

**EVALUACIÓN DE LA PIRÓLISIS DE 3 MUESTRAS DE BIOMASA DE BAGAZO DE
CAÑA COMO POTENCIAL MATERIAL LIGNOCELULÓSICO PARA SER
UTILIZADO EN EL PAQUETE TECNOLÓGICO TRANSBIOENERGY.**

JEIMY KATHERINE RAMIREZ ROMERO

UNIVERSIDAD PILOTO DE COLOMBIA

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

BOGOTÁ, D.C

2024

**EVALUACIÓN DE LA PIRÓLISIS DE 3 MUESTRAS DE BIOMASA DE BAGAZO
DE CAÑA COMO POTENCIAL MATERIAL LIGNOCELULÓSICO PARA SER
UTILIZADO EN EL PAQUETE TECNOLÓGICO TRANSBIOENERGY.**

JEIMY KATHERINE RAMIREZ ROMERO

**PROYECTO DE GRADOPARA OPTAR POR EL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL
DE LA UNIVERSIDAD PILOTO DE COLOMBIA.**

DIRECTOR:

Dr. RAFAEL ALBERTO FONSECA CORREA

CO-DIRECTORES:

ING. NESTOR FERNANDO PENAGOS

BALDOMERO MÉNDEZ PALLARES

UNIVERSIDAD PILOTO DE COLOMBIA

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

BOGOTÁ, D.C

2024

NOTA DE ACEPTACIÓN

Una vez realizada la revisión metodológica y técnica del documento final de proyecto de grado, damos constancia de que la estudiante abajo firmante ha cumplido a cabalidad con los objetivos propuestos, cumple en su totalidad con los Lineamientos de Opción de Grado vigentes del programa de Ingeniería Civil y con las leyes de derechos de autor de la República de Colombia, por tanto, se encuentra preparada para la defensa del mismo ante un jurado evaluador que considere idóneo el Comité de Investigaciones del Programa de Ingeniería Civil de la Universidad Piloto de Colombia.



Dr. RAFAEL ALBERTO FONSECA CORREA

Director del Proyecto



Ing. NESTOR FERNANDO PENAGOS

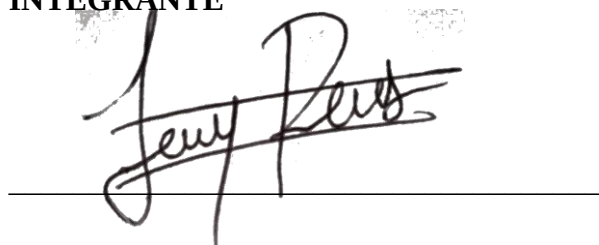
Co-Director del Proyecto



Ing. BALDOMERO MENDEZ PALLARES

Co-Director del Proyecto

INTEGRANTE



JEIMY KATHERINE RAMIREZ ROMERO

Estudiante de Ingeniería Civil

TABLA DE CONTENIDO

TABLA DE CONTENIDO.....	5
1. LISTA DE ILUSTRACIONES.....	8
2. LISTADO DE TABLAS.....	11
3. LISTADO DE GRAFICAS	12
4. GLOSARIO	13
5. RESUMEN	15
6. AGRADECIMIENTO	17
7. INTRODUCCIÓN	18
8. LINEA DE INVESTIGACIÓN	19
9. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	19
10. JUSTIFICACIÓN.....	22

11. ANTECEDENTES	24
12. OBJETIVOS.....	26
12.1 Objetivo general	26
12.2 Objetivos específicos	26
13. MARCO TEÓRICO	27
13.1 Caña de azúcar	27
13.2 Carbón activado	29
13.3.1 Carbón pulverizado:	30
13.3.2 Carbón granulado:	31
13.4 Fabricación del carbón Caña de azúcar.....	32
13.5 Activación física.....	33
13.6 Estructura del carbón activado	33

13.7 Adsorción carbón activado.....	35
13.8 Química superficial del carbón activado.....	36
14. MARCO LEGAL	38
15. METODOLOGÍA	39
15.1 Determinación de humedad del bagazo de caña:	39
15.2 Determinación de cenizas del bagazo de caña	41
15.3 Material volátil	42
15.4 Carbón fijo	43
15.5 TGA (Análisis termogravimétrico)	44
15.6 Pirolisis y porcentaje de reducción de volumen.....	44
16. ANÁLISIS Y RESULTADOS	56
16.1 Análisis de determinación de humedad.....	56

16.2 Análisis de determinación de cenizas	59
16.3 Análisis de material volátil.....	61
16.4 Análisis de carbón fijo	64
16.5 TGA (Análisis termogravimétrico)	65
16.6 Análisis Pirolisis y factor de reducción de volumen.	68
17. CONCLUSIONES.....	71
18. RECOMENDACIONES	72
19. BIBLIOGRAFÍA.....	73

1. LISTA DE ILUSTRACIONES

ILUSTRACIÓN 1(EL BAGAZO DE LA CAÑA DE AZÚCAR, UNA ALTERNATIVA PARA REDUCIR LA CONTAMINACIÓN MINERA/2017)	28
ILUSTRACIÓN 2 CARBÓN PULVERIZADO (CARBÓN ACTIVADO PULVERIZADO USO/2024)	30

ILUSTRACIÓN 3 CARBÓN GRANULADO (CARBÓN GRANULADO ACTIVADO PURO/2024).....	31
ILUSTRACIÓN 4 MÁQUINA DE PRODUCCIÓN DE CARBONO (MÁQUINA PARA HACER CARBÓN/2022).....	32
ILUSTRACIÓN 5 GRUPO QUÍMICO FUNCIONAL DEL CARBÓN. (HADAR/2014)	34
ILUSTRACIÓN 6 GRANO DE CARBÓN ACTIVADO VIRGEN. (¿QUÉ ES EL CARBÓN ACTIVADO Y PARA QUÉ SIRVE?/2024).....	35
<i>ILUSTRACIÓN 7 GRANO DE CARBÓN AGOTADO (¿QUÉ ES EL CARBÓN ACTIVADO Y PARA QUÉ SIRVE? /2024)</i>	<i>36</i>
ILUSTRACIÓN 8 PESO DE LA MUESTRA. (FUENTE PROPIA)	44
ILUSTRACIÓN 9 INTRODUCCIÓN DEL MATERIAL AL RECIPIENTE. (FUENTE PROPIA).....	45
ILUSTRACIÓN 10 PESO DEL MATERIAL Y RECIPIENTE. (FUENTE PROPIA)	45
ILUSTRACIÓN 11 INTRODUCCIÓN DEL MATERIAL A LA CELDA. (FUENTE PROPIA).....	46
ILUSTRACIÓN 12 ACOMODACIÓN DEL MATERIAL EN LA CELDA. (FUENTE PROPIA)	46
ILUSTRACIÓN 13 INTRODUCCIÓN DE TUBO AL REACTOR. (FUENTE PROPIA)	47
ILUSTRACIÓN 14 INTRODUCCIÓN DEL MATERIAL A EL TUBO DEL REACTOR. (FUENTE PROPIA)	47
ILUSTRACIÓN 15 ACOMODACIÓN DE LA CELDA DENTRO DEL REACTOR. (FUENTE PROPIA)	48

ILUSTRACIÓN 16 COLOCACIÓN DE LA TAPA DEL REACTOR. (FUENTE PROPIA)	48
ILUSTRACIÓN 17 AJUSTE DE TORNILLOS DE LA TAPA DEL REACTOR. (FUENTE PROPIA)	49
ILUSTRACIÓN 18 CONEXIÓN DEL NITRÓGENO A EL HORNO. (FUENTE PROPIA)	49
ILUSTRACIÓN 19 AJUSTE DEL NITRÓGENO. (FUENTE PROPIA)	50
ILUSTRACIÓN 20 MUESTRA DEL PESO QUE ES HIDRÓXIDO DE SODIO. (FUENTE PROPIA)	50
ILUSTRACIÓN 21 PESAJE DE HIDRÓXIDO DE SODIO. (FUENTE PROPIA)	51
ILUSTRACIÓN 22 INTRODUCCIÓN DEL HIDRÓXIDO DE SODIO A OTRO RECIPIENTE. (FUENTE PROPIA)	51
ILUSTRACIÓN 23 INICIO DE LA MEZCLA DE HIDRÓXIDO DE SODIO CON AGUA. (FUENTE PROPIA)	52
ILUSTRACIÓN 24 DISOLUCIÓN COMPLETA ENTRE EL AGUA Y EL HIDRÓXIDO DE SODIO. (FUENTE PROPIA)	52
ILUSTRACIÓN 25 INTRODUCCIÓN DE LA SODA CAUSTICA A LA TRAMPA DE GASES. (FUENTE PROPIA)	53
ILUSTRACIÓN 26 ACOMODACIÓN DE LAS TRAMPAS DE GASES. (FUENTE PROPIA)	53
ILUSTRACIÓN 27 CONEXIÓN DE LAS MANGUERAS CON EL REACTOR. (FUENTE PROPIA)	54
ILUSTRACIÓN 28 POSICIÓN FINAL DEL REACTOR. (FUENTE PROPIA)	54

ILUSTRACIÓN 29 RESULTADO DE PIROLISIS DEL BAGAZO DE CAÑA. (FUENTE PROPIA).....	55
ILUSTRACIÓN 30 DISMINUCIÓN EN PESO DEL MATERIAL. (FUENTE PROPIA)	55
ILUSTRACIÓN 31 RESULTADO FINAL DE PIROLISIS. (FUENTE PROPIA)	56
ILUSTRACIÓN 32 MUESTRA DEL VOLUMEN DE CARBONIZACIÓN.	69

2. LISTADO DE TABLAS

TABLA 1 RESULTADO DE HUMEDAD.....	58
TABLA 2 PORCENTAJE DE RESULTADO DE HUMEDAD.....	58
TABLA 3 DETERMINACIÓN DE CENIZAS	60
TABLA 4 RESULTADO PÉRDIDA DE PESO CONSTANTE.....	60
TABLA 5 RESULTADOS DE MATERIAL VOLÁTIL	62
TABLA 6 RESULTADOS PÉRDIDA DE PESO CONSTANTE.	63
TABLA 7 RESULTADOS DE CARBÓN FIJO.....	64

3. LISTADO DE GRAFICAS

GRÁFICO 1 RESULTADO DE HUMEDAD.....	59
GRÁFICO 2 RESULTADO DE CENIZAS	61
GRÁFICO 3 RESULTADO DE MATERIAL VOLÁTIL	63
GRÁFICO 4 RESULTADOS DE CARBÓN FIJO.....	65
GRÁFICO 5 TGA PACHO	67
GRÁFICO 7 TGA SAN JOSÉ DE PARE	66
GRÁFICO 9 TGA VIANÍ.....	67

4. GLOSARIO

Pirolisis: esta se conoce como la descomposición química de la materia orgánica producido por altas temperaturas y en ausencia del oxígeno.

