7] D. Zhu *et al.*, "Direct Reduction Behaviors of Composite Binder Magnetite Pellets in Coal-based Grate-rotary Kiln Process," *ISIJ Int.*, vol. 51, no. 2, pp. 214–219, 2011.
- [8] J. Fu, C. Zhang, W. Hwang, Y. Liao, and Y. Lin, "International Journal of Greenhouse Gas Control Exploration of biomass char for CO 2 reduction in RHF process for steel production," *Int. J. Greenh. Gas Control*, vol. 8, pp. 143–149, 2012.
- [9] H. Suopajarvi and T. Fabritius, "Effects of Biomass Use in Integrated Steel Plant – Gate-to-gate Life Cycle Inventory Method," *ISIJ Int.*, vol. 52, no. 5, pp. 779–787, 2012.
- [10] G. Fick *et al.*, "Using biomass for pig iron production: a technical, environmental and economical assessment," *Waste and Biomass Valorization*, vol. 5, no. 1, pp. 43–55, 2014.
- [11] M. W. Seo, "Carbonization Characteristics of Biomass / Coal Blend For Bio-Coke," in *The 14th International Conference on Fluidization – From Fundamentals to Products*, 2013, pp. 1–10.
- [12] A. Babich and D. Senk, "Biomass use in the steel industry : back to the future ?," *Stahl und Eisen*, vol. 133, no. 5, pp. 57–67, 2013.
- [13] X. Yang *et al.*, "Thermal Properties of Biochars Derived from Waste Biomass Generated by Agricultural and Forestry Sectors," *Energies*, vol. 10, no. 469, pp. 1–12, 2017.
- [14] D. Bernhardt, M. Pohl, K. Gebauer, S. Unz, and M. Beckmann, "Biogenous residues for the use as wood pellet equivalent fuels," in *International Conference on Thermal Treatment Technologies & Hazardous Waste Combustors - IT3*, 2011, pp. 1–13.
- [15] V. Daioglou, E. Stehfest, B. Wicke, A. Faaij, and D. P. Van Vuuren, "Projections of the availability and cost residues from agriculture and forestry," *GCB Bioenergy*, vol. 8, pp. 456–470, 2016.
- [16] R. R. Bakker and B. M. Jenkins, "Feasibility of collecting naturally leached rice straw for thermal conversion," *Biomass and Bioenergy*, vol. 25, pp. 597–614, 2003.
- [17] D. Vamvuka and D. Zografos, "Predicting the behaviour of ash from agricultural wastes during combustion," *Fuel*, vol. 83, pp. 2051–2057, 2004.
- [18] S. Zhang, Q. Dong, L. Zhang, and Y. Xiong, "Effects of water washing and torrefaction on the pyrolysis behavior and kinetics of rice husk through TGA and Py-GC / MS," *Bioresour. Technol.*, vol. 199, pp. 352–361, 2016.
- [19] T. M. Runge, "Economic and Environmental Impact of Biomass Types for Bioenergy Power Plants," Wisconsin, USA, 2013.
- [20] D. Bernhardt, K. Gebauer, M. Pohl, and M. Beckmann, "IMPACT OF FUEL MODIFICATION METHODS ON THE SLAGGING BEHAVIOR OF PULP PELLETS," in *Impacts of Fuel Quality on Power Production and Environment*, 2010, pp. 1–15.
- [21] B. Melissari, "Ash related problems with high alkali biomass and its mitigation - Experimental evaluation," *Memoria Investigaciones en Ingeniería Universidad de Montevideo Uruguay*, vol. 12, Montevideo - Uruguay, pp. 31–44, Aug-2014.
- [22] Y. Zhu, Y. Niu, H. Tan, and X. Wang, "Short review on the origin and countermeasure of biomass slagging in grate furnace," *Front. Energy Res.*, vol. 2, no. February, pp. 1–10, 2014.
- [23] A. A. Rahman, F. Sulaiman, and N. Abdullah, "Influence of Washing Medium Pre-treatment on Pyrolysis Yields and Product Characteristics of Palm Kernel Shell," *ournal Phys. Sci. (ISSN 1675-3402) Publ. by Penerbit Univ. Sains Malaysia*, vol. 27, no. 1, pp. 53–75, 2016.
- [24] Cennatek Bioanalytical Services, "Feasibility of Improving Biomass Combustion through Extraction of Nutrients," Ontario - Canada, 2011.
- [25] P. Ravichandran, D. Gibb, and K. Corscadden, "Controlled Batch Leaching Conditions for Optimal Upgrading of Agricultural Biomass," *J. Sustain. Bioenergy Syst.*, vol. 3, no. 3, pp. 186–193, 2013.
- [26] E. Assureira and M. Assureira, "AGRICULTURAL AND FOREST RESIDUES IN PERU: POTENTIAL FOR THE BIOENERGY USE," in *25th European Biomass Conference and Exhibition*, 2017, no. June, pp. 12–15.
- [27] J. S. Tumuluru, S. Sokhansanj, J. R. Hess, C. T. Wright, and R. D. Boardman, "A review on biomass torrefaction process and product properties for energy applications," *Ind. Biotechnol.*, vol. 7, no. 5, pp. 384–401, 2011.
- [28] M. J. C. Van Der Stelt, H. Gerhauser, J. H. A. Kiel, and K. J. Ptasinski, "Biomass upgrading by torrefaction for the production of biofuels : A review," *Biomass and Bioenergy*, vol. 35, no. 9, pp. 3748–3762, 2011.