Porosidad: está es la propiedad de la materia la cual relaciona los espacios vacíos de la superficie o estructura.

Lignocelulósico: Materia seca vegetal, también llamado biomasa lignocelulósica

Filtración: proceso de separación de partículas sólidas de un líquido utilizando un material poroso

Volumen: magnitud escalar definida como el espacio ocupado por un cuerpo

Acidez: término que indica la cantidad de ácido en una sustancia

Adsorción: fenómeno físico, en donde un compuesto en fase líquida o gaseosa entra en contacto con un sólido adsorbente y se adhiere a la superficie del mismoAlcalinidad

Bagazo de caña: este se conoce como el residuo presentado después de la fabricación de panela a partir de la caña de azúcar

Nitrógeno: Este es el un elemento químico de símbolo N y con un número atómico 7. Es un gas incoloro, incoloro e insípido.

Hidróxido de sodio: Este también es conocido como soda cáustica, es un compuesto químico NaOH el cual es altamente corrosivo este se utiliza especialmente en fabricación de papel, tejidos y en industrias petroleras.

Filtro: Un filtro es un dispositivo que retiene ciertos elementos este deja pasar otro. Se refiere a un material poroso que permite el paso de un líquido mientras bloquea las partículas en suspensión.

Turbiedad: Es la medida del grado de transparencia que pierde un líquido debido a la presencia de partículas en suspensión. Debido a que cuanto mayor sea la cantidad de sólidos suspendidos, mayor será debe ser la turbiedad.

5. RESUMEN

El bagazo de caña es un residuo generado en Colombia en grandes cantidades; por tal motivo, se plantea como una fuente de energía alternativa, aprovechando que en la actualidad el mundo requiere de estas nuevas fuentes de energía. Se realizaron investigaciones que nos permiten utilizar materiales lignocelulósicos y que a su vez se pueden utilizar como agentes descontaminantes. El bagazo de caña, como material procesado por medio de la pirólisis en un gasificador a una temperatura entre 300 °C a 450 °C, genera la transformación de los compuestos lignocelulósicos, el cual se modifica en carbón y por su alto contenido de poder calórico se convierte en lo que se llama un sólido con estructura porosa.

Se realiza el aprovechamiento de los residuos postcosecha trabajando con tres muestras de bagazo de caña provenientes de 3 municipios diferentes como: Vianí, Pacho-Cundinamarca, y en la zona de intervención en donde se estima instalar la tecnología TransBioEnergy en la vereda Muñoces y Camacho, Municipio de San José de Pare del departamento de Boyacá. Se identifican el porcentaje de humedad, compuestos volátiles, carbono fijo y cenizas identificando su composición. Se realizan los análisis termogravimétricos de las tres muestras. Se evalúan los comportamientos y condiciones de pirólisis en los laboratorios y se determinan las condiciones de gasificación, determinando la eficiencia energética y porcentajes de reducción volumétrica de los materiales estudiados.

Palabras Claves: Bagazo de caña, carbón activado, gasificación, pirólisis, TransBioEnergy, San José de Pare, Vianí, Pacho.

ABSTRACT

Sugarcane bagasse is a waste generated in large quantities in Colombia; for this reason, it is proposed as an alternative energy source, taking advantage of the fact that the world currently requires these new energy sources. Research was conducted that allows us to use lignocellulosic materials and at the same time can be used as decontaminating agents. Sugarcane bagasse, when processed through pyrolysis in a gasifier at a temperature between 300°C and 450°C, transforms the lignocellulosic compounds, which are modified into carbon, and due to its high caloric value, becomes what is called a porous solid. Post-harvest residue utilization is carried out working with three samples of sugarcane bagasse from three different municipalities: Vianí, Pacho-Cundinamarca, and in the intervention area where it is planned to install TransBioEnergy technology in the villages of Muñoces and Camacho, Municipality of San José de Pare in the Boyacá department. The moisture percentage, volatile compounds, fixed carbon, and ash are identified, and their composition is determined. Thermogravimetric analyses of the three samples are performed. The behaviors and pyrolysis conditions are evaluated in laboratories, and the gasification conditions are determined, assessing energy efficiency and volume reduction percentages of the materials studied.

Key Words: Sugarcane bagasse, activated carbon, gasification, pyrolysis, TransBioEnergy, San José de Pare, Vianí, Pacho.

6. AGRADECIMIENTO

Quiero expresar a todas las personas e instituciones que hicieron posible la realización de este trabajo de grado.

En primer lugar, agradezco profundamente a mi universidad Piloto de Colombia por brindarme la oportunidad de formarme académicamente y proporcionarme los recursos necesarios para llevar a cabo esta investigación. Su apoyo ha sido fundamental en cada etapa de mi desarrollo profesional.

A mi director de tesis, Dr. Rafael Alberto Fonseca, le debo un especial reconocimiento. Su guía, paciencia y valiosos comentarios han sido esenciales para la culminación de este trabajo. Su dedicación y compromiso han sido una fuente constante de inspiración.

También quiero extender mi gratitud a la Universidad Nacional y Universidad de los Andes, a sus laboratorios por su colaboración y por facilitarme el acceso a sus instalaciones y recursos. Sin su apoyo, esta investigación no habría sido posible.

Finalmente, agradezco a mis padres, mis compañeros y amigos que me acompañaron en este camino, por su apoyo incondicional y por ser una fuente de motivación constante.

7. INTRODUCCIÓN

En Colombia, "la producción de bagazo de caña es de 5.8 toneladas por año" (Cenicaña/2022). Este, al no ser aprovechado, se convierte en un contaminante ambiental, al presentar la combustión y liberar gases de efecto invernadero como CO₂ (dióxido de carbono), CH₄ (metano), N₂O (óxido nitroso). Después de que estos gases se liberen naturalmente, aumentan la temperatura terrestre, lo que es conocido como calentamiento global. El objetivo de esta investigación inicia con la necesidad de aprovechamiento de este material lignocelulósico, generando una energía alternativa, con la realización de los laboratorios de humedad, cenizas, material volátil, TGA, porcentaje de reducción volumétrica y pirolisis, logrando obtener la reducción de volumen del material lignocelulósico después de pasar por el proceso de pirolisis.

De esta forma, realizamos un aporte para el paquete tecnológico TransBioEnergy en donde, por medio del proceso de pirolisis, se transforma la energía química de la biomasa en energía térmica por medio de la aplicación de calor a determinadas presiones y temperaturas donde obtenemos productos sólidos (bio carbón), líquidos (bio aceites) y gaseosos (biogás). Mediante la reacción endotérmica presente en temperaturas de 300°C a 450°C y en ausencia de oxígeno, lo que obtenemos es el aprovechamiento de la biomasa para fines como la potabilización de agua por medio del carbón obtenido en el proceso, la producción natural de gas metano como energético e hidrocarburos líquidos denominados alquitranes provenientes de los volátiles condensados en el proceso.

8. LINEA DE INVESTIGACIÓN

Línea de Investigación del Trabajo:

Grupo de investigación: GUIAS. INNOVATIC

- Línea de Investigación Institucional: Hábitat, biodiversidad y tecnologías sostenibles - HBTS.

- Línea de Investigación del programa: Sostenibilidad de la Infraestructura.

- Línea de Investigación grupo de Investigación: Gestión y tecnologías del agua.

- Nombre del semillero de Investigación: Gestión de la Infraestructura para el desarrollo.

9. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Debido a la producción excesiva de bagazo de caña de azúcar y al efecto contaminante de la misma, se realizó la presente investigación, la cual se centra en 3 muestras de bagazo de caña, las cuales provienen de tres municipios productores de panela, como lo son Vianí y Pacho-Cundinamarca, y en la zona de intervención en donde se estima instalar la tecnología TransBioEnergy en la vereda Muñoces y Camacho, Municipio San José de Pare del departamento

de Boyacá Con la obtención de los resultados encontrados en la investigación, y como hipótesis, se pretende presentar al bagazo de caña como una fuente de energía alternativa para las regiones agrícolas del país.

Esta investigación pretende aportar avances para mitigar los antecedentes ambientales del planeta. Uno de los ejemplos actuales y más cercanos lo podemos ver con el racionamiento de agua en Bogotá, el cual ya nos afecta de forma directa en los hogares. Esto se debe al desperdicio de agua que generamos como consumidores de este recurso natural tan importante que es el agua. Cuando no reutilizamos el agua, la cual usamos para lavar la ropa o nos duchamos durante largos periodos de tiempo. Cuando podemos ahorrar esta agua y aun así no lo hacemos, esta llega directamente al río Bogotá. Donde también le tienen que realizar un proceso de descontaminación, por medio de la PTAR salitre y la PTAR Canoas, tratando las aguas residuales

Con este tipo de antecedentes ambientales se investigan las nuevas alternativas con el fin de potencializar las fuentes energéticas alternativas, para de esta forma realizar estas opciones de forma que puedan extenderse con facilidad. Realizándose la siguiente pregunta de investigación: ¿De qué forma con el estudio del proceso de pirólisis en laboratorio del bagazo de caña provenientes de diferentes regiones del país, se pueden conocer las variables termodinámicas para ser extrapoladas a un gasificador de lecho móvil en vía de desarrollo en el paquete tecnológico TransBioEnergy?... Acogiendo dos problemas ambientales de gran peso como lo son la potabilización de agua y el aprovechamiento de los residuos lignocelulósicos. La producción de bagazo de caña en Colombia es de 5.8 de toneladas por año (Cenicaña/2022), este es un residuo el cual se genera por la

producción de caña de azúcar, que en su proceso de transformación se comercializa con lo que se conoce como azúcar en sus diferentes presentaciones y panela principalmente. El alto volumen de esta biomasa generada excede al consumo en usos como fertilizante, alimento para ganado y cogeneración de energía en los hornos utilizados en los mismos procesos de fabricación de los productos finales. Esto genera una alta contaminación ambiental al presentarse la combustión y liberar calor creando gases de efecto invernadero como, por ejemplo: emisiones atmosféricas de CO₂ (dióxido de carbono), CH₄ (metano), N₂O (óxido nitroso) entre otros. Después de que ascienden hacia la atmósfera, aumentan la temperatura terrestre (produciendo el efecto de calentamiento global) con todos los efectos conocidos como tormentas e inundaciones, cambio climático, inversión térmica entre otros.

Otra de las problemáticas es el efecto del calentamiento global, debido a que en la actualidad la Antártica se está desvaneciendo y se está presentado un color verde por la gran cantidad de musgos que se apodera de la zona que antes era de color blanco, la cual regula la temperatura del planeta. Lo cual puede tener un impacto devastador en todo el mundo, ya que la luz reflejada es menor y aumenta las temperaturas.

10. JUSTIFICACIÓN

La contaminación actualmente es un problema no solamente en Colombia; en todo el mundo existe contaminación por diversos motivos. Dentro de estas se encuentran la contaminación atmosférica y térmica debido al calentamiento global, la cual es generada por la deforestación y la combustión de diferentes materiales combustibles. La contaminación en el agua: teniendo en cuenta que Colombia está en el top 10 de los países con mayores reservas de agua dulce (Puente/2024), se deben implementar procesos innovadores que nos ayuden a combatir esta problemática.

La investigación propone evaluar alguna de las diferentes alternativas que nos permitan reducir la cantidad de bagazo de caña en diversos lugares de Colombia y aportar de diferentes formas en la reducción de la producción de los gases de efecto invernadero y la contaminación térmica que se hace relevante.

El proceso de pirólisis de materiales lignocelulósicos principalmente de los provenientes de residuos de postcosecha presenta diversos aspectos para tener en cuenta cómo.

La producción de azúcar generada por año en Colombia es estimada por más de 5.8 millones de toneladas de bagazo de caña (Cenicaña/2022) la cual tiene un bajo uso y esto genera contaminación en muchas zonas rurales del país.

La producción de gas metano con los materiales lignocelulósicos y no generado por el almacenamiento y uso del petróleo como ya se produce actualmente es muy factible y aporta a brindar soluciones de disponibilidad de energía alternativa en zonas no interconectadas del país.

Por medio de la pirolisis del bagazo de caña se puede generar carbón activado, de esta manera se puede utilizar como material filtrante para la eliminación de impurezas contaminantes en medio acuoso y así lograr la purificación del agua en las mismas zonas de producción que por lo general no cuentan con agua potable, implementando plantas de tratamiento autónomas en los mismos trapiches.

Uno de los productos de pirólisis consiste en un líquido de volátiles condensados con alto poder energético y con potenciales usos en diferentes productos industriales, por lo que la investigación que se propone apunta a la economía circular.

La investigación tiene mucha proyección, ya que no hay suficiente información desde el punto de vista termodinámico en la caracterización de los procesos de pirólisis de bagazo de caña y no se saben las diferencias de poder calorífico de muestras provenientes de diferentes regiones del país, en donde puede cambiar mucho por las diferentes variedades de las especies de caña sembrada y las diferentes características del suelo, que puede hacer que varíen estas tipologías.

11. ANTECEDENTES

"El bagazo de caña es un residuo que se genera al extraer el jugo de la caña de azúcar para producir azúcar". Este residuo tiene un alto contenido de celulosa, hemicelulosa y lignina, que son fuentes de energía térmica". Es por esto por lo que se denomina residuo lignocelulósico; sin embargo, si no se aprovecha adecuadamente, el bagazo de caña puede convertirse en un contaminante ambiental, ya que ocupa espacio, genera gases de efecto invernadero y puede afectar la calidad del agua y del suelo" (SciELO/2014).

El proceso de combustión de materiales combustibles como los residuos lignocelulósicos genera en sus procesos dióxido de carbono y agua si el proceso se da en exceso de oxígeno y si la combustión es completa. La reacción genera también cenizas en sus formas de óxidos, ya que la composición de dichos materiales también contiene compuestos inorgánicos.

Todo el carbono de las estructuras se convierte en CO₂. En el proceso de pirólisis, el calentamiento se hace en atmósfera inerte (ausencia de oxígeno), por lo general de nitrógeno gaseoso, por lo que todo el carbono se convierte en su mayor parte en carbón sólido y en diferentes tipos de gases o compuestos volátiles como el gas metano (CH₄), que principalmente es un energético de alto poder calorífico que está compuesto por 4 átomos de carbono. Algo del carbono se queda como estructura carbonosa o BioChar, que es el precursor del llamado carbón

activado, también con un alto contenido de poder calorífico, pero que desarrolla por lo general una estructura porosa.

Los compuestos inorgánicos pueden producir algo de cenizas, pero no en la misma forma de óxido como en el caso de la combustión. También se generan gases volátiles condensables, compuestos con átomos de carbono superiores a 5, también los denominados óxidos de nitrógeno (NO_x), los óxidos de azufre llamados (SO_x), H₂S entre otros. Estos son los llamados alquitranes o productos líquidos, que tienen una amplia gama de aplicación y uso en compuestos industriales.

La composición de todos estos compuestos anteriormente citados dependerá de las condiciones de pirólisis como: velocidad de calentamiento o rampa de calentamiento, flujo del gas inerte, temperaturas finales (Tecam/2020), tiempos de residencia y la misma composición de los precursores, en este caso el bagazo de caña, que puede variar por su procedencia.

"El carbón activado es un material poroso que se utiliza para eliminar impurezas y contaminantes del agua". Una vez que el agua contaminada pasa a través del filtro de carbón activado, las bacterias presentes en el agua son atraídas a la superficie del carbón. Los poros y cavidades del carbón proporcionan una gran área de superficie para que las bacterias se adhieran, lo que permite una mayor eficiencia en la eliminación de estos microorganismos patógenos. (Bebbia/2023).

"Los gasificadores son dispositivos que se utilizan para convertir materiales sólidos en gas de síntesis, que es una mezcla de monóxido de carbono e hidrógeno. Los gasificadores funcionan mediante la introducción de materiales sólidos en un recipiente cerrado, donde se someten a altas temperaturas y presiones."(de Riesgo GAIA Marzo de, A. de T/ 2017).

12. OBJETIVOS

12.1 Objetivo general

Realizar la caracterización de 3 muestras de bagazo de caña provenientes de los municipios de Vianí y Pacho del departamento de Cundinamarca, y de la vereda Muñoces y Camacho del Municipio de San José de Pare del departamento de Boyacá, la evaluación de las condiciones de pirólisis en laboratorio, para extrapolar estos resultados a un gasificador de lecho móvil de la tecnología TransBioEnergy.

12.2 Objetivos específicos

- Determinar a 3 muestras de bagazo de caña de diferente procedencia la caracterización de sus propiedades, evaluando por análisis elemental y próximo el porcentaje de humedad, compuestos volátiles, carbono fijo y cenizas, para identificar las diferencias en su composición.

- Realizar el proceso de pirólisis para las 3 muestras de bagazo de caña a nivel de laboratorio, en un horno piro tubular en atmósfera de nitrógeno, para determinar diferentes condiciones termodinámicas y evaluar eficiencias energéticas y reducción de volúmenes de los materiales obtenidos.
- Evaluar los resultados obtenidos a la luz de la literatura y la teoría de la gasificación, para proyectar las condiciones de operación en un gasificador de lecho móvil y tener datos de entrada para poder realizar las primeras pruebas en entorno relevante en campo con la tecnología TransBioEnergy.

13. MARCO TEÓRICO

13.1 Caña de azúcar

La caña es uno de los cultivos más antiguos del mundo; se cree que su siembra inició 3.000 a.C. En Colombia fue plantada por primera vez en Santa Marta La Antigua del Darién en 1510 (Procaña/2024). Su composición incluye los elementos hidrógeno, carbono y oxígeno; su tallo se distribuye en 74.5 % de agua, 25 % de materia orgánica y 0,5 % de minerales (Midagri/2015). La caña de azúcar no solamente es utilizada para la producción de panela o azúcar; también la

utilizan para la producción de papel, cemento, abonos, alimentos para animales y producir bebidas alcohólicas (Nayarita/2018), a su vez, como un potente alcalino debido a los altos niveles de calcio, magnesio, potasio o hierro, entre otros. Los ambientes alcalinos se han demostrado como eficaces contra la lucha de determinadas enfermedades. Su poder antioxidante ayuda a combatir infecciones y fortalecer el sistema inmunológico. (Carbón/2018). En la actualidad se quieren aprovechar los residuos de caña para la producción de carbón activado.



Ilustración 1(El bagazo de la caña de azúcar, una alternativa para reducir la contaminación minera/2017)

13.2 Carbón activado

El carbón activado hace parte de la familia de adsorbentes carbonáceos altamente cristalinos con una porosidad interna altamente desarrollada. Este material se caracteriza por tener una gran cantidad de microporos (poros de menos de 1 nanómetro de radio). Es utilizado para la extracción de metales, la purificación de agua potable a nivel público o doméstico, usos medicinales ayudando a la desintoxicación, clarificación de jarabes de azúcar, purificación de glicerina, control de emisiones de autos, entre muchos más.

Este se produce por dos métodos diferentes:

La activación química: Una sustancia deshidratante, que puede ser un ácido, una base o una sal, se mezcla con la materia prima y se somete a un tratamiento a temperaturas moderadas. Esta técnica puede ser problemática porque, por ejemplo, al usar como agente deshidratante cloruro de zinc, los residuos del cinc pueden permanecer en el producto final, aún después de lavado.

La activación física o a vapor: El material carbonizado se trata con una mezcla de gases de combustión y vapor de agua a una alta temperatura para que se active. Como material de partida se usan varios materiales carbonosos, como cáscaras de nuez, cáscara de mangostino, madera, coco, bagazo de caña. (Arted dinamico/2014).

13.3.1 Carbón pulverizado:

También llamado carbón activo en polvo, en donde su estructura es porosa, la cual tiene cavidades microscópicas y canales invisibles y es reconocido por los agentes de purificación por su capacidad de adsorción.



Ilustración 2 Carbón pulverizado (Carbón Activado Pulverizado Uso/2024)

13.3.2 Carbón granulado:

Este es de mayor tamaño que el carbón activado pulverizado; además, este se utiliza mucho para filtrar sustancias químicas dañinas tanto en el agua como en el aire, el cual está compuesto por gránulos de carbón.



Ilustración 3 Carbón granulado (Carbón Granulado Activado Puro/2024)

13.4 Fabricación del carbón Caña de azúcar

A partir de los residuos lignocelulósicos del bagazo de caña se realiza la fabricación del carbón activado. Para esto se selecciona la materia prima, como lo es en este caso el bagazo de caña, y se procede a limpiar para eliminar las impurezas. Se deben tener en cuenta factores como los son: La densidad hace parte de las propiedades mecánicas del carbono; esto se debe a que los materiales de baja densidad producen carbonos en polvo con alto volumen de poros. Se debe tener en cuenta que este proceso de carbonización se puede modificar.



Ilustración 4 Máquina De Producción de carbono (Máquina para hacer carbón/2022)

13.5 Activación física

El objetivo de activar el material carbonoso obtenido a través de la pirolisis es modificando la porosidad del carbón, incrementando el volumen de los poros y su área superficial. Después de macerar, se debe pasar por un tamiz de tamaño 80 a 150 μm . (SciELO/2014).

Por medio de los hornos rotatorios y con una temperatura de 400°C - 450°C produce un carbón desordenado, por lo que se debe controlar con ayuda de vapor de agua o dióxido de carbono. Después de este proceso se deben activar los gases oxidantes en una temperatura de 800°C - 1000°C, donde se desarrolla un carbón más fino y una porosidad incipiente de carbonización (SciELO/2014).

13.6 Estructura del carbón activado

El carbón activado es un material carbonoso poroso que ha sido sometido a una reacción con gases, a veces con la adición de productos químicos como lo es el ácido fosfórico, el hidróxido de sodio o cloruro de cinc, durante o después de la carbonización. Los parámetros se caracterizan por la porosidad, forma, tamaño y tipo de poro, espesor de pared, forma de la partícula, dimensión externa de la partícula y presencia de anisotropía.

La estructura básica del carbón es parecida a la del grafito, ya que esta se compone de capas hexagonales fusionadas y sostenidas por fuerzas de Van der Waals en donde las capas se unen por los enlaces de carbono. (Estructura química del carbón activado/2022).

Los heteroátomos, además del carbono, el carbón activado contiene pequeñas cantidades de otros átomos como oxígeno, hidrógeno y nitrógeno; estos permiten que sustancias polares sean retenidas por la superficie del carbono. (Hódar/2014)

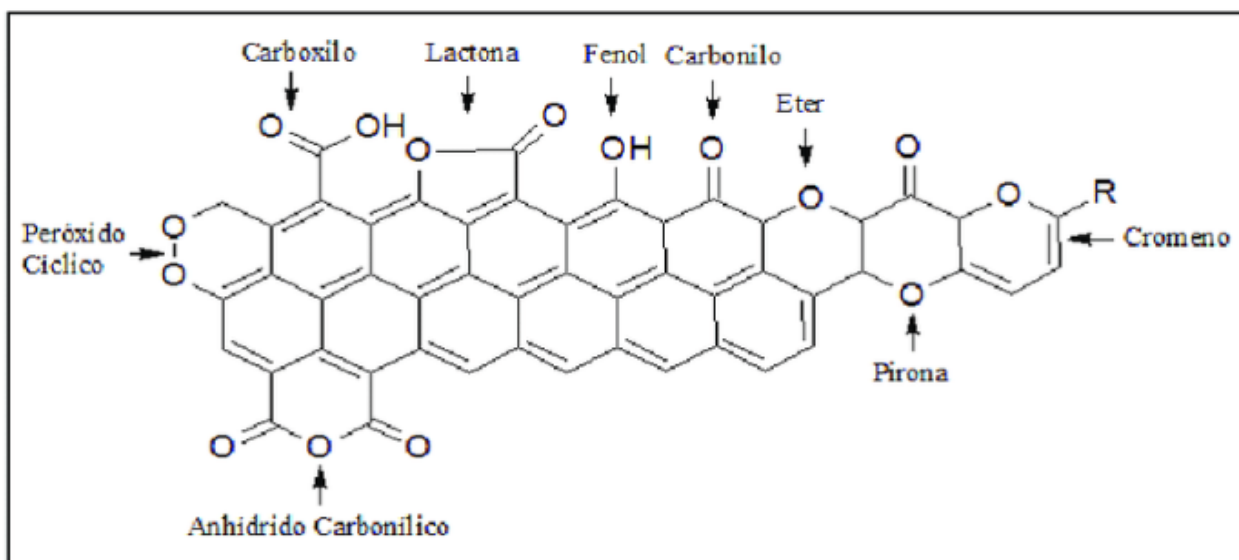


Ilustración 5 Grupo químico funcional del carbón. (Hadar/2014)



Ilustración 6 Grano de carbón activado virgen. (¿Qué es el carbón activado y para qué sirve? /2024)

13.7 Adsorción carbón activado

El carbón activado es capaz de retener plaguicidas, grasas, aceites, detergentes, productos de desinfección, productos de descomposición de algas y vegetales por el metabolismo animal y metales pesados, entre otros.

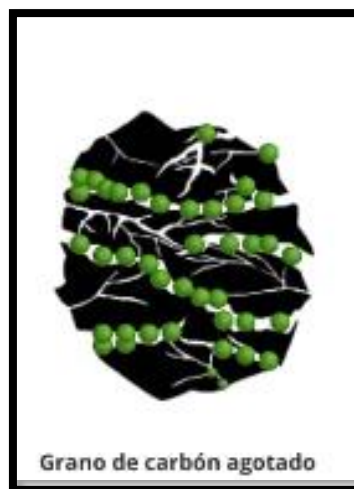


Ilustración 7 Grano de carbón agotado (¿Qué es el carbón activado y para qué sirve? /2024)

13.8 Química superficial del carbón activado

La química superficial del carbono constituye un campo sumamente fascinante que estudia las cualidades y reacciones químicas que tienen lugar en la superficie de los materiales compuestos de carbono. Dichas características revisten una importancia capital para múltiples aplicaciones, abarcando desde la catalización hasta la adsorción y la fabricación de dispositivos electrónicos.

Principales aspectos de la Química Superficial del Carbono.

Funcionalización superficial: Covalente: Implica la formación de vínculos químicos sólidos entre los átomos de la superficie del carbono y otros átomos o grupos funcionales.

No covalente: incluye interacciones más débiles, como las fuerzas de Van der Waals, que pueden modificar las propiedades superficiales sin alterar la estructura básica del carbono.

Heteroátomos: Los materiales de carbono pueden incorporar heteroátomos como oxígeno, nitrógeno, fósforo y azufre, los cuales afectan en gran medida sus propiedades físico-químicas. Estos heteroátomos pueden hallarse presentes de manera natural o ser incorporados durante la preparación o mediante tratamientos posteriores.

Métodos de modificación: Químicos: Utilizan reactivos químicos para incorporar grupos funcionales específicos en la superficie del carbón, una técnica precisa pero menos controlada que los métodos electroquímicos.

Electroquímicos: Permiten una modificación más selectiva y regulada a través de una aplicación de voltaje, lo que resulta especialmente útil para aplicaciones detalladas. La adsorción de los materiales de carbono, como el carbón activado, posee una amplia área superficial y numerosos microporos, lo que los convierte en ideales para la captura de contaminantes de manera efectiva.

Catálisis: La presencia de diversos grupos funcionales en la superficie puede mejorar considerablemente la actividad catalítica del carbono, promoviendo reacciones químicas de forma más selectiva.

14. MARCO LEGAL

La cadena productiva de carbón de Colombia (PACC), la cual se desarrolló por el Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible, está comprometida en regular la explotación, transporte y almacenamiento del carbón, planeando minimizar el impacto ambiental y social, además de mejorar la calidad del aire, y reducir el impacto sobre los ecosistemas y gestión de los recursos hídricos de las zonas carboníferas de Colombia (Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico - RAS/2024).

Ley 1819 de 2016, artículo 221: Esta ley de impuestos tiene como fin desincentivar el uso de combustibles fósiles, ya que estas son las que generan los gases de efecto invernadero. (Política y Normativa/2021).

Ley 2169 de 2021: Tiene como fin establecer metas y medidas para alcanzar el carbono neutral y resiliencia climática, promoviendo un desarrollo bajo en carbono. (LEY 2169 DE 2021/2023).

Decreto 1575 de 2007: Tiene como objetivo establecer el sistema de protección y control de aguas del consumo humano de calidad de agua potable. (Decreto 1575 de 2007 - Gestor Normativo/2023).

Resolución 2115 de 2007, decreto 1575, la cual presenta los parámetros de calidad de aguas y el cumplimiento necesario para el consumo humano.

RAS (Reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico): La cual establece reglamentos para los requisitos técnicos de infraestructura y también procesos de tratamiento de agua potable (Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico - RAS/2024).

15. METODOLOGÍA

15.1 Determinación de humedad del bagazo de caña:

Para la determinación de humedad, se tomaron dos muestras de cada uno de los diferentes departamentos de Pacho Cundinamarca, Vianí Cundinamarca y la vereda Muñoces y Camacho, Municipio San José de Pare del departamento de Boyacá.

Se realizaron ensayos de laboratorio donde se tomaron las pruebas con la unidad de medición de gramos (g), ya que las muestras son pequeñas. Este ensayo tuvo un periodo de cinco a ocho días hábiles.

Desarrollo del procedimiento

- Se toman los recipientes, se enumeran y se toman los datos de su peso vacío.
- Los recipientes que se utilizaron deben ser de cápsulas de porcelana; después se introducen al horno para realizar el secado por 24 horas con una temperatura de 60°C y de esta manera se deshace la humedad presente.
- Enseguida del proceso anterior, se retiran del horno para colocarlos en el desecador durante una hora para de esta forma enfriar los recipientes y eso permite un secado correcto para no presentar humedad en la intemperie.
- Se continúa, pesando la muestra de cada muestra de bagazo de caña de los tres materiales.
- Se introducen las muestras de bagazo de caña en el horno de 24 horas con una temperatura de 60°C.
- Al retirar los recipientes con las muestras del horno, se introducen al desecador por una hora para de esta forma enfriar los cuales no obtuvieron humedad al dejarse a la intemperie.

- Al enfriarse las muestras se retiran de los desecadores y se toma nuevamente el peso de cada una.
- Nuevamente se introducen al horno por el mismo periodo de tiempo que es de 24 horas; este procedimiento se realiza hasta que las muestras conserven un peso constante, lo que significa que este ya ha perdido la humedad total.

15.2 Determinación de cenizas del bagazo de caña

La ceniza se define como el material remanente del proceso de combustión a partir de un material lignocelulósico. Para medir el contenido de cenizas se necesita que la biomasa o material esté en un periodo de dos horas a una temperatura de 550°C.

En este ensayo se tomó una fracción de 2 a 3 g de material seco, de los cuales anteriormente se había tomado la determinación de humedad y se tomaron 2 muestras de cada una de las muestras de bagazo de caña provenientes de San José de Pare, Pacho y Vianí.

Desarrollo del procedimiento -

- Primero, los recipientes que se deben utilizar se introducen vacíos en el horno por 24 horas a una temperatura de 550°C para quitar la humedad presente en el recipiente.

- Las muestras colocadas en el desecador de porcelana se introducen al horno nuevamente a una temperatura de 550°C por dos horas y se dejan enfriar por una hora en el desecador de porcelana.
- Se toma el peso a cada una de las muestras; enseguida se vuelve a introducir al horno a 550°C por dos horas y luego de nuevo al desecador por 24 horas para evitar la humedad. Este procedimiento se repite hasta obtener peso constante.

15.3 Material volátil

Esta es la medida de los gases volátiles que se forman a partir de las muestras de carbón durante el periodo de calentamiento. Para medir los gases se debe tomar un gramo de material lignocelulósico ya seco y someterlo a una temperatura de 900°C por un periodo de 7 minutos.

Desarrollo del procedimiento

- Se utilizan cápsulas de porcelana y se calienta el horno por un periodo de 24 horas en una temperatura de 900°C para eliminar la humedad y residuos de otros materiales.
- Luego se coloca el recipiente con la muestra en el desecador.
- La muestra se coloca en la mufla y a una temperatura de 900°C por siete minutos en el horno; después de este proceso se deja enfriar por una hora.

- Se procede a tomar el peso de cada una de las muestras y nuevamente se introduce al horno a 900 °C por 7 minutos y luego al desecador hasta enfriar y se vuelve a pesar. Se repite este procedimiento hasta peso constante.

15.4 Carbón fijo

Con este ensayo se puede evaluar el contenido de carbón fijo de un material lignocelulósico para estimar la cantidad de producto de combustión que se determina con la diferencia de la muestra entre el contenido de humedad total, cenizas y material volátil con ayuda de la siguiente ecuación.

$$C_d = 100 - M_{ad} - A_d - V_d$$

M_{ad} : Porcentaje de humedad total

A_d : Porcentaje total de cenizas

V_d : Porcentaje total de material volátil

15.5 TGA (Análisis termogravimétrico)

Este análisis consiste en aumentar gradualmente la temperatura de las muestras de bagazo de caña en un reactor en atmósfera inerte de nitrógeno, mientras se mide la pérdida de peso del mismo. Esto se debe hacer con una velocidad controlada de velocidad.

15.6 Pirolisis y porcentaje de reducción de volumen

Con este ensayo evaluamos la cantidad de carbón obtenido a partir de una muestra de bagazo de caña a ciertas condiciones de pirólisis, al igual que el porcentaje de reducción de volumen. Se pesa solamente el recipiente en el que se quiera colocar el material se debe hacer con cada uno de los bagazos de caña que se quieren evaluar.



Ilustración 8 Peso de la muestra. (Fuente propia)

- Se pesa el bagazo de caña de los tres departamentos en diferentes secciones.



Ilustración 9 Introducción del material al recipiente. (Fuente propia)



Ilustración 10 Peso del material y recipiente. (Fuente propia)

- Se introduce el material en celda para la pirolisis en el horno.



Ilustración 11 Introducción del material a la celda. (Fuente propia)



Ilustración 12 Acomodación del material en la celda. (Fuente propia)

- Enseguida se introduce en el tubo o reactor perteneciente al horno y con ayuda de una barra se acomoda en el punto exacto para que el proceso sea eficiente, dejando a un lado el recipiente con el bagazo de caña.

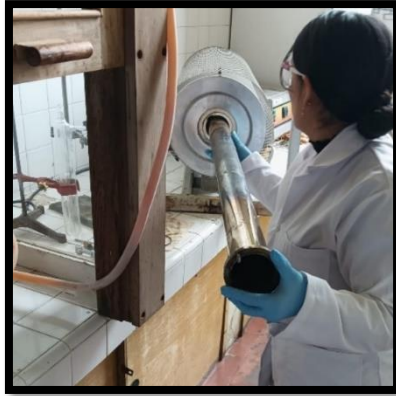


Ilustración 13 Introducción de tubo al reactor. (Fuente propia)

- Se coloca con cuidado el material con el recipiente dentro de tubo acomodándolo de forma correcta para un proceso eficiente y con ayuda de una barra metálica se empuja cuidadosamente.



Ilustración 14 Introducción del material a el tubo del reactor. (Fuente propia)



Ilustración 15 Acomodación de la celda dentro del reactor. (Fuente propia)

- Se ensambla el horno; se le colocaron los tornillos de manera adecuada y cuidadosa.



Ilustración 16 Colocación de la tapa del reactor. (Fuente propia)



Ilustración 17 Ajuste de tornillos de la tapa del reactor. (Fuente propia)

- Conectamos el nitrógeno al horno.



Ilustración 18 Conexión del nitrógeno a el horno. (Fuente propia)



Ilustración 19 Ajuste del nitrógeno. (Fuente propia)

- Se inicia a preparar la soda cáustica para las trampas de gases. Estas se preparan con hidróxido de sodio dispuesto con agua. Se deben pesar 50 g de hidróxido de sodio.

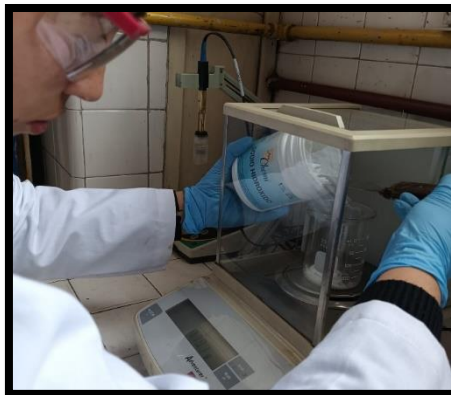


Ilustración 20 Muestra del peso que es Hidróxido de sodio. (Fuente propia)



Ilustración 21 Pesaje de Hidróxido de sodio. (Fuente propia)



Ilustración 22 Introducción del Hidróxido de sodio a otro recipiente. (Fuente propia)



Ilustración 23 inicio de la mezcla de Hidróxido de sodio con agua. (Fuente propia)



Ilustración 24 Disolución completa entre el agua y el Hidróxido de sodio. (Fuente propia)

- La soda cáustica se introduce en las trampas de gases.



Ilustración 25 Introducción de la soda caustica a la trampa de gases. (Fuente propia)

- Se procede a ubicar los recipientes.



Ilustración 26 Acomodación de las trampas de gases. (Fuente propia)

- Se conectan las mangueras para que el proceso químico se realice durante las 4 horas en el horno.



Ilustración 27 Conexión de las mangueras con el reactor. (Fuente propia)



Ilustración 28 Posición final del reactor. (Fuente propia)



Ilustración 29 Resultado de pirolisis del bagazo de caña. (Fuente propia)



Ilustración 30 Disminución en peso del material. (Fuente propia)



Ilustración 31 Resultado final de pirolisis. (Fuente propia)

16. ANÁLISIS Y RESULTADOS

16.1 Análisis de determinación de humedad

El contenido de humedad en base húmeda se describe como una medida porcentual de la masa que contiene la muestra con relación a la masa total. Con la siguiente fórmula podemos obtener el porcentaje:

$$\%H_{bh} = \frac{m_h - m_s}{m_h} \times 100$$

m_h : Masa de la muestra húmeda

m_s : Masa de la muestra seca

El contenido de humedad en base seca se describe como una medida porcentual de la masa que contiene la muestra con relación a la masa total luego de haberse sometido a proceso de secado. Con la siguiente fórmula podemos obtener el porcentaje.

$$\%H_{bh} = \frac{m_h - m_s}{m_s} \times 100$$

m_h : Masa de la muestra húmeda

m_s : Masa de la muestra seca

Resultado

Al realizar la toma de las muestras del bagazo de caña provenientes de los tres municipios diferentes, podemos observar en la tabla 1 que el porcentaje de Vianí es de 13,83, mientras que el

de San José de Pare es de 5,43 y 5,14 de Pacho, lo cual indica que Vianí tiene el más alto porcentaje y por lo tanto es el bagazo de caña más húmedo de las tres muestras.

HUMEDAD BAGAZO DE CAÑA - (100°C)						
RECIPIENTE	PESO RECIPIENTE SECO (g)	MATERIAL	PESO INICIAL ANTES DE SECADO INCLUIDO RECIPIENTE (g) 25/10/23	PESO SECO-1 (g) 27/10/23	PESO SECO-2 (g) 30/10/23	PESO SECO-3 (g) 01/11/23
2	85,3881	San José de Pare	86,4863	86,4584	86,4279	86,4388
3	76,8895	San José de Pare	78,6391	78,5985	78,5421	78,5611
5	78,2604	Pacho	79,1277	79,1054	79,0824	79,091
6	77,5999	Pacho	78,2498	78,2333	78,2169	78,2232
8	77,5154	Vianí	79,2987	79,1016	79,0529	79,0655
9	81,8981	Vianí	83,7866	83,5596	83,5246	83,5345

Tabla 1 Resultado de humedad.

MATERIAL	% HUMEDAD	PROMEDIO % HUMEDAD
San José de Pare	5,32	
San José de Pare	5,54	5,43
pacho	5,22	
Pacho	5,06	5,14
Vianí	13,78	
Vianí	13,87	13,83

Tabla 2 Porcentaje de resultado de humedad



Gráfico 1 Resultado de humedad

16.2 Análisis de determinación de cenizas

Para la determinación de cenizas del bagazo de caña, se necesita que el material sea sometido a una temperatura de 550°C por dos horas. Este porcentaje de cenizas se debe calcular a partir de la siguiente ecuación.

$$A_d = \frac{(m_3 - m_1)}{(m_2 - m_1)} \times 100 \times \frac{100}{(100 - m_{ad})}$$

$m_1(g)$: Masa de la capsula de porcelana.

$m_2(g)$: Masa de la capsula de porcelana y muestra antes del ensayo.

$m_3(g)$: Masa de la capsula de porcelana y muestra despues del ensayo.

M_{ad} : Porcentaje de humedad total de la muestra.

Resultado

CENIZAS BAGAZO DE CAÑA - (550°C)									
RECIPIENTE	PESO RECIPIENTE SECO (g)	MATERIAL	PESO INICIAL ANTES DE CENIZAS INCLUIDO RECIPIENTE (g) 07/11/23	PESO-1 (g) 09/11/23	PESO-2 (g) 10/11/23	PESO-3 (g)	PROMEDIO % HUMEDAD	% CENIZAS	PROMEDIO % CENIZAS
1	20,2816	San José de Pare	21,2224	20,3009	20,3002			1,98	
2	18,0847	San José de Pare	19,1605	18,1054	18,1052		5,43	1,91	1,94
3	17,6543	Pacho	18,6581	17,7342	17,7336			7,90	
4	18,0171	Pacho	18,9829	18,0916	18,0911		5,14	7,66	7,78
5	18,0111	Vianí	19,1715	18,0566	18,0563			3,90	
6	18,3056	Vianí	19,4726	18,3485	18,3482		13,83	3,65	3,77

Tabla 3 Determinación de cenizas

San José de Pare	0,9215	0,0007	
San José de Pare	1,0551	0,0002	
pacho	0,9239	0,0006	
pacho	0,8913	0,0005	
Vianí	1,1149	0,0003	
Vianí	1,1241	0,0003	

Tabla 4 Resultado pérdida de peso constante.

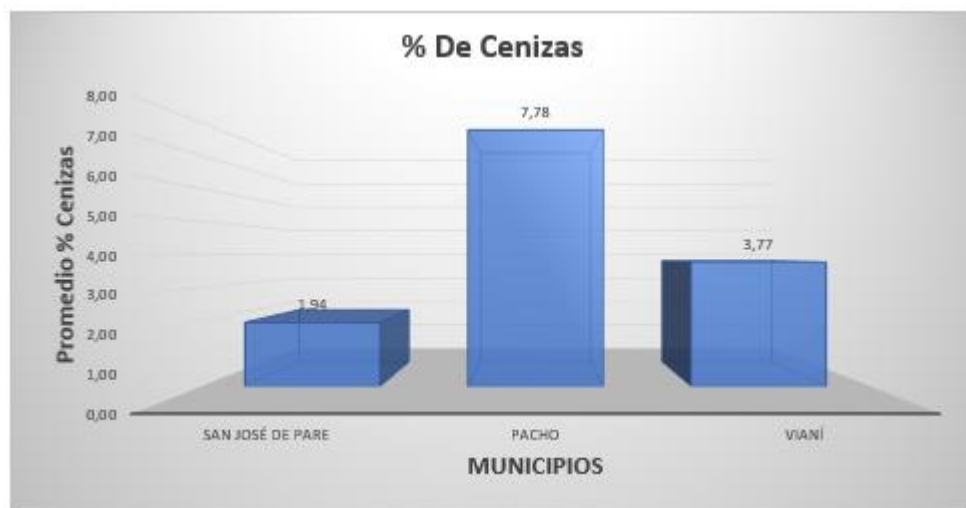


Gráfico 2 Resultado de cenizas

Podemos observar en la Grafico 2 que el bagazo de caña con más porcentaje de cenizas es el de Pacho – Cundinamarca con el 7.78% en comparación de San José de pare con 1,94 y Vianí con 3,77 %.

16.3 Análisis de material volátil

Esta se define como la medida de gases no volátiles, ya que se forman a partir del calentamiento del carbón; para este proceso se debe tomar el material lignocelulósico, para estudiar la muestra se debe calentar hasta 900°C durante 7 minutos. Utilizando la siguiente ecuación.

$$V_d = \left[\frac{100(m_2 - m_3)}{m_2 - m_1} - M_{ad} \right] \times \left(\frac{100}{100 - m_{ad}} \right)$$

$m_1(g)$: Masa de la capsula de cuarzo con tapa.

$m_2(g)$: Masa de la capsula de cuarzo con tapa y muestra antes del ensayo.

$m_3(g)$: Masa de la capsula de cuarzo con tapa y muestra despues del ensayo.

M_{ad} : Porcentaje de humedad total de la muestra.

Resultado

Como resultado del laboratorio, podemos verificar en la Tabla 5 que el bagazo de caña de San José de Pare actuando mediante el proceso de calentamiento de 900°C presenta mejor comportamiento en temas de material volátil con un promedio de 1.84% en comparación con los resultados de Pacho que es el porcentaje más alto de 4.84% y Vianí que tiene un 3.17 %.

MATERIA VOLÁTIL BAGAZO DE CAÑA - (300°C)							
RECIPIENTE	PESO RECIPIENTE SECO (g)	MATERIAL	PESO INICIAL ANTES DE MATERIAL VOLÁTIL INCLUIDO RECIPIENTE (g) 15/01/24	PESO-1 (g) 16/01/24	PESO-2 (g) 17/01/24	z MATERIAL VOLÁTIL	PROMEDIO z MATERIAL VOLATIL
1	18,0115	San José de Pare	18,8844	18,0262	18,0260	1,66	
2	18,5282	San José de Pare	19,5636	18,5431	18,5431	2,02	1,84
3	20,2823	Pacho	20,8198	20,3022	20,3021	3,68	
4	17,6562	Pacho	18,4831	17,7063	17,7062	6,00	4,84
5	18,0803	Vianí	19,1063	18,1186	18,1185	3,67	
6	18,0125	Vianí	19,1627	18,0436	18,0433	2,68	3,17

Tabla 5 Resultados de material volátil

San José de Pare	0,8582	0,0002
San José de Pare	1,0145	0,0000
pacho	0,5176	0,0001
pacho	0,7828	0,0001
Viani	0,9877	0,0001
Viani	1,1131	0,0003

Tabla 6 Resultados pérdida de peso constante.

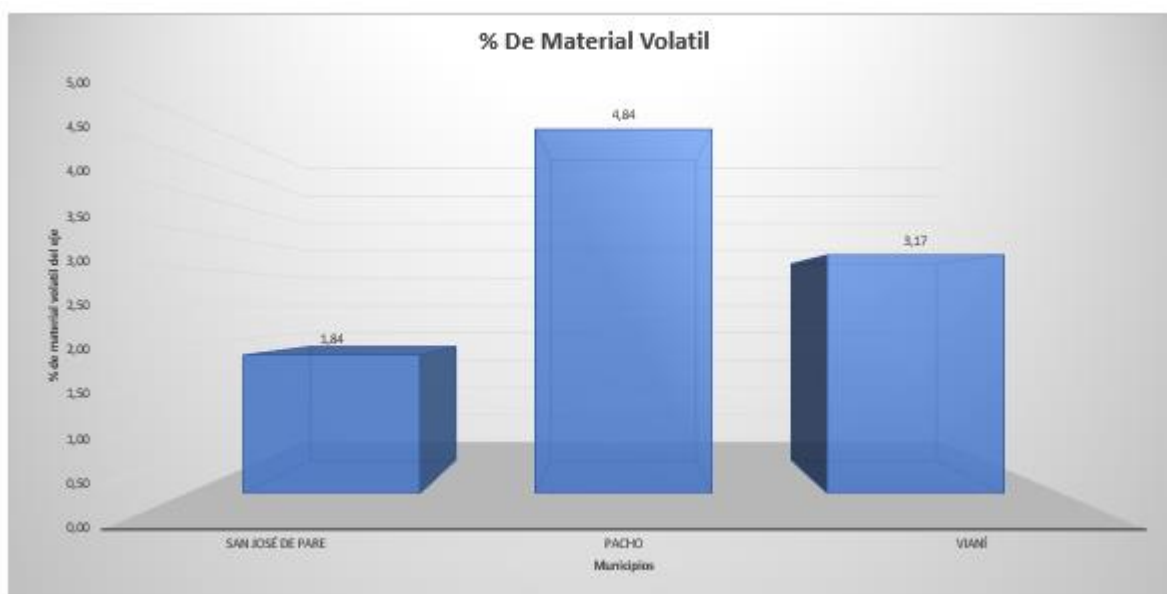


Gráfico 3 Resultado de material volátil

En el Grafico 3 se muestra que el bagazo de caña con más material volátil es el de Pacho – Cundinamarca con un 4.84% enseguida esta Viani con 3.17% y la muestra que menos genero material volátil es el de San José de pare

16.4 Análisis de carbón fijo

Para la determinación del carbón fijo del material lignocelulósico. Se estima la cantidad de carbono disponible con la siguiente ecuación:

$$C_d = 100 - M_{ad} - A_d - V_d$$

M_{ad} : Porcentaje de humedad total

A_d : Porcentaje total de cenizas

V_d : Porcentaje total de material volátil

Resultado

MATERIAL	PROMEDIO % HUMEDAD	PROMEDIO % CENIZAS	PROMEDIO % MATERIAL VOLATIL	% CARBONO FIJO	% SUCEPTIBLE DE GASIFICACIÓN
San José de Pare	5,43	1,94	1,84	90,79	92,63
Pacho	5,14	7,78	3,00	84,07	87,08
Vianí	13,83	3,77	3,17	79,23	82,40

Tabla 7 Resultados de carbón fijo.

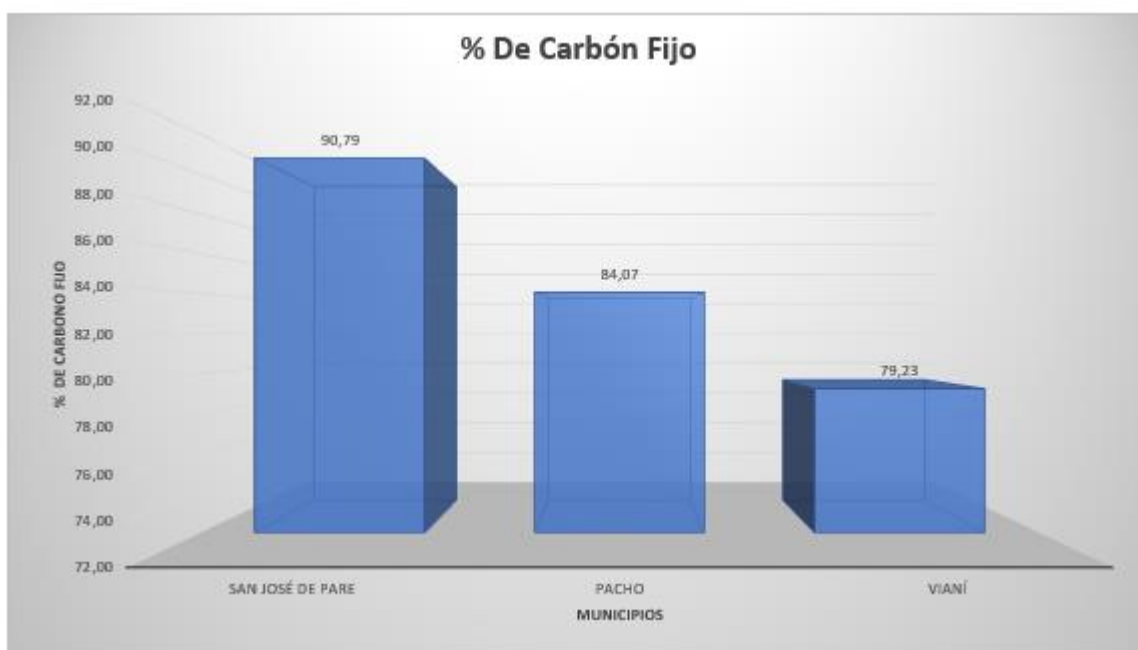


Gráfico 4 Resultados de carbón fijo

Como resultado del laboratorio, podemos observar en el gráfico 4 que el material con menos porcentaje de carbón fijo es el de Vianí, Cundinamarca con el 79.23%, seguido de pacho con 84.07% y finalmente el de San José de Pare con el 90.79% de carbón fijo.

16.5 TGA (Análisis termogravimétrico)

Mediante este análisis se observa el comportamiento de la muestra de material lignocelulósico de bagazo de caña sometida a la temperatura, el cual determina el porcentaje de pérdida de peso

por descomposición química, deshidratación, pérdida de disolventes y determinación en la estabilidad térmica.

San José De Pare

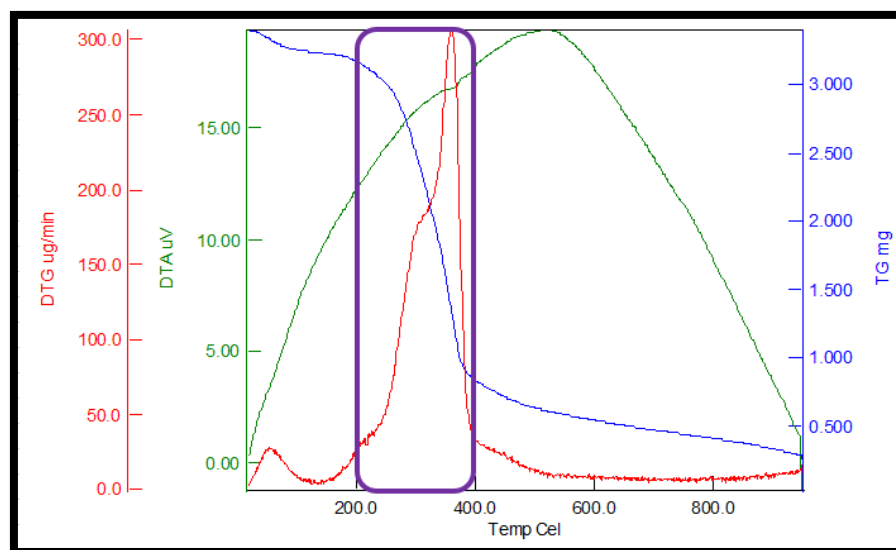


Gráfico 5 TGA San José de Pare

Pacho Cundinamarca

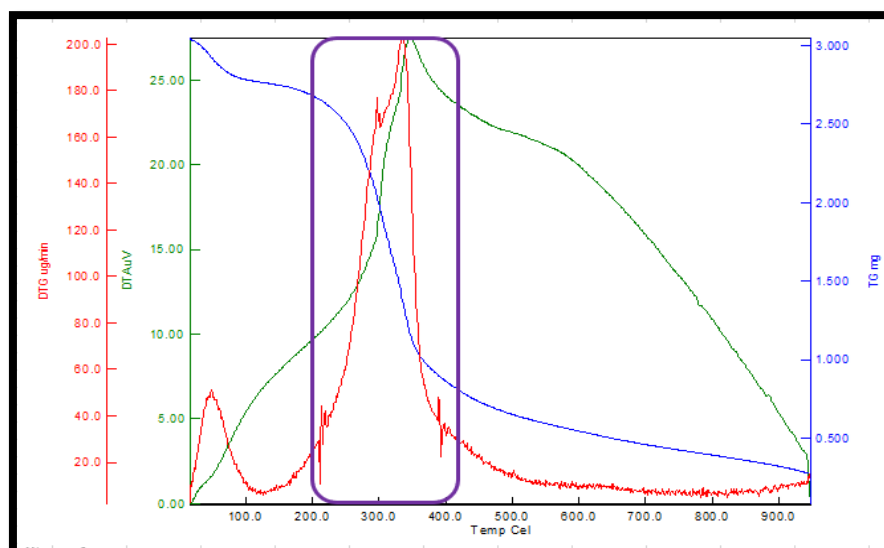


Gráfico 6 TGA Pacho

Viani - Cundinamarca

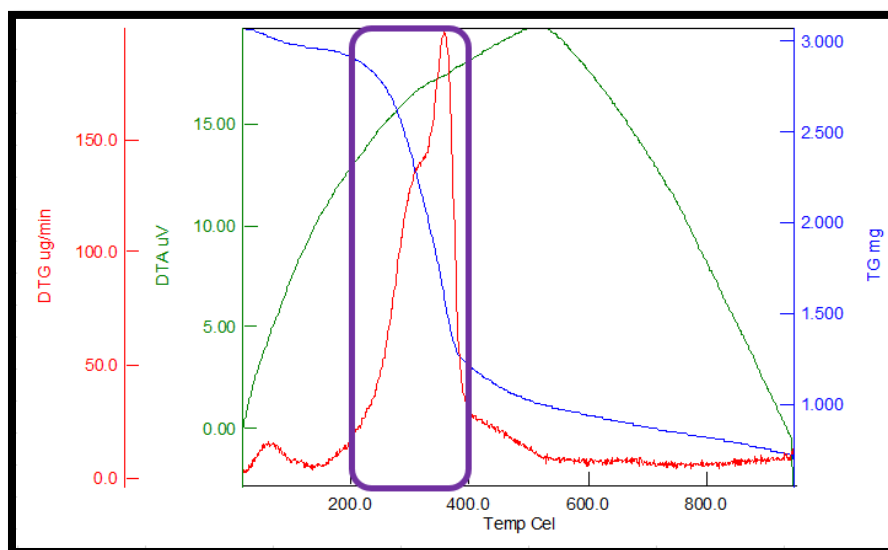


Gráfico 7 TGA Viani

Resultado

Como se muestra en las Gráficas 5 y 9, el comportamiento del material frente a su pérdida de peso es muy similar. Estas pertenecen a Vianí y Pacho, Cundinamarca, donde se puede observar que su peso disminuyó a una temperatura de 200°C a 450°C. Cuando llega a los 450° C, su peso no tiene tanta pérdida.

A comparación de San José de Pare, este cambia de una forma diferente, ya que al llegar a la temperatura de 225°C inicia su disminución del peso del material; aun así, tiene un comportamiento similar en cuanto a el peso.

16.6 Análisis Pirolisis y factor de reducción de volumen.

Iniciando el proceso de pirolisis, primero se tenían que tomar los datos iniciales del material lignocelulósico, como lo es el volumen del bagazo de caña, como se muestra en las imágenes de la Tabla 4. Teniendo en cuenta las condiciones de carbonización para las tres muestras de bagazo de caña, las cuales son las siguientes:

Atmosfera: Nitrógeno gaseoso flujo 5 ml/min

Rampa de calentamiento 5°C/min

Set point final: 450°C

Tiempo de proceso: 60 minutos

Enfriamiento: inercia térmica hasta temperatura ambiente

Material Crudo	Material Carbonizado
San José de pare 	San José de pare 
Pacho 	Pacho 
Viani 	Viani 

Ilustración 32 Muestra del volumen de carbonización.

Para el factor de rendimiento de la reacción o eficiencia del proceso se realizó un método empírico, el cual consiste en establecer el % de rendimiento o eficiencia del proceso de obtención carbono con la siguiente fórmula.

$$\% RoE = \frac{Pf \times 100}{Pi}$$

%RoE: Porcentaje de rendimiento o eficiencia del proceso

Pf: Peso final de la muestra con el proceso de pirolisis

Pi : Peso inicial de la muestra antes del proceso de pirolisis

Enseguida de esta fórmula aplicamos la fórmula empírica de porcentaje de reducción de volumen, como se muestra en la siguiente formula

$$\% RV = 100 - \frac{Vf \times 100}{Vi}$$

%RV: Porcentaje de reducción de volumen

Pf: Volumen final de la muestra con el proceso de pirolisis

Pi : Volumen inicial de la muestra antes del proceso de pirolisis

Resultado

Después de la carbonización de bagazo de caña, se puede observar que en la ilustración 32 perteneciente a Vianí-Cundinamarca presenta menos disminución de la muestra con 175 ml, mientras que el resultado de San José de Pare y Pacho-Cundinamarca tiene 150 ml de material. La muestra con mejor rendimiento del proceso de pirólisis es la muestra de Vianí con un 29,47 % pero es la que presenta el menor % de reducción de volumen, ver tabla 8.

DATOS PIROLISIS EN HORNO PIROTUBULAR MUESTRAS DE BAGAZO DE CAÑA						
MUESTRA	PESO INICIAL (g)	PESO FINAL (g)	% RENDIMIENTO O EFICIENCIA DEL PROCESO	VOLUMEN INICIAL (mL)	VOLUMEN FINAL (mL)	% REDUCCIÓN DE VOLUMEN
SAN JOSE DE PARE	32,738	7,984	24,39	350	150	57,14
PACHO	47,734	9,638	20,19	350	150	57,14
VIANI	29,869	8,801	29,47	350	175	50,00

Tabla 8 Resultados datos de pirólisis

17. CONCLUSIONES

Se realizó la caracterización de las tres muestras de bagazo de caña provenientes de municipios de Vianí y Pacho-Cundinamarca y la vereda Muñoces y Camacho, municipio San José de Pare del departamento de Boyacá, donde se evaluó las condiciones de pirolisis de cada una, se puede ver como resultado que material lignocelulósico que presenta menos humedad es Pacho Cundinamarca con un 5.14% de humedad. También se observa que la muestra con menos

porcentaje de carbón fijo y cenizas que es la de San José de Pare con un 1.94%. Esta misma muestra también presentó un bajo porcentaje en material volátil de un 1.84%.

En la realización de un laboratorio de pirolisis en un horno piro tubular, arrojó como resultado que el % de rendimiento y eficiencia del proceso de Vianí fue el más alto con un 29,47% y una reducción de volumen de 50 %

Estos resultados sugieren recomendar las condiciones de operación para que sean utilizados para la realización de las pruebas en el gasificador de lecho móvil del paquete tecnológico TransBioEnergy, Calentamiento 5°C/min, atmósfera nitrógeno a un flujo de 100 mL/min, temperatura final de gasificación 450°C, tiempo de residencia 1 hora y enfriamiento por inercia térmica.

18. RECOMENDACIONES

Se recomienda aplicar estos procedimientos y condiciones de operación ya establecidos a las primeras pruebas en entorno relevante de la tecnología TransBioEnergy de la Universidad Piloto para de esta forma hacer los primeros ensayos.

También se recomienda explorar otros precursores lignocelulósicos con las mismas metodologías y condiciones para determinar y validar si estas condiciones se cumplen.

Se recomienda hacer ensayos con otras rampas de temperatura, por ejemplo 10°C/min para determinar eficiencias con otras condiciones y mejorar la eficiencia energética.

19. BIBLIOGRAFÍA

¿Cómo el carbón activado elimina los contaminantes del agua? (2023, julio 28). Advance Health Technologies. <https://advancehealthtechnologies.com/blogs/news/como-el-carbon-activado-elimina-los-contaminantes-del-agua>

¿Qué es el carbón activado y para qué sirve? (2023). Carbotecnia.info. <https://www.carbotecnia.info/aprendizaje/carbon-activado/que-es-carbon-activado/>

Artedynamico. (2014). CARBON ACTIVADO. <https://www.equiposylaboratorio.com/portal/articulo-ampliado/carbon-activado>

Beneficios de la caña de azúcar y sus propiedades. (2018, junio 15). Huerta Tropical.

<https://huertatropical.com/beneficios-y-propiedades-cana-de-azucar/>

Carbón Activado Pulverizado Uso. (2024). Com.mx.

https://articulo.mercadolibre.com.mx/MLM-796943909-carbon-activado-pulverizado-uso-cosmetico-1kg-malla-200-_JM

Carbón Granulado Activado Puro. (2023). Com.co.

https://rvreactivos.mercadoshops.com.co/MCO-622725387-carbon-granulado-activado-puro-para-filtros-1000g-g-a-24-_JM

Carbón poroso ¿Cómo purifica el carbón activado? (2023). Carbotecnia.info.

<https://www.carbotecnia.info/aprendizaje/carbon-activado/carbon-poroso-como-purifica-el-carbon-activado/>

Carbotecnia.info (2021). Recuperado el 5 de octubre de 2024, de

<https://www.carbotecnia.info/aprendizaje/carbon-activado/que-es-carbon-activado/>

Cenicaña min ambiente. (2022). Gov.co. <https://quimicos.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2022/06/6-Nicolas>

Dahmen, N., Lewandowski, I., Zibek, S., & Weidtmann, A. (2019). Integrated lignocellulosic value chains in a growing bioeconomy: Status quo and perspectives. *Global Change Biology. Bioenergy*, 11(1), 107–117. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12586>

de Riesgo GAIA Marzo de, A. de T. (2017). Gasificación y pirólisis de residuos: procedimientos de alto riesgo y baja rentabilidad para el tratamiento de residuos. No-burn.org. <https://www.no-burn.org/wp-content/uploads/Gasificaci%C3%B3n-y-pir%C3%B3lisis-2017-ESP-1.pdf>

Decreto 1575 de 2007 - Gestor Normativo. (2023). Gov.co. <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=30007>

Dufour, J. (2011, junio 10). La pirolisis de biomasa: un clásico revitalizado. *Energía y Sostenibilidad* -. <https://www.madrimasd.org/blogs/energiasalternativas/2011/06/10/131236>

El bagazo de la caña de azúcar, una alternativa para reducir la contaminación minera. (2014). Edu.ec. <http://noticias.espol.edu.ec/article/el-bagazo-de-la-ca%C3%B1a-de-azucar-una-alternativa-para-reducir-la-contaminacion-minera>

El bagazo de la caña de azúcar, una alternativa para reducir la contaminación minera. (2017). Edu.ec. <http://noticias.espol.edu.ec/article/el-bagazo-de-la-ca%C3%B1a-de-azucar-una-alternativa-para-reducir-la-contaminacion-minera>

El carbón activado y su poder para eliminar bacterias en el agua. (2023, agosto 15). Bebbia; bebbia.com. <https://bebbia.com/blog/el-carbon-activado-y-su-poder-para-eliminar-bacterias-en-el-agua/>

Estructura química del carbón activado. (2022). Desotec. <https://www.desotec.com/es/knowledge-hub/article/chemical-structure-of-activated-carbon>

Estructura química del carbón activado. (2022). Desotec. <https://www.desotec.com/es/knowledge-hub/article/chemical-structure-of-activated-carbon>

Evaluación de un carbón activado comercial en la remoción del colorante DB2. (2017). Org.co. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2027-42972017000200164#B8

Historia de la Caña. (2018). Procana.org. <https://procana.org/site/historia-de-la-cana/>

Hódar, F. J. M. (2014). Desarrollo y aplicaciones de materiales avanzados de carbón. Unia.es. https://dspace.unia.es/bitstream/handle/10334/7483/01_Izquierdo.pdf?sequence=1

Hódar, F. J. M. (2014). Desarrollo y aplicaciones de materiales avanzados de carbón. Unia.es. https://dspace.unia.es/bitstream/handle/10334/7483/01_Izquierdo.pdf?sequence=1

HOP Group. (2019, agosto 15). Normatividad del agua potable en Colombia. Acuatécnica.
<https://acuatecnica.com/normatividad-del-agua-potable-en-colombia/>

Jaramillo, M. M. (2018). Aprovechamiento del bagazo de caña de azúcar con el fin de generar nuevos usos. Edu.co.
https://repositorio.itm.edu.co/bitstream/handle/20.500.12622/5666/MariaAlejandra_DelRioCalle_2018.pdf?sequence=4

La caña de azúcar como materia prima para la producción. (2020). Gob.pe.
<http://www.midagri.gob.pe>

LEY 2169 DE 2021. (2023). Gov.co. <https://www.suin-juriscol.gov.co/viewDocument.asp?id=30043747>

Máquina para hacer carbón. (2022, febrero 26). BESTON® GROUP CO., LTD.
<https://www.bestongrupo.es/tag/maquina-para-hacer-carbon/>

Nayarit, R. A. (2018). La caña de azúcar y su importancia para la industria azucarera. gob.mx.
<https://www.gob.mx/agricultura/nayarit/articulos/la-cana-de-azucar-y-su-importancia-para-la-industria-azucarera?idiom=es>

Ospina-Guarín, V. M., Buitrago-Sierra, R., & López-López, D. P. (2014). Preparación y caracterización de carbón activado a partir de torta de higuera. *Tecnológicas*, 17(32), 75–84.
http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0123-77992014000100008

Política y Normativa -. (2021, junio 15). Gov.co. <https://www.minambiente.gov.co/cambio-climatico-y-gestion-del-riesgo/politica-y-normativa/>

Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico - RAS. (2024). Gov.co. <https://www.minvivienda.gov.co/viceministerio-de-agua-y-saneamiento-basico/reglamento-tecnico-sector/reglamento-tecnico-del-sector-de-agua-potable-y-saneamiento-basico-ras>

Reinoso y M. Molina Sabio, F. R. (2020). EL CARBÓN ACTIVADO EN PROCESOS DE DESCONTAMINACIÓN. *Elaguapotable.com*.
<http://www.elaguapotable.com/El%20carbon%20activo%20en%20procesos%20de%20descontaminacion.pdf>

Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia. (2008). Redalyc.org.
<https://www.redalyc.org/pdf/430/43004305.pdf>

Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia. (2017). Org.co.
http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-62302007000300006

Nayarit. (2018). Carbotecnia.info. <https://www.carbotecnia.info/aprendizaje/carbon-activado/que-es-carbon-activado/>

Carbón Activado. (2018). Medlineplus.gov.
<https://medlineplus.gov/spanish/druginfo/natural/269.html>

Scielo. (2014). Análisis de estabilidad de biochar de residuos agroforestales.
http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-28122022000400377

Bebbia (2023, agosto 15) El carbón activado y su poder para eliminar bacterias en el agua;
bebbia.com. <https://bebbia.com/blog/el-carbon-activado-y-su-poder-para-eliminar-bacterias-en-el-agua/>

Midagri, (2024). La caña de azúcar como materia prima para la producción de carbón.
http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2224-79202018000100001

Procaña. 2024. Historia de la Caña. (2024). Procana.org. <https://procana.org/site/historia-de-la-cana/>

Puente, T. (2024, junio 3). Los países con las mayores reservas de agua dulce del mundo.
Tercer Puente. <https://tercerpuente.com/los-paises-con-las-mayores-reservas-de-agua-dulce-del-mundo/>

